

Agenda21-Projekt: Messtechnische Untersuchungen an Schulen zur Unterstützung eines energiebewussten Nutzerverhaltens

The two most important factors for energy consumption in buildings are heating energy for conditioning an adequate room climate and electric energy for lighting. Information and constant motivation are especially necessary in public buildings, where many people contribute to the total amount of energy consumed. In order to support energy-conscious behavior among users, the Karlsruhe University of Applied Sciences was commissioned to carry out an experimental study at three schools in Karlsruhe. Various methods of user feedback were used to support energy-saving behavior which may result in a decreasing consumption of energy in the classroom. The results of the study indicate that there is a huge potential for saving energy without losing comfort.

1. Einleitung

Energie in Form von Wärme für die Beheizung von Räumen und in Form von elektrischer Energie zur Beleuchtung ist notwendig, um eine auf die Nutzerbedürfnisse abgestimmte Behaglichkeit beim Aufenthalt in Räumen zu sichern. Zu konditionieren sind dementsprechend die raumklimatischen Verhältnisse, die Luftqualität und die Lichtverhältnisse. Im Kontext der globalen Erwärmung und begrenzten Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen kommt der schonenden und effizienten Energienutzung eine besondere Bedeutung zu. Nicht nur in Wohn- und Wirtschaftsbauten, sondern auch in öffentlichen Gebäuden werden hohe Energieeinsparpotentiale vermutet. Dabei hängt der Energieverbrauch nicht allein von der wärmetechnischen Ausbildung der Gebäudehülle und der eingesetzten Haustechnik ab; auch das Nutzerverhalten spielt hier eine wichtige Rolle. Ziel des vom Umweltamt und von der Gebäudewirtschaft der Stadt Karlsruhe initiierten Forschungsvorhabens war es folglich, festzustellen, welchen Einfluss das Nutzerverhalten auf den Energieverbrauch öffentlicher Gebäude hat. Schließlich zeigen Erfahrungen beider Ämter, dass selbst in optimal ausgestatteten Gebäuden der Energieverbrauch durch ein unterschiedliches Nutzerverhalten deutlich schwankt und dass besonders in anonymen Gebäuden ein energiesparendes Verhalten der Nutzer von ständiger Motivation abhängig ist.

Um das energiebewusste Nutzerverhalten zu analysieren und zu unterstützen, wurde die Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft im Oktober 2004 von der Stadt Karlsruhe, der Gebäudewirtschaft und dem Amt für Umwelt- und Arbeitsschutz mit der Durchführung messtechnischer Untersuchungen in drei Karlsruher Schulen beauftragt. Hierzu sollten Visualisierungs- und Steuerungsinstrumente erprobt

werden, die ein energiesparendes Nutzerverhalten unterstützen und somit zur Verringerung des Energieverbrauchs in Klassenzimmern führen können.

2. Ziele des Projekts

Zur Durchführung der Untersuchungen wurden vier Klassenzimmer in jeder der drei Schulen mit einer modernen Mess- und Steuerungstechnik ausgestattet. Die an der Hochschule Karlsruhe entwickelte Technik sammelt Informationen zu Raumklima, Lichtverhältnissen, Energieverbrauch und Nutzerverhalten. Eines der vier Klassenzimmer in jeder Schule wurde zusätzlich mit einer automatischen Heizkörperregelung als nutzerunabhängige Regelung der Wärmeabgabe versehen. Der Einbau der messtechnischen Ausrüstung in die Klassenräume sowie die Auswertung und Analyse der erfassten Daten erfolgten in der Heizperiode 2004/05. Nach einer Diskussion über die aufschlussreichen Ergebnisse wurde die Messeinrichtung optimiert, und auch in der folgenden Heizperiode 2005/06 wurde die Datenerfassung vorgenommen. Die Auswertung der umfangreichen Daten konnte im Sommer 2006 abgeschlossen werden. Ziel des Projekts war es, genauere Erkenntnisse über die den Energieverbrauch beeinflussenden Faktoren zu gewinnen und Hinweise zu erhalten, wie in den Klassenräumen bei Sicherstellung einer akzeptablen Raumluftqualität der Energieverbrauch durch ein entsprechend optimiertes Nutzerverhalten reduziert werden kann. Hierbei sollten zunächst die Steuerungsparameter verbessert werden, mit denen der Energieverbrauch an Wärme und Strom vom Nutzer direkt beeinflusst werden kann – Thermostatstellung der Heizkörper, Fensterstellung und Betrieb der Beleuchtung. Aber auch indirekt beeinflussbare Parameter wie die Einstellung

