

\*Achim Geissler et al.

Energy Research Lab an der FHNW

# LICHT- UND FASSADENLABOR



**Um die Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Energieeffizienz und der zukünftigen Energieversorgung voranzutreiben, wurde in Muttenz an der FHNW in Zusammenarbeit mit der Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik, der Hochschule für Technik sowie der Hochschule für Gestaltung und Kunst eine flexible Testplattform für Anwendungen in der Gebäude-, Fassaden-, Licht- und Energietechnik erstellt, das «Energy Research Lab». Das Energy Research Lab besteht aus zwei Baukörpern, dem Simulationslabor sowie dem Licht- und Fassadenlabor.**

Gebäudekonstruktion, Ausrichtung, Nutzungsart, Witterung, Energiequelle – sie alle beeinflussen die Energieflüsse und damit auch Art und Ausmass der technischen Einrichtungen, die für ein behagliches Raumklima erforderlich sind. Im *Simulationslabor* lassen sich die einzelnen Komponenten definieren, in ihrem Zusammenspiel untersuchen und schliesslich hinsichtlich des Energieverbrauchs, der Kosten und der Lebensdauer optimieren. Unterschiedliche klimatische Randbedingungen können in kurzen Abständen nachgestellt und damit die dynamischen Eigenschaften einer technischen Anlage, aber auch des Gebäudesystems als Ganzes beurteilt werden. Zudem kann die Verfügbarkeit solarer Energie über das Jahr hinweg abgebildet werden, woraus sich – immer vor dem Hintergrund der Energieeffizienz – die Anforderungen an Speicher und andere technische Anlagen ableiten lassen.

Eine optimale Tageslichtversorgung von Innenräumen ist eine der wichtigsten Voraussetzungen für den energieeffizienten Umgang mit Kunstlicht. Gleichzeitig gilt es, insbesondere im Zusammenhang mit Bildschirmarbeitsplätzen, Blendungen möglichst zu vermeiden. Die Tageslichtverhältnisse in einem Raum basieren auf einer komplexen Kombination von Bausubstanz und haustechnischer Einrichtungen. Geometrie und Lage der Fensteröffnungen im Gebäude beeinflussen den Tageslichteintrag ebenso wie der Sonnen- und der Blendschutz sowie die

Steuerung und Regelung dieser Einrichtungen. Zudem wird das im Raum verfügbare Tageslicht sehr häufig durch Kunstlicht ergänzt. Das *Licht- und Fassadenlabor* erlaubt es, solche scheinbar widersprüchlichen Anforderungen optimal auszubalancieren. Zu diesem Zweck lassen sich verschiedene Kombinationen von Lichteinfall, Kunstlicht sowie Beschaffenheit der Oberflächen im Innenraum nachstellen und ausmessen. In diesem Beitrag wird das Licht- und Fassadenlabor anhand von einigen Beispielanwendungen vorgestellt.

Das Licht- und Fassadenlabor bietet eine Plattform für die Klärung von Fragestellungen rund um die Interaktion zwischen der Fassade und dem dahinter liegenden Raum. In Bild 1 ist das Labor mit der verfügbaren, teilweise auch mobil einsetzbaren Ausstattung skizziert.

Das Licht- und Fassadenlabor

- 1 ist mit einem rechnergesteuerten, motorisierten Antrieb drehbar gelagert
- 2 hat eine austauschbare Fassadenfront von 3,3 m×3,9 m und ein Oberlicht
- 3 stellt für Sonnenschutzsysteme eine frei programmierbare SPS-Steuerung zur Verfügung
- 4 bietet wechselbare Innenwände, deren Beschaffenheit sowie Farbe variiert werden können
- 5 hat als Kunstlichtquelle eine LED-Beleuchtung, deren Farbe, Farbtemperatur und Leuchtstärke rechnergesteuert regulierbar sind

\* Achim Geissler, Caroline Hoffmann  
Institut Energie am Bau, Hochschule für  
Architektur, Bau und Geomatik der FHNW

- 6 verfügt über eine Messstation zur Erfassung des thermischen Komforts (Strahlungstemperatur, Lufttemperatur und -feuchtigkeit und Strömungsgeschwindigkeit)
- 7 hat eine hochauflösende Kamera zur ortsauflösten Leuchtdichte- und Farbwertmessung und
- 8 ist mit weiteren Sensoren für die Globalstrahlung vertikal (Fassade), Lufttemperatur, Luftfeuchte, Druckdifferenzen, die elektrische Leistungsaufnahme u.a. ausgestattet.

Der Laborraum ist klimatisiert und eine Klimamessstation steht direkt nebenan. Die Ausstattung erlaubt vielfältige Untersuchungen, z.B. die gleichzeitige Erfassung der Lichtfarbe, der Beleuchtungsstärke, der Blendung, aber auch der Luft- und Strahlungstemperatur. Weiterhin können beispielsweise auch Zugscheinungen und etwaiger Kaltluftabfall an den Glasscheiben bestimmt werden. Ableiten lassen sich aus letz-

genannten Messdaten z.B. die thermische Behaglichkeit sowie das Zugluftisiko nach EN ISO 7730 [1].

### Beispielanwendungen Tageslicht, Blendung und Energiebedarf

Die Versorgung von Innenräumen mit Tageslicht ist ein Thema, das wieder stärker in das Bewusstsein gelangt ist. Insbesondere an Lern- und Arbeitsplätzen bestehen nebeneinander die Anforderung, einen Aussenbezug zu gewährleisten, ausreichend Tageslicht zur Verfügung zu stellen und Bildschirmarbeit zu ermöglichen. Es kann dabei von einem Spannungsdreieck zwischen den Zielen «optimale Tageslichtversorgung», «Blendfreiheit» und «Wärmeeinträge» gesprochen werden – die Wärmeeinträge sind aus energetischen Erwägungen zudem im Winter in der Regel zu maximieren und im Sommer zu minimieren.

