

„Die Zeit wird kommen, wo unsere Nachfahren sich wundern, da wir so offenbare Dinge nicht gewußt haben.“

Lucius Annaeus Seneca  
(4 v.Chr. - 65 n.Chr.)

## Energetische Selbsterkenntnis SolarBau Begleitforschung am Institutsgebäude des ZUB

Michael de Saldanha  
Christina Sager

Die Planung und Realisierung von Gebäuden mit niedrigstem Gesamtenergiebedarf ist eine wichtige aktuelle Herausforderung. Bei Gebäuden mit hohem energetischen Anspruch stehen die Einzelaspekte des Energiekonzepts mit dem architektonischen Entwurf und den Bedürfnissen des Nutzers in dynamischer Wechselwirkung. Die Aufgabe der Forschung besteht darin, die Zusammenhänge aufzuzeigen, und Architekten und Ingenieuren Planungshinweise zu geben. Das Forschungs- und Demonstrationsgebäude des ZUB bietet ideale Voraussetzungen, um diese Fragen zu bearbeiten. Der Forscher tritt im ZUB als Planer, Prüfer und Nutzer in einer Person auf. Die detaillierte Gebäudevermessung

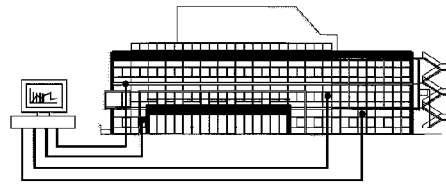
bietet die Möglichkeit, Fragen die sich während der Planungs- und Bauphase ergeben zu beantworten. Das Wechselspiel zwischen der Anlagentechnik und dem Gebäude wird nachvollziehbar. Berechnungen und Simulationen bilden zusammen mit den umfangreichen Meßdaten eine solide Basis für energetische Abschätzungen für künftige Projekte. Auch subjektive Größen wie psychisches Befinden und Behaglichkeit, die normalerweise nur schwer erfaßbar sind, können in diesem Fall quantifiziert werden. Das ZUB stellt damit ein vielseitiges Forschungsobjekt dar, welches Erkenntnisse über komplexe Systemzusammenhänge und Wechselwirkungen liefern kann.

## Themen und Methoden

In den Bereichen Gebäudelüftung, Raumkonditionierung über Bauteile, Tageslichtnutzung, sommerliches Wärmeverhalten und dem Zusammenwirken dieser Einzelaspekte im Gesamtsystem sind zur Zeit noch viele Fragen offen. Im Rahmen des Förderprogramms "Solar optimiertes Bauen" des BMWi wird das ZUB als Prototyp-Gebäude gefördert. Im Teilkonzept 3 des Programms "Solar optimierte Gebäude mit minimalem Energiebedarf" bietet sich die Möglichkeit, eine Vielzahl dieser aktuellen Fragestellungen zu bearbeiten. Als Demonstrationsbauvorhaben wird das Gebäude über vier Jahre detailliert vermessen und dokumentiert. Um eine ganzheitliche Betrachtungsweise zu erreichen, sind folgende Forschungsmethoden vorgesehen:

### Vermessung des Gesamtgebäudes

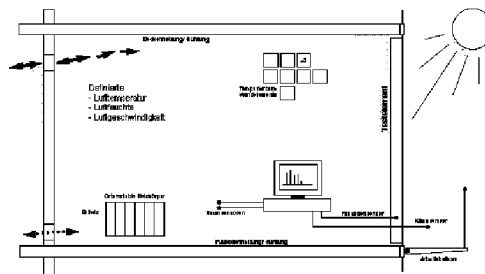
Das Gebäude wird in seinem Gesamtzusammenhang vermessen und analysiert. Die Wechselwirkungen der Einzelkomponenten des Gesamtsystems werden in Bezug auf Energieverbrauch, Synergieeffekte und Nutzerfreundlichkeit ausgewertet.



Die Vermessung des Gesamtgebäudes liefert Daten zu Systemzusammenhängen.

### Einzelraumuntersuchungen

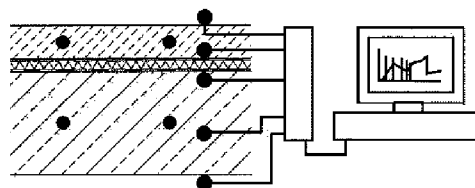
Um Behaglichkeitsaspekte und die Wechselwirkungen der Wärmeübergabe mit der Lüftung genau untersuchen zu können, werden Einzelräume detailliert vermessen. Fragen zu Tages- und Kunstlicht und die Auswirkung auf das sommerliche Verhalten werden ebenfalls untersucht. Der Forscher ist in diesem Fall gleichzeitig Nutzer der Testräume.



Einzelraumuntersuchungen erfassen raumklimatische Aspekte im Detail.

### Detailmessungen

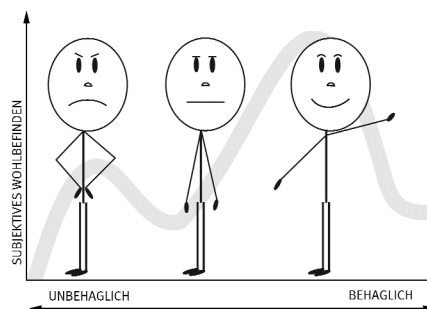
Detailaspekte, wie Luftströmungen im Raum oder das thermische Verhalten von Bauteilheizungen, die für die Gesamtzusammenhänge von Interesse sind, werden intensiv analysiert.



Detailuntersuchungen beantworten Fragen zu Einzelkomponenten.

### Nutzerbefragungen

Um subjektive Größen und weiche Faktoren zu quantifizieren, werden am ZUB und an Referenzbauten Nutzerbefragungen durchgeführt. Wohlbefinden, individuelle Komfortanforderungen und Nutzerverhalten werden auf diese Weise erfaßt.



Nutzerbefragungen dienen der Erfassung subjektiver Größen.

## Forschungsfelder

Die Wechselwirkungen, die sich innerhalb des Gebäudes zwischen den verschiedenen Gebäude- und Anlagenkomponenten sowie durch den Nutzereinfluß ergeben, lassen sich in zahlreiche Fragestellungen aufgliedern. Diese werden als Einzelaspekte bearbeitet und bilden die Basis zum Verständnis des Gesamtsystems.

### Bauteilheizung /-kühlung

Unter welchen Voraussetzungen kann eine Bauteilheizung /-kühlung eingesetzt werden. Welche Konsequenzen ergeben sich für die Nutzung und inwieweit muß der Entwurf darauf abgestimmt sein. Ist eine behagliche Zuluft einbringung über die Fassade möglich. Sollen Bauteilheizungen in die tragenden Bauteile integriert werden und welche Konsequenzen ergeben sich daraus für den Bauprozess. Inwieweit ergeben sich Probleme mit dem Trittschall. Welche Regelstrategien sind sinnvoll und wie ist das Zusammenspiel mit dem Wärmeerzeuger. Kann eine Einzelraumregelung realisiert werden. Welche Besonderheiten ergeben sich, wenn die Bauteilheizung auch zur Kühlung verwendet werden soll.

### Gebäudelüftung

Welchen Einfluß haben verschiedene Lüftungskonzepte auf die Luftqualität. Für welche Anwendungsfälle sind die jeweiligen Konzepte geeignet, welche Folgen ergeben sich für die Anlagen- und Installationstechnik und welche Wechselwirkungen bestehen mit dem Gebäudeentwurf. Wie wirken sich die verschiedenen Lüftungskonzepte auf den Energiebedarf aus. Welche Auswirkungen ergeben sich für die Anlagentechnik, die Nutzung und den Energieverbrauch durch die Zuluftführung über ein Atrium. Wie können Lüftungsanlage und natürliche Lüftung zusammenwirken und wie kann das Lüftungskonzept das sommerliche Verhalten verbessern. Wie groß ist der Anteil der Antriebsenergie und inwieweit können Wind und thermischer Auftrieb die Lüftung unterstützen.