der Vorlauftemperatur und die automatische Regelung der Heizkörper sollten optimiert werden, wobei die Maßnahmen jedoch nicht die Behaglichkeit beeinträchtigen dürfen. Kenntnisse zum Verlauf der Raumklima-, Luft- und Lichtverhältnisse, zu den Energieverbräuchen und den Auswirkungen des Nutzerverhaltens sind Voraussetzungen dafür, dass Systemoptimierungen herausgearbeitet werden können.

3. Mess- und Steuerungssystem

Hard- und Software

Die Mess- und Steuerungstechnik basiert auf einem 1-Wire-Bus-System, bestehend aus einem Messrechner, 1-Wire-Verkabelung, Mess- und Steuermodulen und diversen Sensoren für die kontinuierliche Erfassung der zentralen Größen wie Außen- und Raumlufttemperatur, Außen- und Raumluftfeuchte, Vor- und Rücklauftemperatur der Heizkörper, Fensteröffnungszustand, Raumbelugung und CO₂-Gehalt der Raumluft sowie Zählern für den Stromverbrauch in den Klassenzimmern. Je Schule wurden die Informationen von insgesamt 56 Sensoren minütlich abgerufen, bewertet und abgespeichert. Um die große Menge an Messdaten kontinuierlich abzurufen und sogleich auszuwerten, wurde an der Hochschule Karlsruhe eine Software entwickelt, die die entsprechende Steuerung des 1-Wire-Bussystems übernimmt. Über eine ISDN-Verbindung stehen die Daten jederzeit per Fernzugriff zur Verfügung. Zudem erlaubt diese eine Fernwartung sowie Pflege und Ergänzung der Software.

Sensoren

Für die Messung der Lufttemperaturen innen und außen sowie für Vor- und Rücklauftemperaturen der Heizkörper wurden Thermistoren eingesetzt. Die Erfassung der Fensterstellung erfolgte über Reed-Kontakte, die am feststehenden Rahmen befestigt und über ein zweidrahtiges Kabel mit dem Messmodul verbunden sind. Zur Erfassung der Raumbelugung kamen handelsübliche Bewegungsmelder zum Einsatz. Diese registrieren Veränderungen der Wärmestrahlung mit Hilfe pyroelektrischer Detektoren und reagieren auf Bewegung von Personen im überwachten Raum. Die Luftqualität stellt das von Lehrern und Schülern als individuell am stärksten empfundene Qualitätskriterium für die Raumluft dar. Zur Bewertung der Raumluftqualität wurden Feuchte- und CO₂-Sensoren eingesetzt. Der erfassbare Konzentrationsbereich der CO₂-Sensoren liegt zwischen 300 und 2.000 ppm bzw. 300 und 5.000 ppm.