Der zentrale Faktor für einen guten sommerlichen Wärmeschutz ist das Vorhandensein einer ausreichenden Sonnenschutzvorrichtung für alle transparenten Bauteile, die einen visuellen Bezug zur Umgebung ermöglicht und ausreichend Tageslicht durchlässt. Ein wichtiger Aspekt ist neben der Windfestigkeit die Steuerung – der beste (bewegliche) Sonnenschutz bringt nichts, wenn er nicht korrekt bedient wird. Die in Bild 2 gezeigte Kamera zur ortsauflösten Leuchtdichtemessung ermöglicht beispielsweise die Bestimmung der Blendungswahrscheinlichkeit bei einer bestimmten Lamellenstellung des Sonnenschutzes. Bild 3 zeigt entsprechend links das Kamerabild und rechts die Auswertung der Blendungswahrscheinlichkeit. Für die vorhandene Tageslichtsituation ist in der gezeigten Blickrichtung auch ohne herabgelassene Lamellenstore nicht mit störender Blendung zu rechnen.

Mit einem über die entsprechenden Messungen abgeglichenen Rechenmodell beispielsweise für einen bestimmten Sonnenschutz können anschliessend Jahressimulationen durchgeführt werden. Es gehen dabei neben den strahlungstechnischen Eigenschaften des Sonnenschutzes der Standort, die Nutzungszeiten und vorhandene Verschattungen sowie auch die Regelstrategie und das Nutzerverhalten in die Analyse mit ein. Wechselwirkungen zwischen der Tageslichtversorgung, Blendungen, dem Kunstlichtstrombedarf sowie dem solaren Wärmeeintrag können für verschiedene Planungsvarianten ganzheitlich beurteilt werden. Ziel ist z.B. die Optimierung der Steuerung des Sonnenschutzes oder auch die optimale Produktwahl.

Beispielhaft sind für ein sehr aktives Nutzerverhalten (siehe Bild 4) in den Bildern 5 bis 7 Simulationsergebnisse für das Lichtlabor mit nach Westen ausgerichteter Glasfassade dargestellt. Die Fassade ist mit einer Rafflamellenstore als Sonnenschutz ausgerüstet und es ist eine vorgesehene Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche von 500 Lux definiert. Die Raum-

**A** Energy Research Lab bei abendlicher Lichtstimmung.

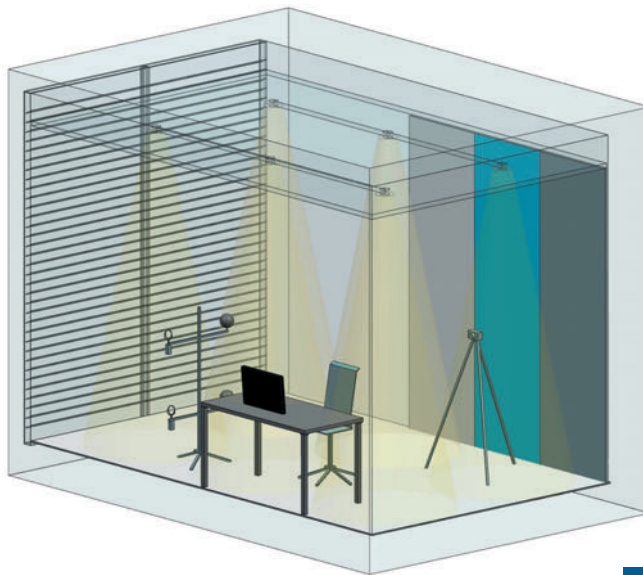
**1** Licht- und Fassadenlabor mit Ausstattung.

**2** Kamera zur ortsauflösten Leuchtdichte- und Farbwertmessung mit Blickrichtung «Fassade».

**3** High Dynamic Range (HDR) Kamerabild «Leuchtdichte» (links), Auswertung der Blendung (rechts). Die kritischen Bereiche sind farbig markiert. Die Blendungswahrscheinlichkeit DGP beträgt 23% und liegt damit im nicht wahrnehmbaren Bereich.

**4** Regelung der Rafflamellenstore in der Simulation mit «manueller Bedienung». Der Nutzer versucht, Blendung zu vermeiden (Definition DGP siehe Infobox).

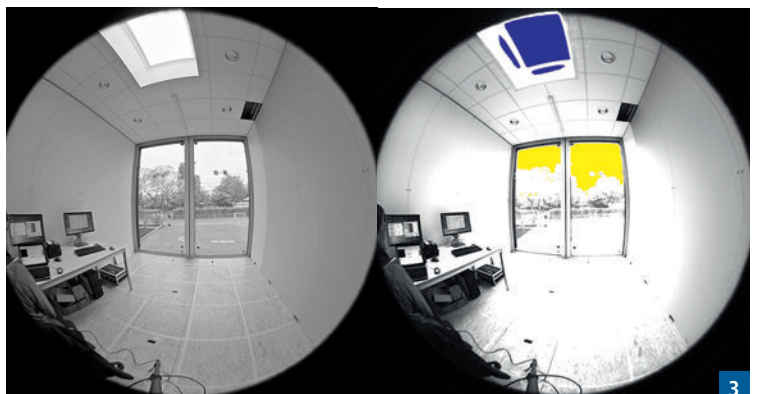
**5** Auswertung der Tageslichtautonomie (TA) für das nach Westen gedrehte Licht- und Fassadenlabor. Der Anteil der Grundfläche, auf dem die Tageslichtautonomie grösser als 50% ist, liegt bei 21%. Die Tageslichtautonomie gilt für die aktive manuelle Bedienung des Sonnenschutzes gem. Bild 4.