### Sommerliches Wärmeverhalten

Wie können die sommerlichen Wärmelasten vom Gebäude abgehalten werden, ohne die Tageslichtversorgung zu beeinträchtigen. Welche konstruktiven und architektonischen Konsequenzen ergeben sich bei der Nachtlüftung. Wie ist die optimale Kombination aus Bauteilkühlung und der Kühlung über Luft. Welche Kühlpotentiale können durch die Rückkühlung über die Sohlplatte erschlossen werden. Welche Antriebsenergien ergeben sich für die jeweiligen Systeme. Wie können Wind und thermischer Auftrieb zur Verbesserung des sommerlichen Verhaltens beitragen.

### Tageslichtnutzung

Wie groß ist das energetische Einsparpotential durch Lichtlenkung und inwieweit wird das sommerliche Verhalten beeinflusst. Wie verändern sich die visuellen Komfortkriterien Blendung, Kontraste, Lichteinfall und Reflexionen. Können die Anforderungen für Bildschirmarbeitsplätze erfüllt werden. Welche Veränderungen müssen an der künstlichen Beleuchtung vorgenommen werden, insbesondere welche Beleuchtungskonzepte und Regelstrategien sind für das Zusammenwirken mit Tageslichtsystemen geeignet. Wie können Tageslichtsysteme architektonisch integriert werden und wie muß die Konstruktion für die unterschiedlichen Orientierungen sein. Sind kontinuierlich oder saisonal nachgeführte Systeme besonders vorteilhaft.

Die nachfolgende Übersicht stellt die Fragestellungen nochmals im Überblick dar. Als weiterer Schritt wurden daraus die erforderlichen Meßstellen abgeleitet. Einige der Themen werden exemplarisch anhand von intensiv vermessenen Einzelräumen behandelt. Viele Fragen betreffen jedoch größere Zusammenhänge und Systeminteraktionen und erfordern die Anordnung einer Vielzahl von Meßpunkten im gesamten Gebäude.

## Aktuelle Fragestellungen im Bereich des energieoptimierten Bauens

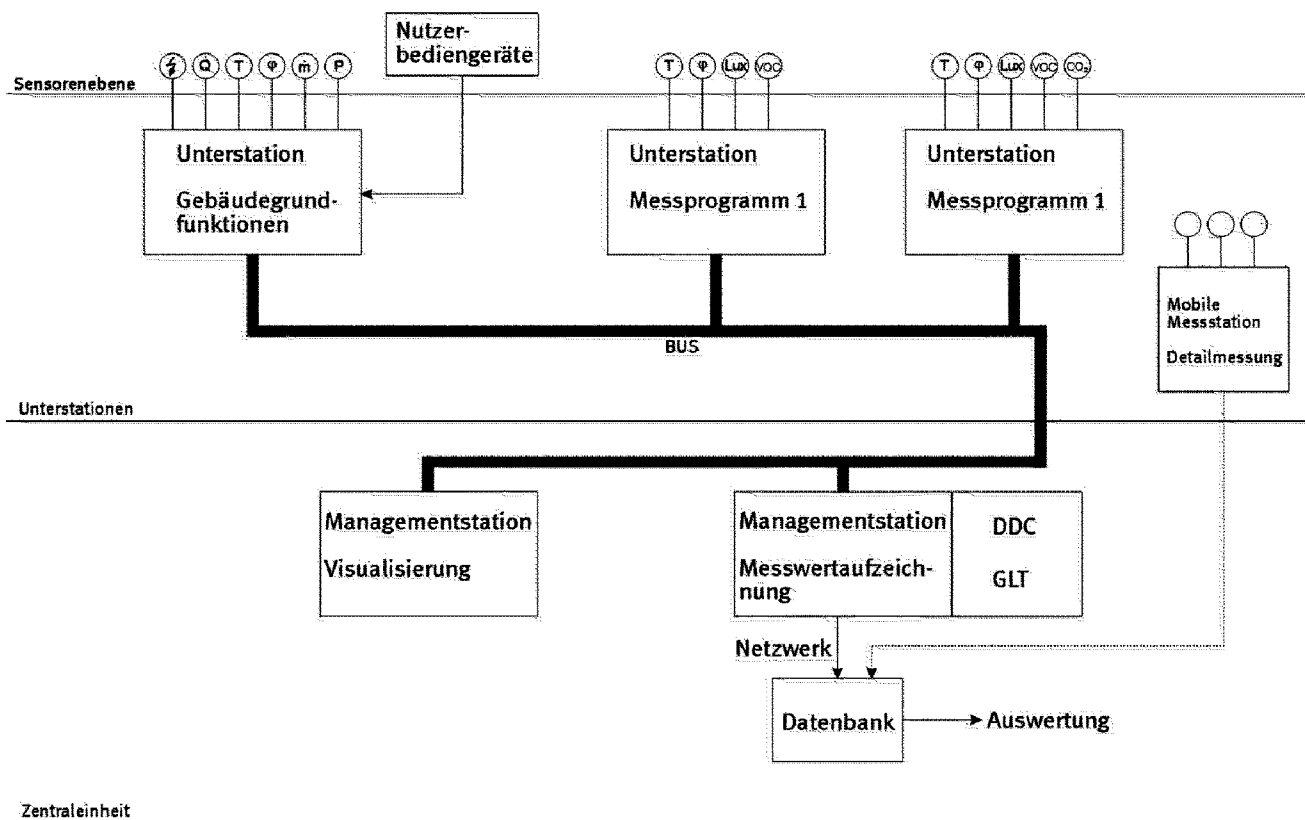
1. Bauteilheizung / -kühlung	2. Lüftung	3. Sommerliches Verhalten	4. Licht	5. Gesamtsystem Gebäude	6. Interaktion mit dem Nutzer
1.1 Therm oaktive Decke	2.1 Mechanische Lüftung	3.1 Verschattung	4.1 Tageslichtnutzung	5.1 Energieverbrauch	6.1 Behaglichkeit
Quantifizierung der Heiz- und Kühlpotentiale des Systems	Lufthygienische Auswirkungen bei mechanischer Lüftung	Optimale Verschattung ohne Beeinträchtigung der Tageslichtversorgung	Einfluß verbesserter Tageslichtnutzung (Lichtlenkung) auf den Energieverbrauch	Energieströme im Gebäude lastverhalten	Themische Behaglichkeit
Einfluß des Heizsystems und der Regelstrategie auf den Energieverbrauch	Energetische und lufthygienische Auswirkungen bei der Lüftung über die Gebäudestruktur (Ätium)	Welche Potentiale bieten thermoisolierte und elektrochrome Gläser	Einfluß auf das sommerliche Verhalten	Spitzenleistung	Visuelle Behaglichkeit
Regelstrategien für TAD (Selbstregelung, Einzelraumregelung, Zonenregelung)	Potentiale zur Sicherung der Luftqualität durch sensor-gesteuerte Lüftung (CO <sub>2</sub> -Steuerung) im Büro- und Hilfsaalbereich	Regelstrategien zur Gebäudewärtschattung	Einfluß auf die psychische Behaglichkeit	Einfluß der Regelstrategien	Bandbreite von subjektiven Behaglichkeitskriterien
1.2 Fußbodenheizung / -kühlung	Kombinationsmöglichkeiten mechanische / natürliche Lüftung	Möglichkeiten der innenliegenden Verschattung	Einfluß auf Komfortkriterien (Blendung, Kontraste, Reflexionen)	Einsparpotentiale durch Energiemanagementsysteme	Wechs elwirkungen mit dem individuellen Wohlbefinden
Quantifizierung der Heiz- und Kühlpotentiale des Systems	Quantifizierung der Antriebsenergien	3.2 Nachtlüftung	Interaktion mit der künstlichen Beleuchtung	Auswirkungen des Lüftungs konzeptes auf den Energieverbrauch	6.2 Sensitivität
Einfluß des Heizsystems und der Regelstrategie auf den Energieverbrauch	Wie groß sind die Kühlpotentiale durch Nachtlüftung (Fensterlüftung, natürlicher Auftrieb, Wind)	Quantifizierung der Kühlpotentiale durch Nachtlüftung	4.2 Beleuchtung	Auswirkungen des Heiz- / Kühlkonzeptes auf den Energieverbrauch	Auswirkungen von Regelungs-toleranzen durch Gebäudetätigkeit auf die Behaglichkeit
Einfluß auf die Behaglichkeit im Kühlbetrieb	2.2 Natürliche Lüftung	Quantifizierung der Hilfsenergien bei mechanischer Nachtlüftung	Einflussungspotentiale durch ta geslichtabhängige Beleuchtungssteuerung	5.2 System interaktionen	* Robustheit* der Gebäudetechnik gegenüber Fehlbedienung
1.3 Allgemein	Behagliche Zuluft einbringung über die Fassade (Anordnung / Aus bildung von Zuluftöffnungen)	Optimierung der Regelstrategien	Positionierung der Sensoren	6.3 Schnittstelle Mensch-Technik	Möglichkeiten zur individuellen Anpassung der Raumverhältnisse
Vergleichende Systemanalyse für Bauteilheizung / -kühlung in Bezug auf Leistungspotentiale und Behaglichkeit	Möglichkeiten der gesteuerten Stoßlüftung (Nutzerverhalten)	3.3 Sohlplattenkühlung	Optimierung der Regelstrategien	Wechs elwirkung interne Lasten / Bauteilheizung	Äkzeptanz von automatisierten Regelstrategien
Analys e von Leistungsverläufen und Systemtemperaturen	Nutzung von Wind und thermischem Auftrieb für die natürliche Lüftung	Welche Leistungs-potentiale bietet die Sohlplattenkühlung	Analyse der stand-by Verluste	Wechs elwirkung Lüftung / Bauteilheizung	Auswirkungen einer kombinierten Regelung manuell / automatisiert
Einfluß des Nutzerverhaltens bei den verschiedenen Regelstrategien (individuelle Behaglichkeit, Eingriffs-möglichkeiten)	2.3 Wärm erückgewinnung	Vergleich Sohlplattenkühlung / natürliche Rückkühlung	Nutzerabhängige Größen	Potentiale zur Regelung des Gebäudes durch Nutzereinfluß (interaktive Gebäudetechnik)	Möglichkeiten des interaktiven Nutzereingriffs auf die Regeltechnik
	Einsparpotentiale				Entwicklung von intuitiven Schnittstellen
	Quantifizierung der Hilfsenergien				
	Einfluß auf die Luftqualität				