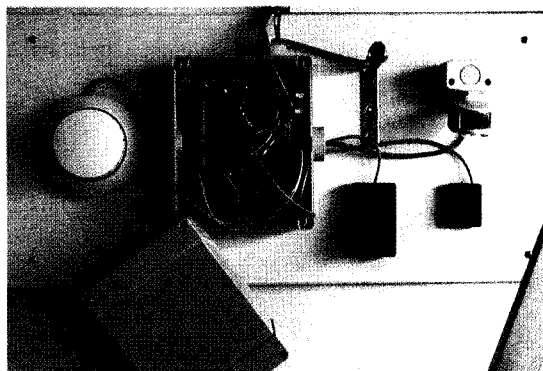


Abb. 1: Werkstoffplatte mit Sensoren, Mess- und Steuerungsmodulen

Automatische Heizkörperregelung

Die Heizkörper werden in jeweils einem Raum je Schule durch elektrische Stellventile kontrolliert angesteuert. Das Öffnen und Schließen des Ventils erfolgt in Abhängigkeit von der aktuellen Raumtemperatur, die mit der Soll-Temperatur verglichen wird. Folgender Steueralgorithmus wurde für alle drei Schulen der automatischen Regelung zugrunde gelegt: Von 7 bis 22 Uhr war die Soll-Temperatur auf 20 °C eingestellt, von 22 bis 7 Uhr und am Wochenende auf 17 °C. Überschreitet die Raumtemperatur den jeweiligen Sollwert, so wird das Ventil geschlossen. Als weiterer Steuerparameter wurde die Fensterstellung berücksichtigt: Sobald ein Fenster geöffnet ist, wird das Ventil geschlossen.

4. Auswertungsergebnisse

Die Auswirkungen der Faktoren Raumbelugung, Vorlauftemperatur und Thermostatstellung der Heizkörper auf die Raumlufttemperaturen und die Heizwärmeabgabe sowie die Auswirkungen der Lüftungsdauer auf die Kohlendioxidkonzentration in den untersuchten Räumen wurden analysiert. Die Messergebnisse lassen deutliche Tendenzen erkennen.

Anhand der ausgewerteten Daten sind große Differenzen bei den Heizwärmeabgaben sowie zum Teil sehr hohe Raumlufttemperaturen von nahezu 25 °C während des Unterrichts und 20 °C in der Nacht in den untersuchten Räumen festzustellen. Diese weisen auf große Energieeinsparpotenziale hin, die zum einen durch eine Reduzierung der Wärmeabgabe der Heizkörper und der Raumlufttemperatur durch niedrigere Vorlauftemperaturen inner- und außerhalb der Unterrichtszeiten bzw. einer niedrigeren Einstellung der Thermostate, zum anderen durch die automatische, raumtemperaturabhängige Regelung der Heizkörper