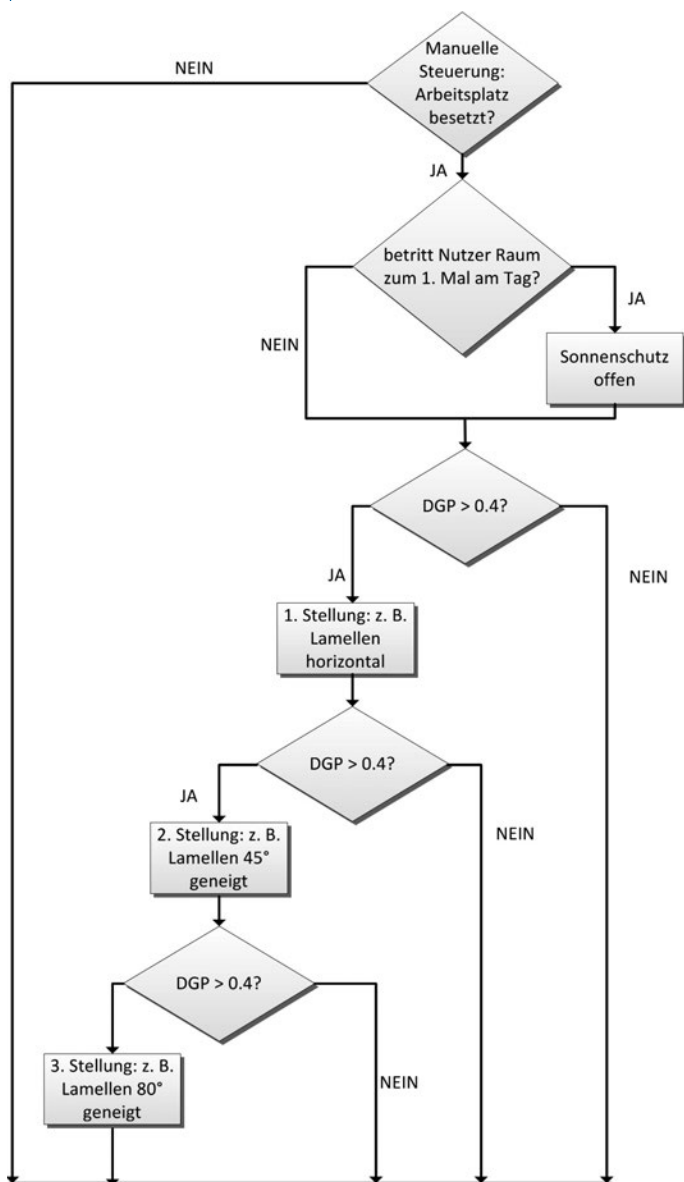
1



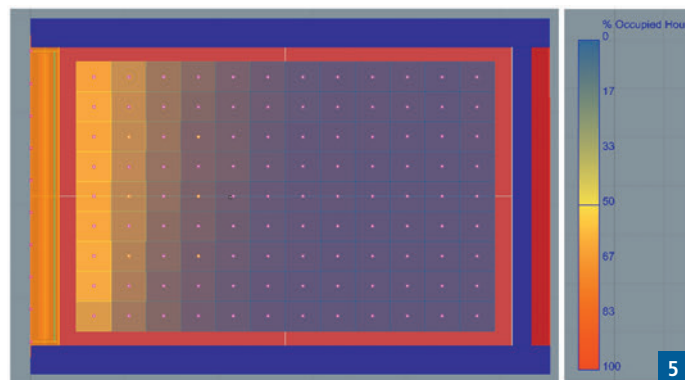
2



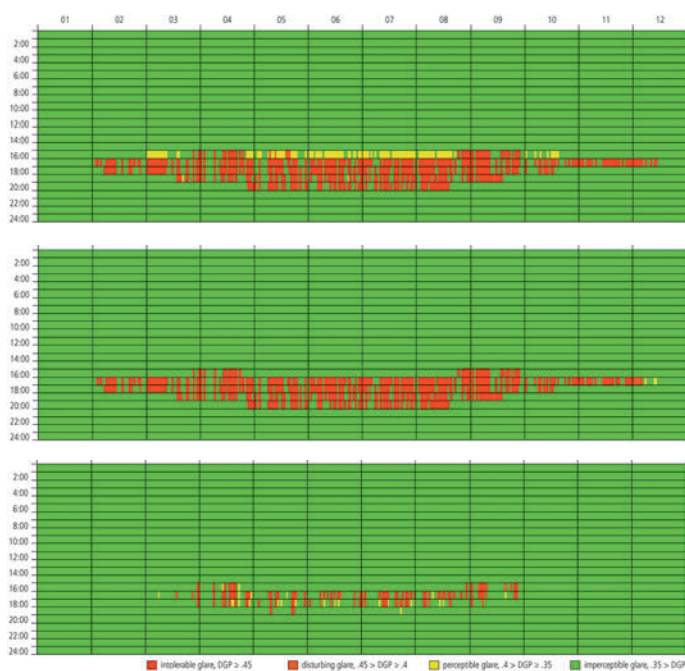
3



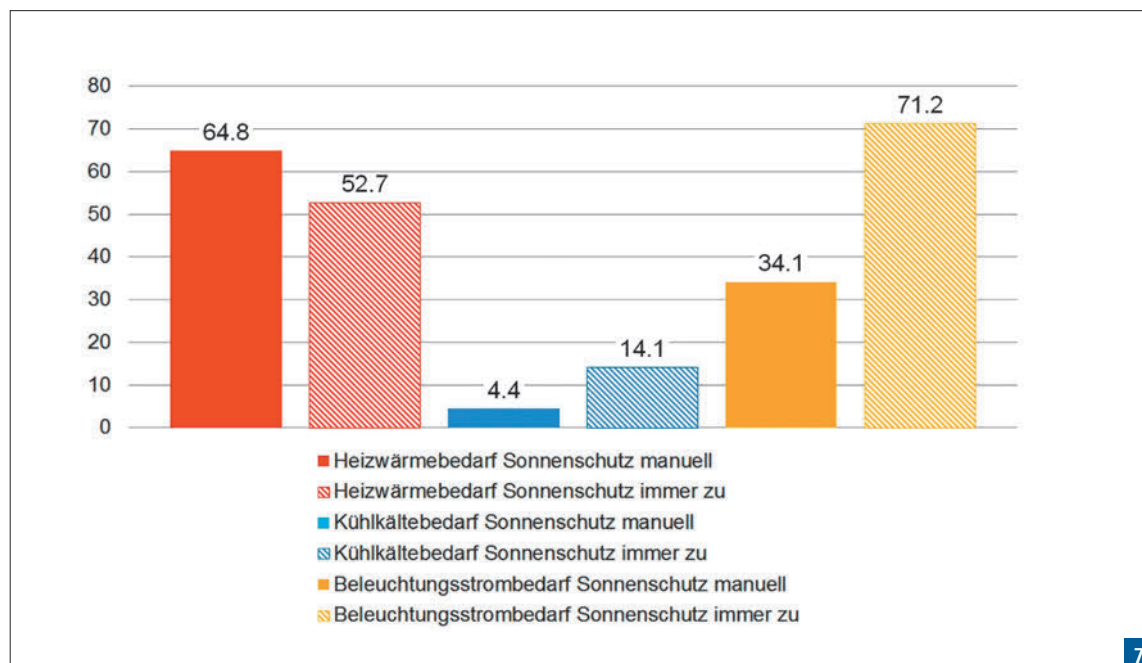
4



5



6



7

6 Auswertung der Blendung (DGP) am Bildschirmarbeitsplatz (mit Blick gegen das Fenster) für das nach Westen gedrehte Licht- und Fassadenlabor. Die Abbildungen zeigen die Blendung, welche entsteht, wenn die Lamellen horizontal (oben), mit einem Winkel von ca. 45° (Mitte) und in einem Winkel von ca. 80° (unten) gestellt sind. Der Sonnenschutz wird gemäss Bild 4 durch den Nutzer bedient.

7 Nutzenergiebedarf für Heizen, Kühlen und elektrische Beleuchtung mit aktiver manueller Bedienung (gemäss Bild 4) sowie zum Vergleich mit stets heruntergelassener und geschlossener Lamellenstore.

lufttemperatur soll zwischen 20 und 26 °C liegen, der Raum verfügt über eine mechanische Kühlung. Der Nutzer blickt in Richtung Fassade. Berechnet werden die Tages- und Kunstlichtnutzung, die Blendung und der Energiebedarf für Heizung und Kühlung. Bild 5 zeigt die Tageslichtautonomie für das Jahr, Bild 6 zeigt für verschiedene Lamellenstellungen die Blendung am Arbeitsplatz. Da in der Simulation der Raum nach Westen ausgerichtet ist, tritt Blendung nur in den Nachmittagsstunden auf. In Bild 7 ist der Heizwärmebedarf im Winter, der Kühlkältebedarf im Sommer und der Strombedarf für die elektrische Beleuchtung für die Fälle «Lamellenstore stets geschlossen» und mit der Steuerung des Sonnenschutzes durch den sehr

aktiven Nutzer gemäss Bild 4 wiedergegeben. Die Berechnungen erfolgen mit [2].

### Thermischer Komfort am Arbeitsplatz

Unter dem Thema «Recht» bietet der SIA Kurse zur neuen Ausgabe der Norm SIA 180 [7] an. Zentrales Thema dieser Norm ist, dass jeder durch Personen länger genutzte Raum behaglich und gesund sein muss, und das Gebäude muss so konzipiert sein, dass diese Eigenschaften auf möglichst natürliche Art erreicht werden. Eine mobile Messstation erlaubt im Licht- und Fassadenlabor die Bestimmung des thermischen Komforts für typische Arbeitsplatzsituationen (siehe Box thermische Behaglichkeit). Bild 8 (links) zeigt die Messstation. Die