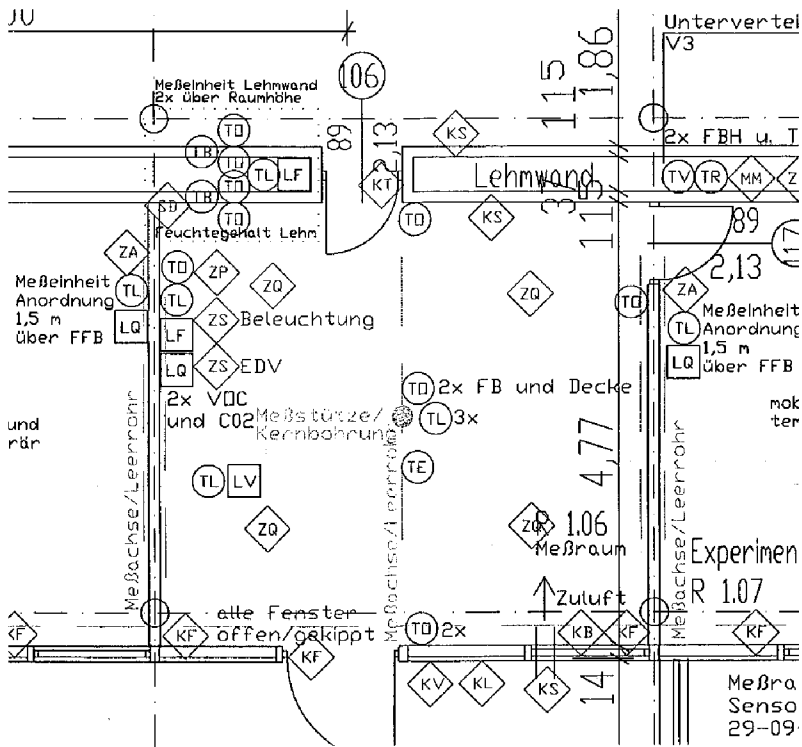
## Meßkonzept

Die Erfassung der Meßwerte erfolgt über Unterstationen, in denen die Meßdaten der zugehörigen Sensoren zusammenlaufen. Zusätzlich zu den stationären Datenpunkten kommen mobile Unterstationen für temporäre Messungen zum Einsatz. Alle an den Unterstationen gesammelten Daten werden über eine Busleitung an den Zentralrechner weitergeleitet. Als Leitstation liefert er die Daten an die Datenbank. Mittels Online-Darstellung können die erfaßten Meßdaten direkt nachvollzogen werden. Die teilweise Anzeige der Daten in Sensornähe dient zur Überprüfung der Systeme. Auf die Steuer- und Regelprozesse kann über den Zentralrechner direkt Einfluß genommen werden. Ein zentraler Datenserver stellt die erfaßten Meßdaten

gegliedert und auswertungsbezogen zur Verfügung. Die Datenauswertung kann bereits während der Meßphase beginnen. Von ihren Arbeitsplatzrechnern aus können die am Forschungsprojekt Beteiligten auf die zentrale Meßdatenbank zugreifen. Auf diese Weise wird eine rasche und interdisziplinäre Auswertung der Ergebnisse erreicht.