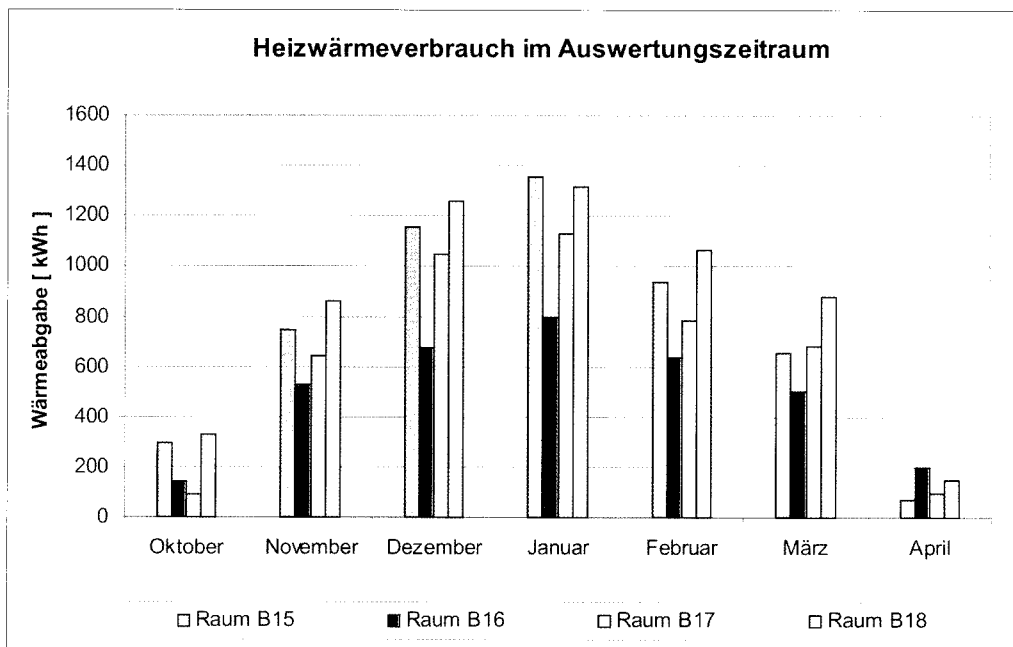


Abb. 2: Heizwärmeverbrauch in vier untersuchten Räumen

ausgeschöpft werden können. Im Klassenzimmer B16 der Hebel-Realschule, das mit einer solchen Regelung ausgestattet ist, wurde von November bis März die geringste Heizwärme benötigt, wie in Abbildung 2 dargestellt.

Die hohen Raumlufttemperaturen während des Unterrichts, die unter anderem auch aus dem Wärmeeintrag der sich im Raum befindlichen Personen resultieren, weisen ebenso auf eine unbehagliche Raumluftqualität hin wie die hohen Kohlendioxid-Konzentrationen, die den Grenzwert von 1.500 ppm fast immer übersteigen, wie Abbildung 3 verdeutlicht. Einige der

gemessenen Kohlendioxid-Werte haben diesen Grenzwert gar um das 2,5-fache überschritten. Werte in dieser Höhe führen zu Konzentrationsstörungen und zu einer verminderten Leistungsfähigkeit der im Raum befindlichen Personen.

Eine Verringerung der Kohlendioxid-Konzentration kann durch intensiveres Lüften erfolgen. Hierzu wurden Testreihen durchgeführt, um Erkenntnisse zu Lüftungsintensität und -intervallen zu erlangen, ohne die Heizwärmeabgabe negativ zu beeinflussen. Die Ergebnisse der Testreihen zeigen, dass durch kurzzeitiges Stoßlüften über die gesamten 5-Minuten-Pau-