obere Messebene befindet sich in Kopfhöhe beim Sitzen (1,10 m), die untere Messebene in Höhe der Knöchel (0,10 m) – Zugserscheinungen in Kopf- bzw. Knöchelhöhe sind häufige Ursachen für Beschwerden.

Bild 8 rechts zeigt die über einen kurzen Zeitraum beispielhaft erfassten Messwerte. Die Messwerte zeigen für einen Arbeitsplatz hohe Luft- ( $\theta_a$ ) und Strahlungstemperaturen ( $\theta_r$ ) von rund 26 °C, eine tiefe Strömungsgeschwindigkeit  $v$  im Bereich von 0,03 bis 0,04 m/s und eine relative Luftfeuchtigkeit  $\phi$  von rund 37%. Die Auswertung des erwarteten Prozentsatzes Unzufriedener (PPD) ergibt einen Wert von knapp 24% und liegt damit zu hoch. Bei der Berechnung wird von einer Bürotätigkeit und einem

**8** Messstation thermischer Komfort (links), Messwerte (Mittelwerte von zwei Messebenen) und Auswertung des Prozentsatzes unzufriedener (PPD, rechts).

**9** Strömungs sonden messen die Luftgeschwindigkeit am Glas und an der Referenzstelle 1,0 m im Raum und 0,1 m über dem Boden.

**10**  $U_{max}$  gemäss SIA 180 [7] – links als Funktion von der Höhe des Glases, rechts als Funktion von dem Abstand des Aufenthaltsbereiches von der Fassade.

Metriken, Lichtversorgung und Blendung

### Tageslichtautonomie (TA)

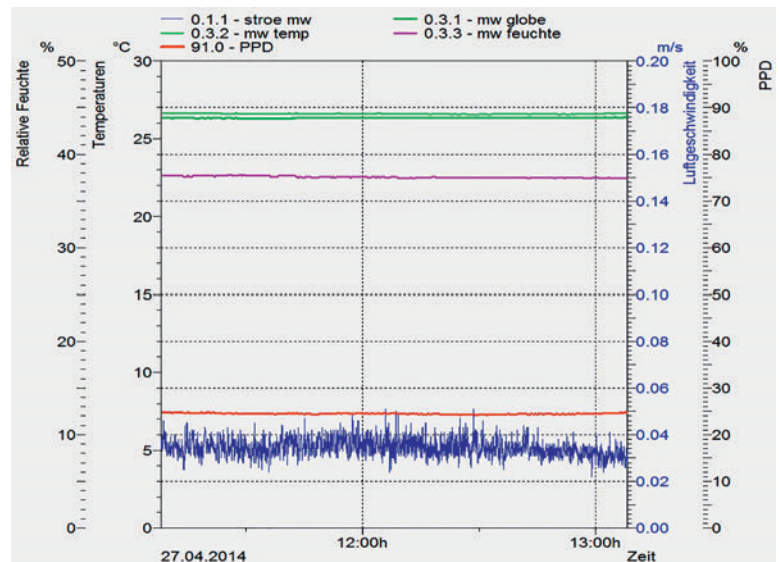
Die Tageslichtautonomie («Daylight Autonomy» DA) ist der Anteil Nutzungsstunden, für den über Tageslicht eine definierte Beleuchtungsstärke erreicht bzw. überschritten wird. Die Angabe erfolgt in Prozent. Die Darstellung erfolgt typisch als entsprechend skalierte Farbdarstellung auf einem Grundriss des betrachteten Raumes.