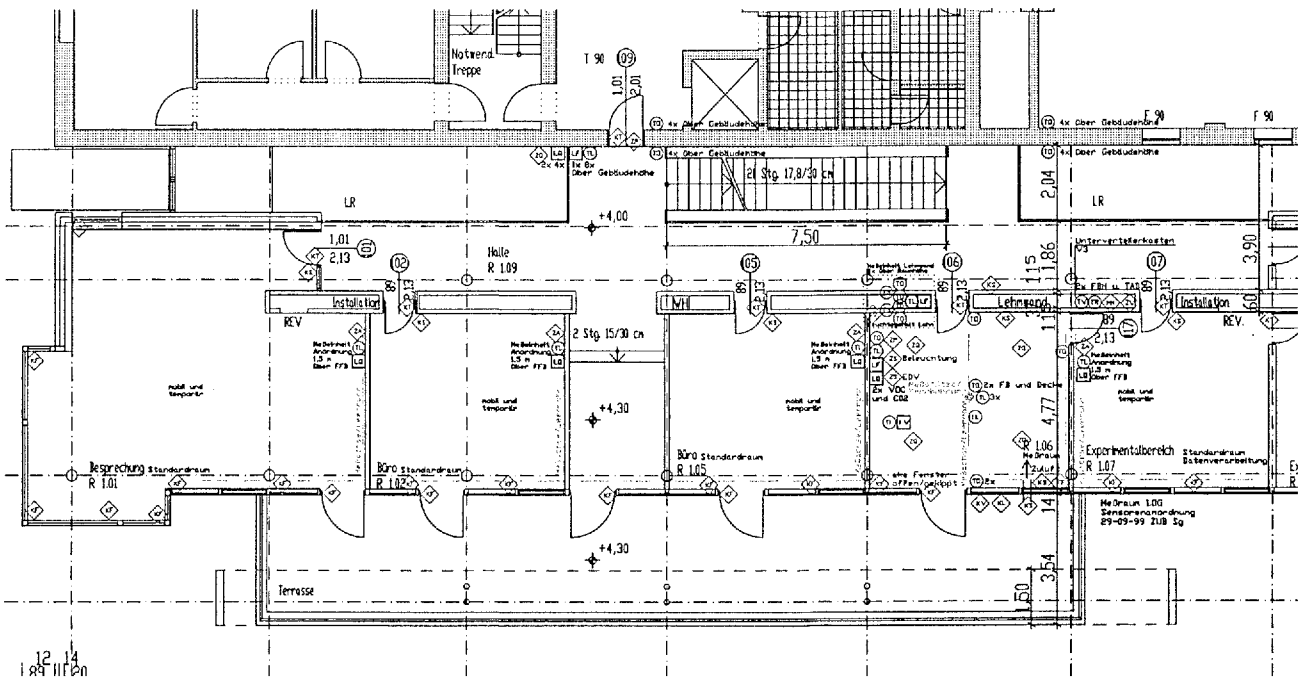
Zur Erfassung von Umwelt- und Wetterdaten wird auf die bestehende Anlage des Fachgebietes Bauphysik zurückgegriffen. Diese Wetterstation befindet sich auf einem Versuchsgebäude unmittelbar neben dem ZUB. Das begehbare Flachdach des ZUB bietet zusätzliche Außenflächen für Versuchsaufbauten und Meßstationen.





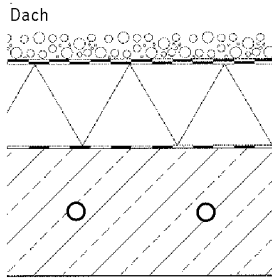
Sensoren		Anzahl
Oberflächentemperatur	TO	50
Empfindungstemperatur	TE	6
Bauteiltemperatur	TB	139
Lufttemperatur	TL	106
Vorlauftemperatur	TV	9
Rücklauftemperatur	TR	9
Luftvolumenstrom	LV	7
Luftqualität	LQ	24
Luftfeuchte	LF	22
Beleuchtungsstärke	BS	26
Wärmemengenzähler	ZW	5
Stromzähler	ZS	19
Massenstromzähler	MM	10
Wärmestromzähler	ZQ	6
Personenzähler	ZP	13
Anwesenheitszähler	ZA	12
Türkontakt	KT	21
Fensterkontakt	KF	108
Schaltkontakt	KS	18
Blendschutzkontakt	KB	2
Lichtlenkungskontakt	KL	2
Verschattungskontakt	KV	2
Sonstiger Datenpunkt	SD	13
Summe		629

Meßraum 1. OG

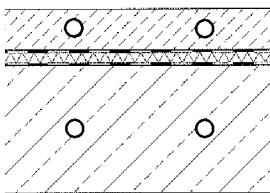


Sensorenplan Erdgeschoß

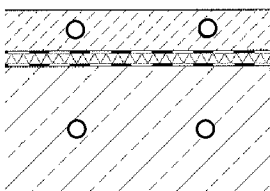
## Forschungsfeld Bauteilheizung /-kühlung



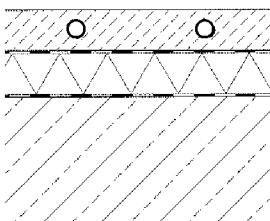
2. Obergeschoß



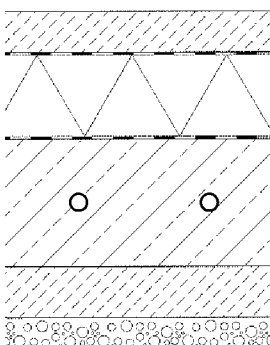
1. Obergeschoß



Erdgeschoß



Kellergeschoß



Sohlplatte

Systemschnitt durch das Bauteilheizsystem des ZUB

rechts: Funktionsweise der Bauteilheizung im Raum

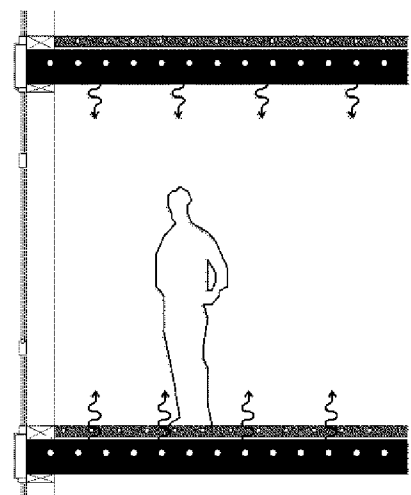
Durch den reduzierten Heizwärmebedarf von Neubauten werden Bauteilheizsysteme zunehmend interessant. Die niedrigen Systemtemperaturen ermöglichen den Einsatz von ressourcensparenden Wärmequellen, wie Wärmepumpen oder Solarkollektoren. Zudem kann der Sommer- und Winterfall mit einem System abgedeckt werden, wodurch sich Kosteneinsparpotentiale erschließen lassen. Bei der Bauteilheizung /-kühlung gibt es neben der Wandheizung drei prinzipielle Verfahren: Die Temperierung des Estrichs bei thermischer Abkopplung (Trittschalldämmung) von der Betonkonstruktion (Fußbodenheizung), die Temperierung der Geschoßdeckenunterseite (Heiz- bzw. Kühldecke) sowie die Temperierung des gesamten Deckenaufbaus ohne thermische Einschränkung nach oben oder unten (Thermoaktive Decke).

Ist die temperierte Schicht thermisch an die massiven Bauteile der Konstruktion angekoppelt, so kann die zusätzlich akti-

vierte Masse zur thermischen Phasenverschiebung genutzt werden. Die Speichermassen können dann bei günstigen Randbedingungen aktiv "beladen" werden und bilden einen Wärmepuffer. Die zeitliche Dynamik der Energieaufnahme und Auskühlung des Raumes wird gedämpft. Im Kühlfall kann die nächtliche Rückkühlung der Speichermassen das Raumklima an heißen Sommertagen erheblich verbessern.

Folgende Fragen ergeben sich im Zusammenhang mit der Bauteilaktivierung:

- Welche Auswirkungen ergeben sich auf den Energieverbrauch des Gebäudes?
- Wie ist der Einfluß auf die Behaglichkeit?
- Wie groß sind die Heiz-/ Kühlpotentiale?
- Wie ist die optimale Regelstrategie für Bauteilheizungen?
- Welche Ansätze ergeben sich für die Einzelraumregelung?
- Welche Wechselwirkungen ergeben sich mit der Zuluftführung und dem Kaltluftabfall an der Fassade?