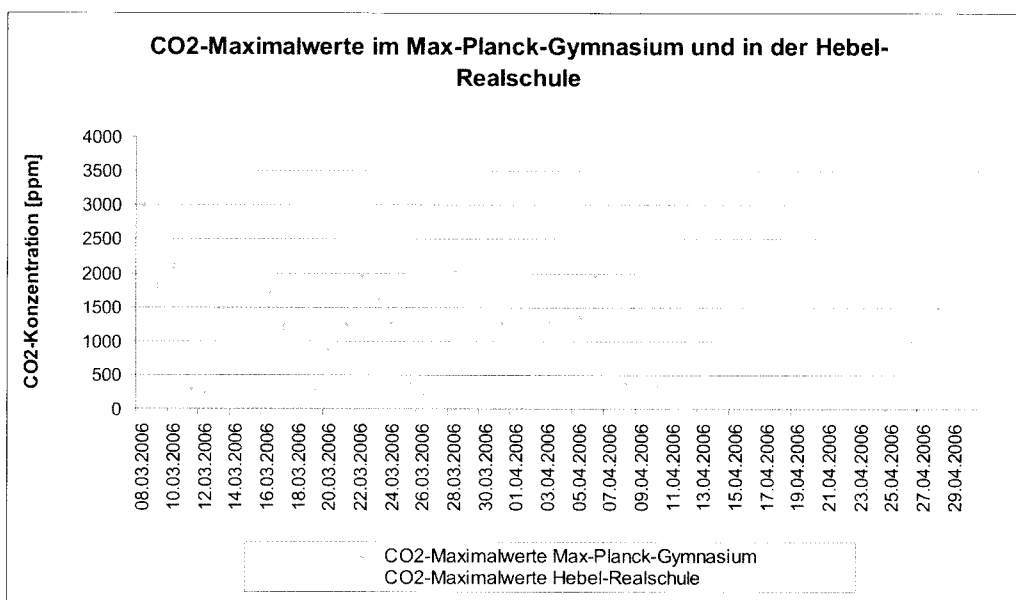


Abb. 3: CO₂-Maximalwerte an zwei Karlsruher Schulen

sen mit allen zur Verfügung stehenden Fenstern gute Effekte erzielt wurden, so dass die Kohlendioxid-Konzentration extrem und rapide abfällt, was in Abbildung 4 deutlich wird. Eine längere Lüftungsdauer hat auf die Reduktion der CO₂-Konzentration nur noch geringe Auswirkungen. Bis zum Ende der folgenden Unterrichtsstunde wird der Grenzwert wieder erreicht oder gar überschritten, weshalb es gegebenenfalls erforderlich sein kann, eine weitere Stoßlüftung während einer Unterrichtsstunde vorzunehmen, um eine behagliche Raumluft zu gewährleisten.

kontrollierte nutzungsabhängige Steuerung der Heizkörperventile erzielen.

Neben der Suche nach Lösungen zur Effizienzsteigerung des Energieeinsatzes in öffentlichen Gebäuden am Beispiel von Schulen konnten auch Fragen zur Raumluftqualität in Abhängigkeit von Fensterlüftung und Nutzung der Klassenräume analysiert werden. Hier zeigte sich, dass insbesondere in der Heizperiode auch während des Unterrichts eine Belüftung durch das Öffnen von Fenstern erforderlich ist, um ein Ansteigen des CO₂-Gehaltes über kritische

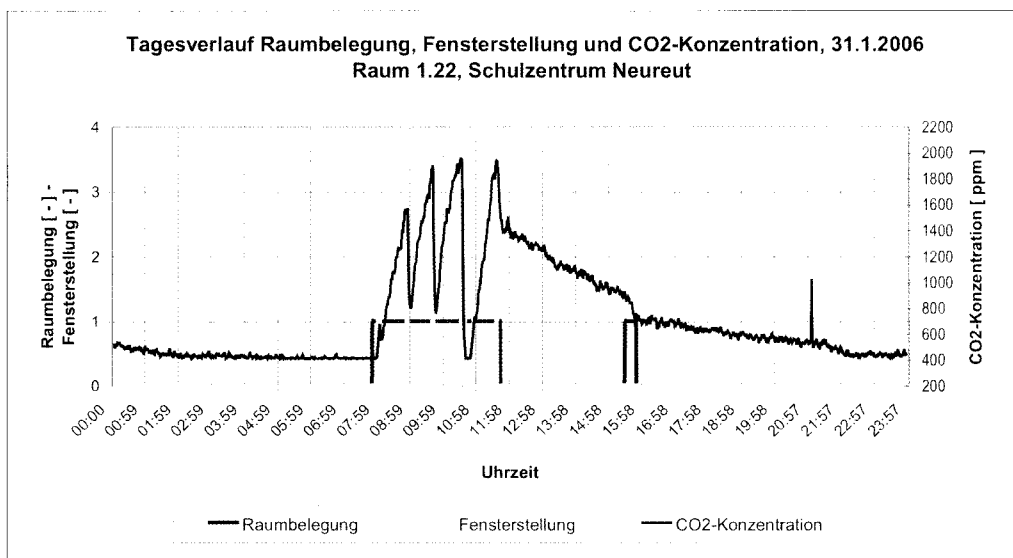


Abb. 4: Lüften in den Pausen

Diese Erkenntnisse werden nun in Form von konkreten Handlungsanweisungen an die untersuchten Schulen weitergegeben. Die installierte Technik bleibt weiterhin bestehen, um die ausgearbeiteten Empfehlungen und deren Umsetzung kontrollieren und bewerten zu können.