### Blendwahrscheinlichkeit (DGP)

Die Blendwahrscheinlichkeit DGP (Daylight Glare Probability) gibt den Prozentsatz Nutzer an, die sich an der ausgewerteten Stelle mit der betrachteten Blickrichtung in einem Raum geblendet fühlen werden. Der Definitionsbereich liegt zwischen 20% und 80%, wobei Werte unter ca. 32–35% als «nicht wahrnehmbare Blendung», Werte bis ca. 40% als «wahrnehmbar», Werte bis ca. 45% als «störend» und Werte darüber als «nicht tolerierbar» einzustufen sind [4].

### Direktblendungs-Grad (UGR)

Der Grad der Direktblendung UGR (CIE Unified Glare Rating) ist für Leuchten definiert und auf Quellen mit einem Raumwinkel zwischen  $3 \times 10^{-4}$  bis  $1 \times 10^{-1}$  sr beschränkt. Der UGR-Wert hat keine Einheit. Der Direktblendungs-Grad wird in SIA 380/4 [5] für die Planung der Kunstlichtversorgung verwendet. Die empfohlenen UGR-Grenzwerte bilden eine Reihe, deren Stufen eine merkliche Änderung der Blendung darstellen: 10, 13, 16, 19, 22, 25 und 28. Arbeitsplätze sollen einen UGR-Wert von 19–22 nicht überschreiten.



**Bildnachweis:** Bild A: Claire Morin, Matthias Indermaur, alle anderen Bilder: IEBAu

### Visuelle Behaglichkeit und Blendung

Je nach Beschäftigung benötigt man mehr oder weniger Licht. Dabei spielt auch die Farbe des Lichtes eine wichtige Rolle – in Abhängigkeit von der Tageszeit wirkt die Lichtfarbe unterschiedlich auf den menschlichen Organismus (circadiane Rhythmus des Menschen [«Tag-Nacht Rhythmus»]). Die Konzentrationsfähigkeit bzw. die allgemeine Wachheit kann deutlich beeinflusst werden. Insbesondere an Bildschirmarbeitsplätzen aber auch bei anderen Tätigkeiten sind grosse Helligkeitsunterschiede im Sichtfeld störend – die deutlich helleren Bereiche blenden. Der Mensch reagiert auf diese visuelle Beeinträchtigung unterschiedlich, auch hier werden daher statistische Werte zur Beschreibung der Blendungsintensität herangezogen [3].

Anzug als Bekleidung (met-Rate 1,2, clo-Wert 0,9) ausgegangen. Mit leichterer Bekleidung (clo-Wert 0,5) lässt sich der Anteil der Unzufriedenen auf 10% – einen guten Wert – senken. Übertragen auf eine reale Arbeitssituation lässt sich rückschliessen, dass in diesem Raum eine Kleidervorschrift, die einen Anzug vorsieht, eine (zu) geringe Behaglichkeit der Nutzer verursacht.

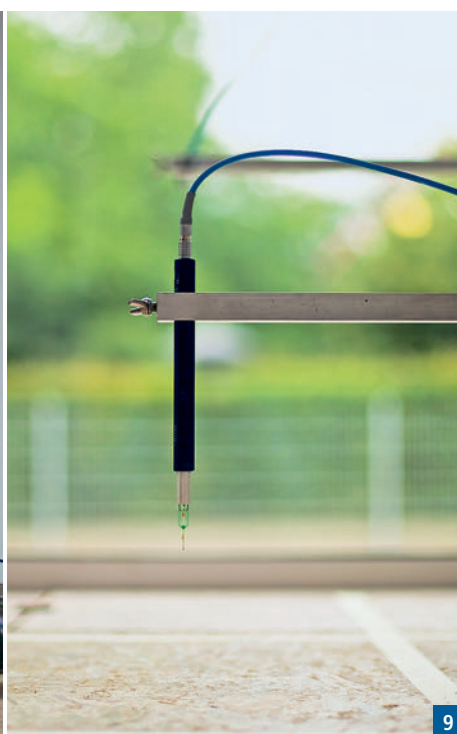
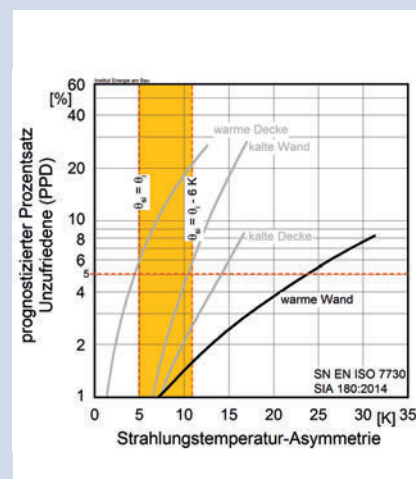
Die mobile Messstation kann selbstverständlich in beliebigen Gebäuden zum Einsatz kommen,