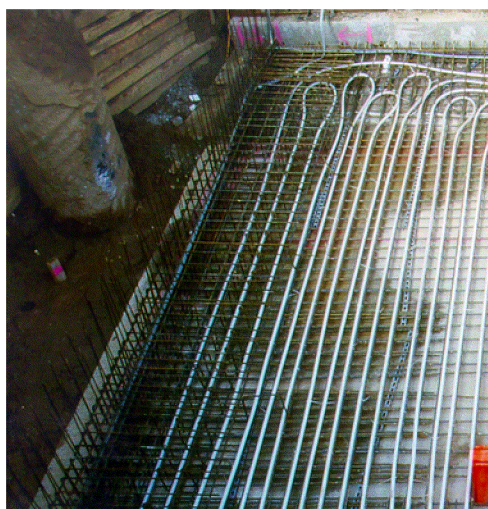


Um die komplexen thermischen Vorgänge der Bauteilerwärmung bzw. -auskühlung detailliert erfassen zu können, wurden bereits während der Bauphase eine Vielzahl von Sensoren in allen Gebäudebereichen direkt in die Betondecken eingegossen. So können die Temperaturverläufe innerhalb der Decken erfaßt werden sobald das Heizsystem in Betrieb geht. Auf diese Weise lassen sich auch Fragen der thermischen Phasenverschiebung durch massive Bauteile quantifizieren. Die energetischen Einsparpotentiale durch Solargewinne bzw. die nächtliche Auskühlung der Speichermassen können in verschiedenen Betriebsvarianten untersucht werden. Im Zusammenhang mit dem sommerlichen Verhalten ist besonders die Wärmeübergabe der Sohlplatte an das Erdreich interessant. Entsprechende Sensoren wurden in die Bodenplatte eingebaut. Die Wärmeverteilung innerhalb des Erdreichs wird durch dreidimensional angeordnete Sensorenfelder ermittelt. Auf diese Weise werden die Wärmeableitungsfähigkeit des Erdreichs sowie "Ermüdungseffekte" analysiert. Innerhalb der intensiv vermessenen Testräume können durch Sensorenraster und zusätzliche Wärmeflußmesser die Wärmeübergabe des Systems sowie die Temperaturschichtungen im Raum ermittelt werden. Damit lassen sich vorab durchgeführte Prognosen und Simulationen in der

Praxis überprüfen. Eventuell auftretende unbehagliche Betriebszustände werden quantifiziert und durch entsprechende Änderungen der Betriebsweise ausgeregelt. Dabei stellt der Forscher zugleich die Testperson dar, da er seinen eigenen Arbeitsraum im Selbstversuch untersucht. Die Intervalle zwischen dem Auftreten der Unbehaglichkeiten, der Anpassung der Betriebsweise und der Rückkopplung durch Überprüfung und Messdatenauswertung sind auf diese Weise sehr kurz. Variation und Anpassungen der Regelstrategien sind unmittelbar möglich. Dazu trägt die Möglichkeit der raumweisen Regelung der Heizkreise bei. Um spezielle Untersuchungen durchzuführen, ist es möglich, die Testräume zeitweise von der allgemeinen Betriebsweise des Gebäudes abzukoppeln.

Mögliche Betriebsweisen im ZUB:

- Klassische Fußbodenheizung bzw. Fußbodenkühlung, TAD außer Betrieb.
- Deckenheizung bzw. Deckenkühlung, Fußbodenheizung außer Betrieb.
- TAD mit symetrischer Wärmeabgabe bzw. Wärmeableitung zur Simulation ober- und unterseitig freiliegender Speichermassen.
- TAD mit asymmetrischer Wärmeabgabe bzw. Wärmeableitung zur Simulation von Hohlraumböden und Dämmschichten.



links: Detailaufnahme bei der Verlegung der Sensoren

rechts: Rohrschlangen der thermoaktiven Decke



## Forschungsfeld mechanische Lüftung

Um einen möglichst geringen Heizenergieverbrauch zu erreichen, ist eine kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung notwendig. Die mechanische Lüftung ist allerdings, insbesondere durch das "sick-building-syndrom" in die Diskussion gekommen. Aus diesem Grund werden Lüftungskonzepte realisiert, bei denen die Zuluft möglichst nicht kanalführt in die Räume gebracht wird. Neben der Zuluftnachströmung über die Fassade, werden auch die immer häufiger realisierten Atrien, Wintergärten und Doppelfassaden zur Zuluftführung genutzt. Die sensorgesteuerte Luftwechselanpassung und die Kombination von Lüftungsanlagen mit Bauteilheizungen sind ebenfalls interessante Arbeitsfelder.

Folgende Fragestellungen sind im Bereich der mechanischen Lüftung aktuell:

- Wie wirken sich die unterschiedlichen Lüftungskonzepte auf den Energieverbrauch aus?
- Welche Einsparpotentiale lassen sich durch eine sensorgesteuerte Regelung des Luftwechsels erschließen?

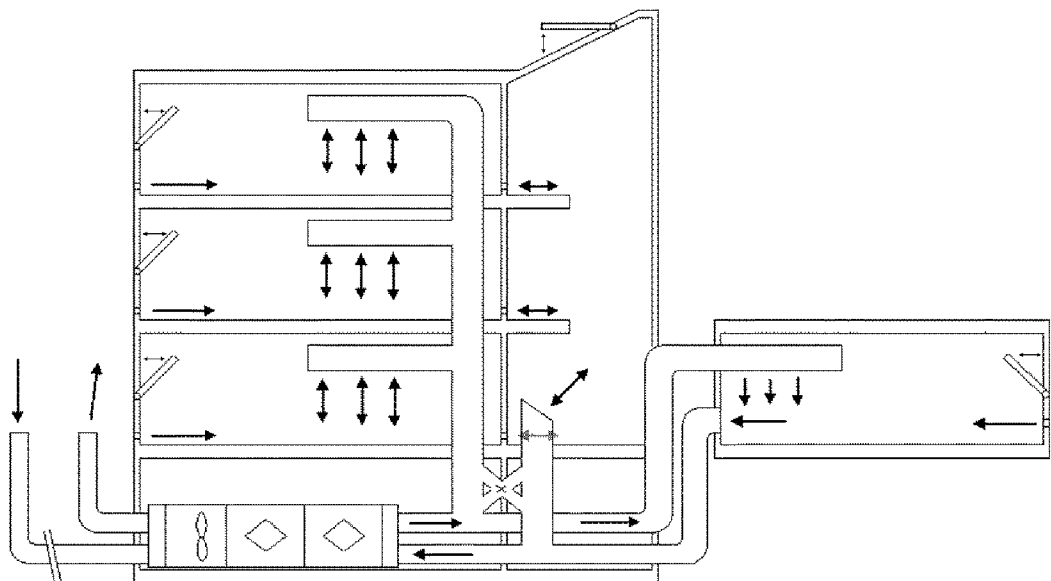
- Wie kann die Zuluft behaglich in den Raum eingebracht werden?
- Welche Auswirkungen haben die jeweiligen Lüftungskonzepte auf die Luftqualität?
- Welche Rahmenbedingungen ermöglichen die Luftführung über Gebäudeabschnitte wie Atrien, Doppelfassaden, Wintergärten?
- Wie kann die mechanische Lüftung mit natürlicher Lüftung kombiniert werden?
- Wie groß ist der Anteil der Antriebsenergie im Verhältnis zum Wärmerückgewinnungsgrad?

### Wärmerückgewinnung

Im Zusammenhang mit der Wärmerückgewinnung aus Abluft sind insbesondere Fragen der erreichbaren Einsparpotentiale an Wärmeenergie von Interesse. Dabei sind die erforderlichen Hilfsenergien zu berücksichtigen. Auch der Einfluß der Wärmetauscher auf die Luftqualität muß in Bezug auf das subjektive Empfinden der Nutzer betrachtet werden.

Lüftungsschema des ZUB

Die kreuzweise Verbindung der Lüftungskanäle erlaubt eine vollständige Änderung der Betriebsweise. Die Strömungsrichtung im Kanalsystem kann gedreht werden, so daß sich optional eine Zu- oder Abluftanlage ergibt. Die Belüftung der Büros erfolgt im Abluftbetrieb (Regel-fall) durch Überströmöffnungen aus dem Atrium bzw. Fassadenöffnungen. Der Vortragsraum verfügt über eine separate Zu- und Abluftführung.