5. Zusammenfassung

In drei Schulen Karlsruhes wurden jeweils vier Klassenräume mit Messtechnik ausgestattet, um den Nutzereinfluss auf den Energieverbrauch zu analysieren. Zudem wurden je Schule die Heizkörper eines Klassenraums mit elektrischen Stellventilen versehen, um mittels der erfassten Temperatur- und Raumnutzungsverhältnisse rechnergestützt die Ventilsteuerung der Heizkörper zu optimieren und so den Heizwärmebedarf drastisch zu reduzieren.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass mit geeigneter Nutzermotivation der Energieverbrauch in Klassenräumen nachhaltig reduziert werden kann. Ein ganz erheblicher Einspareffekt lässt sich darüber hinaus durch eine

Schwellenwerte zu vermeiden. Zu empfehlen wäre folglich eine kontrollierte Belüftung mittels mechanischer Lüftungseinrichtung.

Fortführende Arbeiten sind angedacht, um die Ansteuerung von Stellventilen der Heizkörper wie auch von Systemen zur Raumbelüftung weiter zu optimieren. Der Energieeinsatz in öffentlichen Gebäuden kann so weiter minimiert und die Raumluftverhältnisse in Unterrichtsräumen verbessert werden.

Literatur

Bieber, H.; Emmerich, W; Garrecht, H. et al., *EnSan-Projekt Karlsruhe-Goerdelerstraße Integrale Sanierung auf Niedrigenergie-Standard unter Einschluss moderner Informations- und Regelungstechnik und Beeinflussung des Nutzerverhaltens*, FIA Forschungsbericht des BMWA und BMBF, ISBN 3-938210-04-4, 2004.

Garrecht, H; Wolfrum, K.; Pflaum, T.; Brecht, T., *Messtechnische Untersuchungen an Schulen zur Unterstützung eines energiebewussten Nutzerverhaltens*, Abschlussberichte der Projektphase I und II

im Auftrag der Stadt Karlsruhe, Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, 2005 und 2006.

Garrecht, H.; Huber, J., *Untersuchungen zum Einfluss der Heizungsregelung und des Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch in Mietwohnungen am Beispiel eines umfassend sanierten Wohnkomplexes*, Tagungsband „Gebäude verstehen-bewerten-verbessern“, TU Wien, 24.5.2004, S. 154-167.



Prof. Dr. rer. nat. Klaus Wolfrum

ist seit 1997 Mitglied der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik, wo er die Lehrgebiete Elektronik und Messtechnik vertritt. Seine Forschungsschwerpunkte sind Sensor-Applikationen, Sensor-Signalverarbeitung sowie die Entwicklung von Hard- und Software für messtechnische Anwendungen.



Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht

gehörte von 1998 bis 2006 der Fakultät für Architektur und Bauwesen an und beschäftigt sich in zahlreichen Forschungs- und Entwicklungsprojekten überwiegend mit bauphysikalischen, bautenschutztechnischen und baustoffkundlichen Fragestellungen. Zum Oktober 2006 wechselte er an die TU Darmstadt, leitet aber auch weiterhin in enger Kooperation mit seinem Kollegen Klaus Wolfrum die Arbeitsgruppe im Bereich Bauklimatik und Bausanierung am Institut für Angewandte Forschung (IAF) der Hochschule Karlsruhe.

Dipl.-Ing. Tilla Pflaum

absolvierte das Studium der Architektur an der Universität Karlsruhe und war von Januar 2001 bis Oktober 2006 Projektmitarbeiterin am Institut für Angewandte Forschung (IAF) der Hochschule Karlsruhe.

Dipl.-Ing. (FH) Tanja Brecht

schloss das Studium des Baubetriebs im Wintersemester 2005/06 ab und ist seit Juni 2006 Projektmitarbeiterin am Institut für Angewandte Forschung (IAF) der Hochschule Karlsruhe.