### Thermische Behaglichkeit

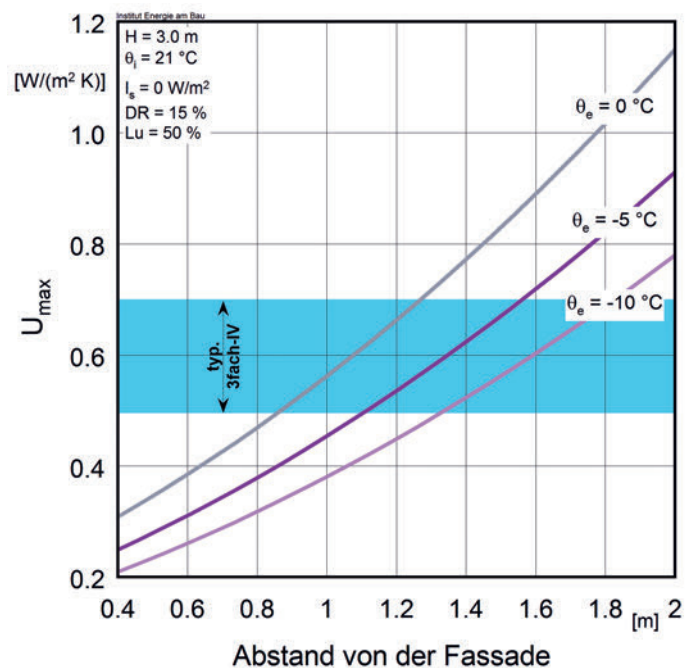
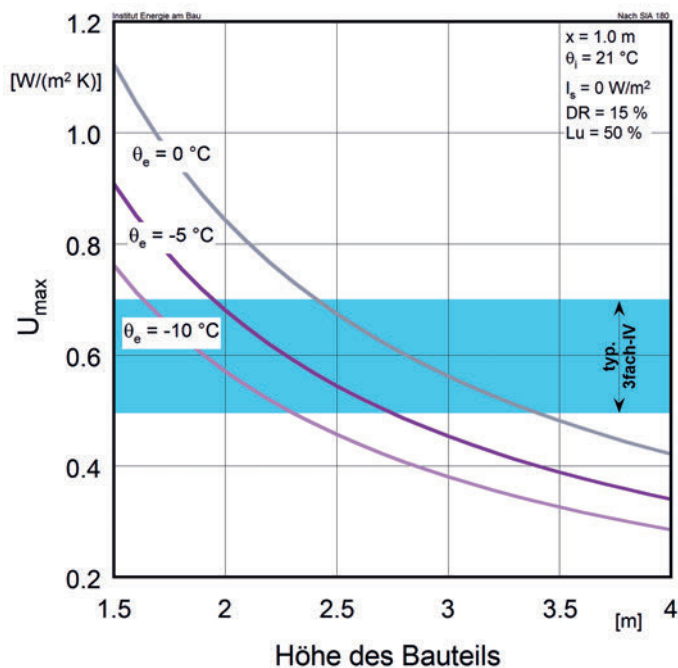
Aus den Messgrössen «Strahlungstemperatur», «Lufttemperatur», «relative Luftfeuchtigkeit» und «Strömungsgeschwindigkeit» wird unter der Annahme einer bestimmten Kleidung (clo-Wert) sowie einer metabolischen Rate (met-Rate) mit der Gleichung von Fanger das sogenannte «mittlere Votum» (Predicted Mean Vote, PMV) berechnet. Das mittlere Votum ist eine Zahl zwischen –3 (kalt) und 3 (heiss). Der Wert Null bedeutet «thermisch neutral». Aus dem PMV kann dann der erwartete Prozentsatz unzufriedener (Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD) ermittelt werden. Es wird dabei davon ausgegangen, dass stets mindestens 5% der Personen in einem Raum mit den thermischen Randbedingungen nicht zufrieden sind. Diese Beschreibung der thermischen Behaglichkeit ist ein empirischer Ansatz, der von Fanger Anfang der 70er Jahre des vergangenen Jahrhunderts auf der Grundlage von Messungen in einer Klimakammer und Befragungen entwickelt wurde [8]. Die Beurteilung der thermischen Behaglichkeit gemäss SIA 180 [7] beruht auf diesem Ansatz.

### Strahlungstemperatur-Asymmetrie

Strahlungstemperatur-Asymmetrie beschreibt den Temperaturunterschied zwischen zwei Seiten des Körpers. Beispielsweise am Lagerfeuer ist die Vorderseite dem warmen Feuer zugewandt, der Rücken der kalten Umgebung. Hier liegt eine grosse (Strahlungs-) Temperaturdifferenz vom Typ «warme Wand» vor. Rechts ist die Bewertung der Behaglichkeit infolge solcher Asymmetrien dargestellt. Der orange hinterlegte Bereich zeigt Werte der möglichen Strahlungstemperatur-Asymmetrie, die sich aus der in [7] zusätzlich festgelegten +5K Begrenzung der raumseitigen Oberflächentemperatur gegenüber der Raumlufttemperatur ergeben.



sollte es beispielsweise zum thermischen Komfort Beschwerden geben und diese in Zusammenhang mit einer Fassade gebracht werden. Auch bei Diskussionen zur Strahlungstemperatur-Asymmetrie (Strahlungstemperatur an der inneren Oberfläche im Vergleich zur Strahlungstemperatur der übrigen Wandflächen) beispielsweise in Zusammenhang mit einem raumseitigen Blend- oder auch Sonnenschutz kann der Einsatz einer solchen Messeinrichtung sinnvoll sein. In der neuen Ausgabe der SIA 180 [7] wird hier eine gewisse Zweideutigkeit eingeführt. Einerseits kann die Strahlungstemperatur-Asymmetrie direkt über die Grenzkurven gemäss ISO 7730 [1] bewertet werden (siehe Box Strahlungstemperatur-Asymmetrie bzw. SIA 180, Abschnitt 2.4.2.5). Andererseits wird aber in SIA 180 zusätzlich eine Überschreitung der Raumlufttemperatur durch die raumseitige Oberflächentemperatur der Fassade von maximal 5 K erlaubt (Abschnitt 5.2.4.9). Letzteres ist ein weit strengeres Kriterium und hat einen



massgeblichen Einfluss darauf, welche Glas-, Blend- und Sonnenschutzkombinationen möglich sind.

### Zugerscheinungen / Kaltluftabfall

Mit hoch empfindlichen Strömungsgeschwindigkeits-Sensoren (siehe Bild 9) kann die lokale Strömungsgeschwindigkeit gemessen werden. Beispielsweise ist das Thema Kaltluftabfall für raumhohe Verglasungen trotz Dreifach-Isolierglas immer wieder in der Diskussion. Die Grundlage für die Auslegung ist dabei in SIA 180 [7] zu finden und in Bild 10, links, dargestellt. Ist der U-Wert des Glases bei gegebener Raum- bzw. Scheibenhöhe zu hoch, muss bei entsprechenden Aussentemperaturen mit unzulässig starkem Kaltluftabfall gerechnet werden. Dabei wird in einem Fassadenabstand von einem Meter in Knöchelhöhe gemessen. In Bild 10, rechts, ist für eine drei Meter hohe Scheibe der Einfluss des Fassadenabstandes auf den einzuhaltenden Glas-U-Wert dargestellt – eine Option könnte damit im Problemfall sein, den Abstand des Sitzbereiches etwas von der Fassade zu entfernen. Im geeigneten Beispiel müsste bei einer Aussentemperatur von  $-10$  °C bei der Auslegung für den Aufenthalt (sitzende Tätigkeit, Zugerscheinungen an den Knöcheln) in einem Meter Entfernung von der Fassade der Glas-U-Wert unter  $0,40$  W/(m<sup>2</sup>K) liegen. In einem Abstand von 1,4 Metern von der

Fassade würde bereits ein Glas mit einem Glas-U-Wert von ca.  $0,53$  W/(m<sup>2</sup>K) genügen.