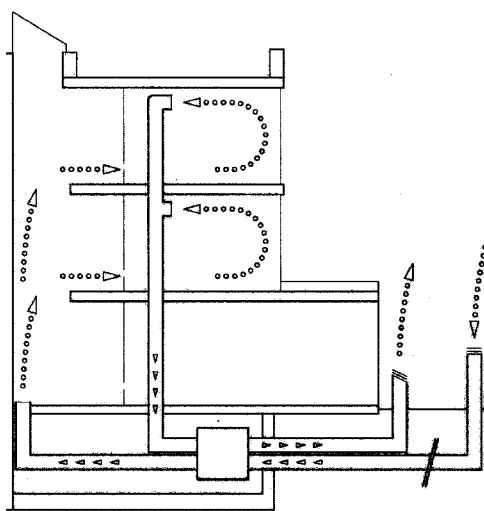
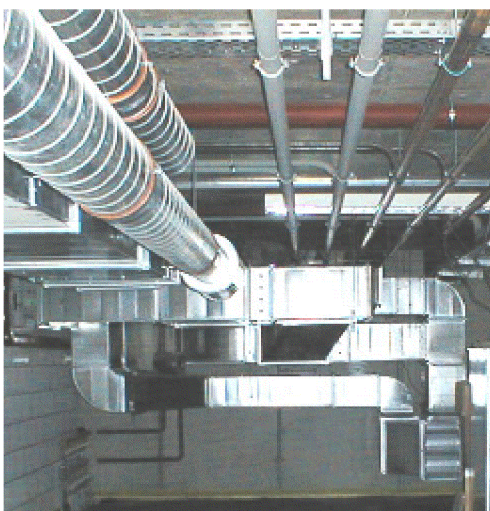
Kernstück der Lüftungsanlage ist das Lüftungsgerät mit den Ventilatoren, Filtern und Wärmetauschern. Eine Vielzahl von Sensoren erfassen kontinuierlich Temperaturen und Volumenströme. Um die Vorgänge auch für Besucher transparent zu gestalten, werden die wichtigsten Meßdaten direkt am Gerät ablesbar dargestellt. Auf diese Weise soll erreicht werden, daß auch Anlagenteile, die normalerweise in unzugänglichen Kellerräumen untergebracht sind, für den Besucher zum nachvollziehbaren Teil des Gesamtkonzeptes werden.

Für die Gesamtenergiebilanz des Gebäudes sind insbesondere bei einem hohen Wärmedämmstandard die Lüftungswärmeverluste von relevanter Bedeutung. Dabei spielen sowohl die erreichten Wirkungsgrade der Wärmerückgewinnung als auch die Luftführung durch das Atrium bzw. die Zuluftnachströmung über die Fassade eine entscheidende Rolle. Um in diesem Zusammenhang zu weiterführenden Erkenntnissen zu gelangen, werden die Lufttemperaturen sowohl an den Luftaustrittsöffnungen im Atrium sowie an verschiedenen Überströmöffnungen zu den Büroräumen erfaßt. Auch die Temperaturschichtung, die sich innerhalb des Luftraumes im Atrium

einstellt, wird ermittelt. Im Zusammenhang mit der Zuluft einbringung über die Fassade stellen sich bei geringen Außentemperaturen Fragen zur behaglichen Zuluft einbringung in die Büroräume. Die umfangreich mit Sensoren ausgestatteten Versuchsräume bieten vielfältige Möglichkeiten, die Wechselwirkungen zwischen Zuluft einbringung in den Raum und die sich einstellenden Temperaturschichtungen sowie die Empfindungstemperaturen zu erfassen. Dabei können mehrere alternative Lüftungsvarianten untersucht werden. Auch für den zeitweise dicht belegten Veranstaltungsraum stellt sich die Frage nach dem günstigsten Lüftungskonzept. Mit möglichst geringem Energieaufwand muß hier für unterschiedliche Belegungsdichten eine gute Luftqualität sichergestellt werden.

Mögliche Betriebsweisen im ZUB:

- Abluftbetrieb mit Zuluft nachströmung über das Atrium und Überströmöffnungen, Wärmerückgewinnung.
- Zuluftbetrieb in die Büroräume, Abluft aus dem Atrium, Wärmerückgewinnung.
- Freie Fensterlüftung, Lüftungsanlage außer Betrieb.
- Abluftbetrieb mit Fensterlüftung, sommerliche Nachtauskühlung.



links: Lüftungszentrale im ZUB

rechts: Zuluftführung über Atrium und Überströmöffnungen

## Forschungsfeld freie Lüftung

Aufgrund der Verschlechterung der Luftqualität bei mechanischen Lüftungsanlagen, wird versucht, Räume über möglichst lange Zeiträume des Jahres natürlich zu belüften. In Bürogebäuden ist die Frage der natürlichen Lüftung besonders aktuell. Bei überwiegend freier Fensterlüftung fällt darüberhinaus kaum Antriebsenergie für die Lüftungsgeräte an. Auch das sommerliche Verhalten läßt sich durch freie Lüftung verbessern. Die tieferen nächtlichen Außenlufttemperaturen werden zur Entladung der Speichermassen genutzt. Bei hohen Außenlufttemperaturen birgt die freie Lüftung die Gefahr von erhöhten Wärmeeinträgen, falls die Nutzer ihre Fenster zu lange öffnen. Hier gilt es, die Nutzer in die Konzeption mit einzubeziehen. Neue Einsatzgebiete sind die natürliche Belüftung von dichtbelegten Aufenthaltsräumen (z.B. Vortrags- und Seminarräume). Hier bieten Konzepte der sensorgesteuerten Stoßlüftung neue Ansatzpunkte. Ein häufig auftretendes Problem bei natürlicher Lüftung liegt in der behaglichen Zuluftbringung im Winter. Konzepte der Vorwärmung der Aussenluft in Pufferzonen wie Atrien oder Doppelfassaden müssen dem Ansatz der lokalen Nacherwärmung durch "Miniradiatoren" oder der Luftvermischung über Leitkanäle gegenübergestellt und in ihren Wirkungen quantifiziert werden.

Folgende Fragestellungen sind im Bereich der natürlichen Lüftung interessant:

- Wie kann die Zuluft ohne Behaglichkeitseinbußen in die Räume gebracht werden?
- Wieviel Antriebsenergie kann gespart werden, und welche Relation ergibt sich im Verhältnis zur Wärmerückgewinnung?
- Wie stark wird die Luftqualität beeinflusst, wenn Pufferzonen zur Luftführung genutzt werden?
- Wie läßt sich die Außenluft im Zusammenspiel mit der Heizung auf ein behagliches Niveau vorwärmen?
- Für welche Anwendungsfälle eignet sich die sensorgesteuerte Stoßlüftung?
- Welche Rolle spielen thermischer Auftrieb und Windkräfte?
- Wie können sich natürliche und mechanische Lüftung in einem Konzept sinnvoll ergänzen?

Um die Zusammenhänge der verschiedenen Lüftungskonzepte detailliert zu erfassen, werden in allen Gebäudebereichen sowohl Lufttemperaturen als auch Luftfeuchte und Luftqualität gemessen. Um Konzepte der natürlichen Lüftung ohne Behaglichkeitseinbußen umsetzen zu können, sind besonders die Lufttemperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten im Aufenthaltbereich in der Nähe der Zuluftöffnungen relevant. Innerhalb der Meßräume werden diese Werte erfaßt. Über Fenstersensoren wird ermittelt, ob und wie lange der Nutzer seine Fenster öffnet oder in Kippstellung bringt. Um die Kühlpotentiale durch freie Nachtlüftung zu ermitteln, werden die Luftbewegungen innerhalb des Gebäudes erfaßt. Die sich einstellenden Temperaturen der Raumluft und der Oberflächen der massiven Bauteile werden im Tages- und Nachtverlauf aufgezeichnet. Zur Ermittlung der Wechselwirkungen zwischen dem Klima im Außenraum und der Gebäudedurchströmung können die Luftbewegungen mittels mobiler Strömungssensoren ermittelt werden.



Innenansicht eines Fassadenelementes

## Sommerliches Verhalten

Bei Gebäuden mit hohen internen Wärmelasten spielt das sommerliche Verhalten eine wichtige Rolle. Um den Einsatz einer mechanischen Kälteerzeugung zu vermeiden, müssen in der Regel mehrere Strategien zum Einsatz kommen. Als wirkungsvollste Methode werden Wärmeeinträge von außen durch Sonnenschutzeinrichtungen vermieden. Gleichzeitig muß jedoch die Tageslichtversorgung sichergestellt sein, um Kunstlicht zu vermeiden, das wiederum zu erhöhten Wärmelasten führen würde. Als weitere Strategie werden massive Bauteile während der kühleren Nachtstunden durch freie Lüftung abgekühlt. Die Thermoaktiven Decken des Gebäudes können kontinuierlich mit kühlem Wasser durchströmt werden, das über die Bodenplatte rückgekühlt wird. Auf diese Weise bilden die massiven Bauteile tagsüber einen Kältespeicher, der die Temperaturen innerhalb des Gebäudes in einem behaglichen Bereich hält. Da es sich hierbei um ein begrenztes Kühlpotential handelt, fällt das Nutzerverhalten besonders ins Gewicht. Tagsüber muß bei hohen Außentemperaturen die Fensterlüftung auf ein Mindestmaß reduziert werden.

Folgende Fragestellungen sind in diesem Zusammenhang relevant:

- Optimale Verschattung ohne Beeinträchtigung der Tageslichtversorgung.
- Welche Potentiale bieten thermo- und elektrochrome Gläser?
- Regelstrategien zur Gebäudeverschattung.
- Möglichkeiten der innenliegenden Verschattung.
- Wie groß sind die Kühlpotentiale durch Nachtauskühlung (Fensterlüftung, natürlicher Auftrieb, Wind)?
- Quantifizierung der Hilfsenergien bei mechanischer Nachtlüftung.
- Optimierung der Regelstrategien.
- Welche Leistungspotentiale bietet die Sohlplattenkühlung?
- Vergleich Sohlplattenkühlung und nächtliche Rückkühlung.

Die Zusammenhänge des sommerlichen Wärmeverhaltens beinhalten eine Vielzahl von Einzelaspekten. Die Stellung der Son-

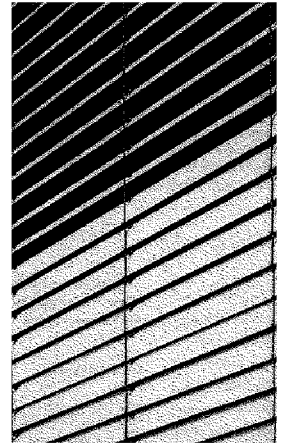
nenschutzelemente wird im gesamten Gebäude erfaßt ebenso die Einschaltzeiten des Kunstlichts. Versuchsaufbauten zur Wirkungsweise von speziellen Verglasungen können im Experimentalbereich integriert werden. Regelstrategien für die Gebäudeverschattung müssen in Abstimmung mit dem Nutzer entwickelt und optimiert werden. Hierzu werden begleitende Nutzerbefragungen durchgeführt. Die Leistungspotentiale der nächtlichen Auskühlung des Gebäudes durch freie Lüftung und der Sohlplattenkühlung werden im Rahmen der Forschungsgebiete Lüftung und Bauteilheizung detailliert ermittelt.

Strategien zur sommerlichen Kühlung:

- Abkühlung der massiven Oberflächen durch verstärkte Nachtlüftung.
- Auskühlung der Speichermassen durch nächtlichen Betrieb der TAD mit Rückkühlung über die Bodenplatte.
- Kontinuierliches Abführen von Wärmeüberschüssen am Tage über die Fußbodenkühlung mit Rückkühlung über die Bodenplatte.
- Vermeidung von unnötigem Wärmeeintrag durch wirkungsvollen Sonnenschutz.

## Tageslicht und Beleuchtung

Um einen geringen Gesamtenergieverbrauch zu erreichen, muß die Tageslichtversorgung des Gebäudes optimal gestaltet werden. Hier gilt es insbesondere im Sommer, einerseits möglichst viel Tageslicht in die Räume zu lassen, andererseits eine Überhitzung der Räume durch übermäßigen Wärmeeintrag zu vermeiden. Im Winter soll möglichst viel Solarstrahlung in die Räume gelangen, um möglichst hohe solare Wärmegewinne zu erzielen. Gleichzeitig müssen Blendung und Reflexionen an den Arbeitsplätzen vermieden werden. Um sich den wechselnden Außenbedingungen flexibel anpassen zu können, wird mit einem wirkungsvollen außenliegenden Sonnenschutz gearbeitet. Um möglichst viel Tageslicht bis in die Raumtiefe zu bringen, wird das Licht im oberen Bereich der



Außenliegende Verschattung mit Lichtlenklamellen

Fenster mittels Lichtlenklamellen blendfrei umgelenkt. Die Anordnung der Leuchten muß ebenfalls hohen Behaglichkeitsanforderungen genügen. Eine Beleuchtungssteuerung dimmt das Kunstlicht in Abhängigkeit vom Tageslichtangebot und den Bedürfnissen des Nutzers.

Im Zusammenspiel zwischen Tages- und Kunstlicht sind folgende Fragen interessant:

Aspekte der Tageslichtversorgung

- Einfluß verbesserter Tageslichtnutzung auf den Energieverbrauch.
- Einfluß auf das sommerliche Verhalten.
- Einfluß auf die psychische Behaglichkeit.
- Einfluß auf Komfortkriterien (Blendung, Kontraste, Reflexionen).
- Interaktionen mit der künstlichen Beleuchtung.

Bereich Kunstlicht

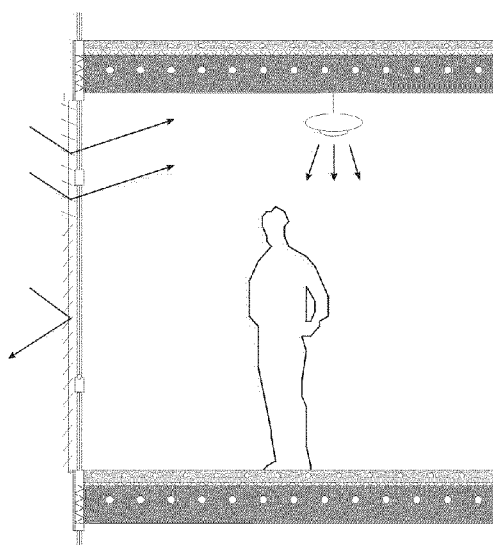
- Einsparpotentiale durch tageslichtabhängige Beleuchtungssteuerung.
- Optimierung der Regelstrategien.
- Positionierung der Sensoren.
- Analyse der stand-by Verluste.
- Nutzerabhängige Größen.