Im Licht- und Fassadenlabor können mögliche Massnahmen untersucht und in ihrer Auswirkung auf das Zugluftisiko am Arbeitsplatz gemessen werden. Allerdings ist eine künstliche Klimatisierung von aussen – also die Untersuchung des Winterfalls zu jeder Jahreszeit – nicht möglich. Das Labor ist den natürlichen Witterungsverhältnissen ausgesetzt. Die Messeinrichtung für Strömungsgeschwindigkeiten kann flexibel in beliebigen Gebäuden eingesetzt werden.

### Fazit

Das Energy Research Lab mit seinem Simulationslabor sowie dem Licht- und Fassadenlabor bietet umfassende Möglichkeiten, Gesamtsysteme oder neu entwickelte Einzelkomponenten in einer geregelten Umgebung einzusetzen. Das Labor steht damit insbesondere für Fragestellungen der angewandten Forschung zur Verfügung, eignet sich aber durchaus auch für Abklärungen bei der Planung von grösseren Bauprojekten. Wir arbeiten mit Industrie- und Gewerbetägern sowie mit öffentlichen Auftraggebern zusammen. Das Labor wird zudem in der Aus- und Weiterbildung eingesetzt.

Die Autoren stehen für Anfragen und weitere Auskünfte gerne zur Verfügung.

### Quellenverzeichnis

- [1] SN EN ISO 7730: *Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit* (ISO 7730:2005).
- [2] DIVA 2.1.1.0: <http://diva4rhino.com/>.
- [3] Binz, A.; Bichsel, J.; Geissler, A.; Hall, M.; Huber, H.; Steinke G.; Weickgenannt, B.: *Energieeffizientes Bauen – Konzepte, Kriterien, Systeme*; Fachhochschule Nordwestschweiz – Institut Energie am Bau (Hrsg.); ISBN: 978-3-905711-28-8.
- [4] Wienold, J.: *Dynamic daylight glare evaluation*; Building Simulation 2009, Glasgow (UK), 944–951.
- [5] SIA 380/4: *Elektrische Energie im Hochbau*; 2006.
- [6] SN EN 12464-1: *Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen*; Ausgabedatum: 2013-06.
- [7] SIA 180: *Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden*; 2014.
- [8] P.O. Fanger: *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*; R.E. Krieger Publishing Company, 1982.

L'Energy Research Lab de la FHNW

## LABORATOIRE DE LA LUMIÈRE ET DES FAÇADES

**Afin de faire avancer la recherche et le développement dans le domaine de l'efficacité énergétique et de l'approvisionnement énergétique du futur, une plateforme d'essais flexible destinée aux applications dans les techniques du bâtiment, des façades, de la lumière et de l'énergie dénommée «Energy Research Lab» (ERL) a été créée à Muttenz, à la Haute école du Nord-Ouest de la Suisse (FHNW), en collaboration avec la Haute école d'architecture, de construction et de géomatique, la Haute école d'ingénierie et la Haute école de design et d'art. L'ERL est constitué du laboratoire de simulation et du laboratoire de la lumière et des façades.**

Le *laboratoire de simulation* permet de définir individuellement certains paramètres, d'étudier les interactions et enfin d'optimiser en conséquence la consommation d'énergie, les coûts et la durée de vie. Diverses conditions climatiques limites peuvent être reconstituées avec des intervalles réduits, permettant d'évaluer les propriétés dynamiques d'une installation technique mais aussi du système de gestion d'immeuble dans son ensemble.

Un éclairage optimal des espaces intérieurs en lumière naturelle est une des conditions préalables les plus importantes en ce qui concerne l'efficacité énergétique de la lumière artificielle. Dans le même temps, il importe d'éviter les reflets dans toute la mesure du possible, notamment sur les postes de travail équipés d'écrans. La géométrie et la position des fenêtres dans le bâtiment ont une influence sur l'éclairage en lumière naturelle, tout autant que les protections solaires et antiéblouissement et les systèmes de commande et de régulation de ces équipements. La lumière naturelle présente dans les locaux est très fréquemment complétée par une lumière artificielle. Le *laboratoire de la lumière et des façades* permet de trouver l'équilibre idéal face à de telles exigences apparemment contradictoires. On peut pour cela y reconstituer et mesurer différentes combinaisons d'incidence de la lumière, de lumière artificielle et de caractéristiques des surfaces à l'intérieur des locaux.

Le laboratoire de la lumière et des façades propose une plateforme permettant de résoudre les questions d'interaction entre la façade et l'espace intérieur (illustration 1).

### Exemples d'applications Lumière naturelle, éblouissement et besoins énergétiques

C'est en particulier sur les postes de travail et d'apprentissage que s'imposent simultanément les exigences de garantir un lien vers l'extérieur, de disposer d'une lumière naturelle suffisante et de permettre le tra-

vail sur un écran. On peut à cet égard parler d'une triple conjonction antagoniste entre les objectifs que sont un éclairage naturel optimal, une absence d'éblouissement et les apports thermiques. Du point de vue énergétique, ces derniers doivent en général être maximisés en hiver et réduits au minimum en été.