Messungen der Beleuchtungsstärken und der Lichtverteilung werden in der Regel mit mobilen Sensoren durchgeführt. Auf diese Weise kann an unterschiedlichen Stellen der Räume die Effektivität der Lichtlenkelemente und die Lichtverteilung gemessen

werden. Um spezielle Fragen zur Regelung, zur Sensorenanordnung und zur Kunstlichtsteuerung zu bearbeiten, werden repräsentative Testräume temporär intensiv vermessen. Basierend auf den ermittelten Daten kann die Kunstlichtsteuerung des Gebäudes optimiert werden. Innerhalb des gesamten Gebäudes werden die Kunstlichteinschaltzeiten sowie die Stellung der Sonnenschutzelemente erfaßt. Auf diese Weise können wichtige Daten zum Einfluß des Nutzerverhaltens gewonnen werden.

### Behaglichkeit

Trotz aller Meßtechnik steht doch immer der Mensch mit seinen individuellen Bedürfnissen im Mittelpunkt der bearbeiteten Forschungsaufgaben. Forschung, die den Nutzer nicht in die Untersuchungen einbezieht, geht letztlich an der Praxis vorbei. Dabei ist es oft schwierig die subjektiven Anforderungen, die der Nutzer an seine Aufenthaltsräume stellt, zu erfassen und zu objektivieren. Einige dieser Aspekte werden unter dem Begriff der thermischen Behaglichkeit zusammengefaßt, doch auch in diesem verhältnismäßig gut quantifizierbaren Bereich gibt es eine breite nutzerabhängige Streuung. Negative Einflüsse der Arbeitsraumumgebung werden unter dem Begriff "sick-building-syndrom" zusammengefaßt. Sie treten vorwiegend in vollklimatisierten Bürogebäuden auf. In der Regel ist der Mensch in diesen Gebäuden den ganzen Tag einem, theoretisch idealen, gleichförmigen Kunstklima ausgesetzt. Üblicherweise, ohne daß er Einfluß auf seine raumklimatische Umgebung nehmen kann. Inzwischen hat sich allerdings gezeigt, daß es ein Idealklima für Arbeitsräume nicht gibt. So unterschiedlich wie die Menschen, so unterschiedlich sind auch die raumklimatischen Verhältnisse, in denen sie sich wohlfühlen. Zum Wohlbefinden des Nutzers trägt entscheidend bei, ob er seine Umgebung nach seinen persönlichen Bedürfnissen beeinflussen kann. Heutige Büroräume müssen diesem Anspruch genügen und die Regelung der Raumverhältnisse vom Zentralrechner

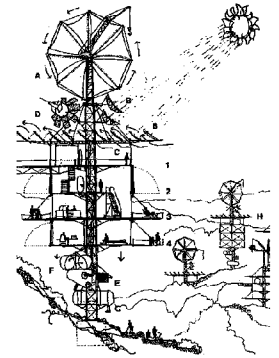


Tageslichtlenkung und Kunstlicht sind Einflußgrößen für den Energieverbrauch

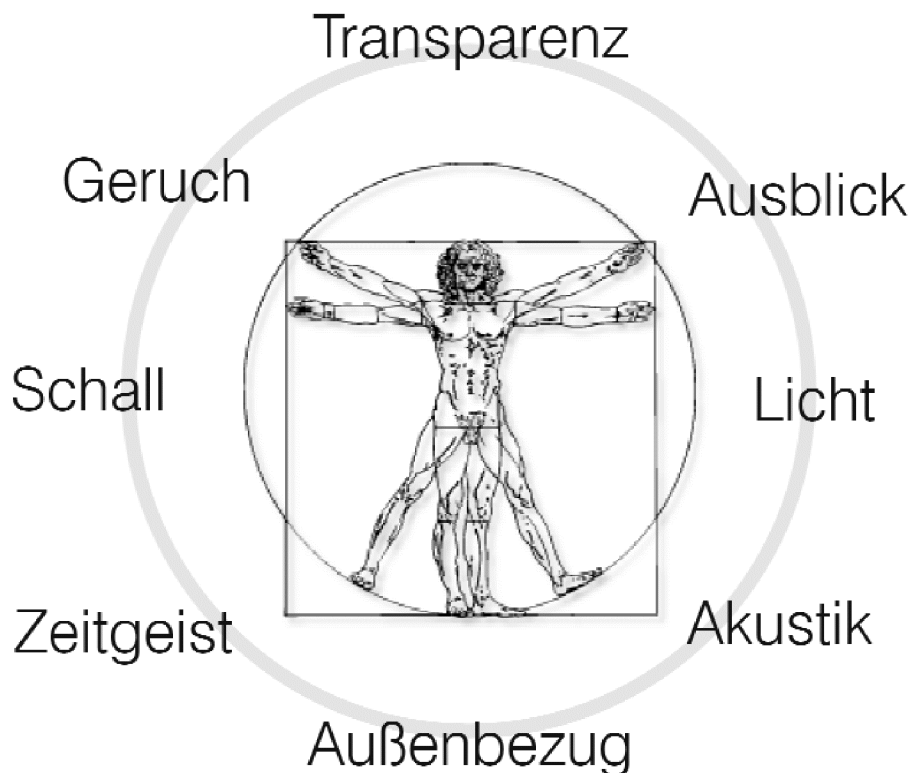
wieder mehr zum Nutzer verlagern. Die Forschung hat in diesem Zusammenhang die Aufgabe, Regelungsstrategien zu entwickeln, die dem Nutzer weitreichende Freiheiten erlauben, gleichzeitig aber auch den Anforderungen des energiesparenden Bauens genügen. Systeme mit niedrigstem Energieverbrauch reagieren in der Regel ausgesprochen sensibel auf nutzerbedingte Bedienungsfehler. So kann im ZUB beispielsweise ein in der Sommerhitze offenes Fenster nicht einfach durch eine Erhöhung der Kühlleistung ausgeglichen werden. Ebenso läßt sich der Kaltluftabfall an einem gekippten Oberlicht nicht durch die geringen Übertemperaturen der Fußbodenheizung auffangen. Im Bereich des energiesparenden Bauens kommt darum der Information der Nutzer über die Systemzusammenhänge besondere Bedeutung zu. Hierfür gilt es, geeignete Darstellungsmethoden und einfach zu bedienende Regelungseinrichtungen zu entwickeln. Im ZUB wird der Versuch unternommen verschiedene Systemkomponenten für den Besucher transparent und anschaulich dar-

zustellen. Hier versteht sich das ZUB als Anschauungsobjekt und Informationsquelle für Planer, Bauherren und Nutzer.

Die Angestellten des ZUB arbeiten an verschiedenen Forschungsprojekten zu den Themen energiesparendes Bauen und moderne Bau- und Anlagentechnik. Zur Erfassung von nutzerabhängigen Größen sollen Mitarbeiterbefragungen auch an Referenzgebäuden Aufschluß über den tatsächlichen Umgang mit den verschiedenen Gebäude- und Haustechnikkomponenten geben. Interessant ist dabei die Frage inwieweit sich der Nutzer zu einem energiesparenderem Verhalten motivieren läßt und welche Informationen und Eingriffsmöglichkeiten er dafür braucht. Die Regeltechnik sollte in Zukunft den Nutzer als "Eingangsgröße" berücksichtigen. Damit gelangt der Mensch mit seinen Bedürfnissen wieder ins Zentrum des Interesses und die Gebäudetechnik wird Mittel zum Zweck, um diese möglichst energiesparend zu erfüllen.



Der Außenbezug spielt für das Wohlbefinden eine wichtige Rolle.



"Beobachte das Schwimmen der Fische im Wasser, und du wirst den Flug der Vögel in der Luft begreifen."

Leonardo da Vinci (1452-1519)

Der Mensch im Wechselspiel mit den Parametern seiner Umwelt.

Fotos und Grafik:  
Premyslaw Szymczak