Le facteur primordial permettant d'obtenir une bonne protection thermique en été est la présence d'un dispositif de protection solaire suffisant pour tous les éléments de construction transparents, qui autorise la vue sur les alentours et laisse passer suffisamment de lumière naturelle. Au-delà de la résistance au vent, un aspect essentiel est le système de contrôle: la meilleure protection solaire (même mobile) n'a pas d'intérêt si elle n'est pas commandée à bon escient. La caméra de mesure de luminance à résolution spatiale présentée par l'illustration 2 permet par exemple de déterminer la probabilité de l'éblouissement en fonction d'une position donnée des lamelles de la protection solaire. L'illustration 3 présente ainsi à gauche l'image fournie par la caméra et à droite l'évaluation de la probabilité d'éblouissement. Pour l'état actuel de la lumière naturelle et dans la perspective présentée, il n'y a pas lieu de s'attendre à un éblouissement gênant même sans abaisser le store à lamelles. Ensuite, à l'aide d'un modèle de calcul ajusté aux mesures correspondantes, par exemple pour une protection solaire donnée, on peut réaliser des simulations sur toute une année. À titre d'exemple d'un comportement très actif de l'utilisateur (cf. illustration 4), les illustrations 5 à 7 présentent des résultats de simulations pour le laboratoire de la lumière avec une façade vitrée orientée vers l'ouest. La façade est équipée d'une protection solaire sous la forme d'un store à lamelles, et un éclairage de 500 lux a été défini pour la surface de travail. La température ambiante doit se situer entre 20 °C et 26 °C, la pièce disposant d'une climatisation mécanique. L'utilisateur regarde en direction de la façade.

On calcule l'utilisation de la lumière naturelle et artificielle, l'éblouissement et le besoin énergétique pour le chauffage et la climatisation. L'illustration 5 présente l'autonomie en lumière naturelle sur l'année, l'illustration 6 l'éblouissement au poste de travail pour différentes positions des lamelles. Comme dans la simulation la pièce est orientée à l'ouest, l'éblouissement n'intervient que pendant les heures de l'après-midi. L'illustration 7 indique le besoin de chauffage en hiver, le besoin de climatisation en été et le besoin en électricité pour l'éclairage dans les cas «stores à lamelles toujours fermés» et avec une manœuvre de la protection solaire par l'utilisateur très actif de l'illustration 4. Les calculs s'effectuent avec le logiciel DIVA for Rhino [2].

### Confort thermique au poste de travail

En matière juridique, la SIA propose des cours sur la nouvelle version de la norme SIA 180 [7]. Pour l'essentiel, cette norme vise à ce que tout espace utilisé un certain temps par des personnes soit agréable et saine, et à ce que le bâtiment soit conçu pour apporter cette qualité d'environnement intérieur de manière aussi naturelle que possible. Dans le laboratoire de la lumière et des façades, une station mobile de mesure permet de déterminer le confort thermique nécessaire à chaque situation typique de poste de travail (lire l'encadré sur le confort thermique). L'illustration 8 présente cette station de mesure. Le niveau de mesure supérieur se situe à hauteur de tête en position assise (1,10 m), le niveau inférieur à la hauteur des chevilles (0,10 m): les courants d'air ressentis au niveau de la tête et des chevilles sont des causes fréquentes de plaintes.

L'illustration 8 présente un exemple de mesures réalisées sur une courte durée. Les valeurs mesurées sur un poste de travail montrent des températures de l'air ( $\theta_i$ ) et de rayonnement ( $\theta_r$ ) élevées, d'environ 26 °C,

une vitesse d'écoulement basse, de l'ordre de 0,03 à 0,04 m/s et une humidité relative de l'air  $\phi$  d'environ 37%. Le calcul du pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD) donne une valeur de quasiment 24%; il est donc trop élevé. Pour les calculs, on table sur une activité de bureau et sur des vêtements du type costume (niveau d'activité 1,2 met, isolement vestimentaire 0,9 clo). Avec une tenue plus légère (valeur de 0,5 clo), la proportion d'insatisfaits peut être réduite à 10% (une valeur correcte). En rapportant ce résultat à une situation réelle de travail, on peut en déduire qu'une consigne vestimentaire prévoyant dans cet espace le port d'un costume entraîne un (trop) faible niveau de confort pour les utilisateurs. La station mobile de mesure peut bien évidemment être utilisée dans n'importe quel bâtiment, dès lors qu'il existe par exemple des plaintes concernant le confort thermique et que ces dernières sont en lien avec la proximité d'une façade.

### Apparition de courants d'air, courants descendants d'air froid

La vitesse locale d'écoulement de l'air peut être mesurée à l'aide de capteurs très sensibles (voir illustration 9). À titre d'exemple, dans les pièces vitrées sur toute leur hauteur, malgré les triples vitrages isolants, les courants descendants d'air froid sont un sujet de discussion toujours d'actualité. Les caractéristiques de conception sont fournies par la norme SIA 180 [7] et représentées par l'illustration 10. Si, pour une hauteur de pièce ou de vitrage donnée, la valeur U du vitrage est trop faible, on doit s'attendre en fonction de la température extérieure à des courants descendants d'air froid inacceptables. On relève à cet effet des mesures à une distance d'un mètre de la façade, à hauteur de cheville. Le graphique à droite de l'illustration 10 représente l'influence de la distance à la façade sur la valeur U qui doit être respectée par le vitrage pour une vitre de trois mètres de hau-

teur; en cas de problème, l'une des options pourrait consister à éloigner quelque peu la zone des sièges de la façade. Dans l'exemple présenté, avec une température extérieure de -10 °C et pour une activité statique (travail en position assise, courants d'air au niveau des chevilles) à un mètre de la façade, la valeur U du vitrage devrait être inférieure à 0,40 W/(m<sup>2</sup>·K). À une distance de 1,40 mètre de la façade, une vitre dotée d'une valeur U d'environ 0,53 W/(m<sup>2</sup>·K) serait déjà suffisante.

On peut étudier au laboratoire de la lumière et des façades les mesures possibles et leurs effets sur le risque de formation de courants d'air sur le poste de travail. Toutefois, la climatisation artificielle par l'extérieur (pour étudier en toute saison les situations hivernales) n'est pas possible. Le laboratoire est exposé aux conditions météorologiques naturelles. L'équipement de mesure des vitesses d'écoulement d'air peut être utilisé de façon flexible dans n'importe quel bâtiment.