

# Informationspaket

# Energieeffiziente

# Fenster und Verglasung

3., vollständig überarbeitete Auflage

Andreas Wagner

LESEPROBE

Herausgeber

 **FIZ Karlsruhe**

 **SOLARPRAXIS**

 **BINE**  
Informationsdienst

# Inhaltsverzeichnis

|  |     |
|--|-----|
| <b>Vorwort</b> .....   | 5   |
| <b>1 Fenstertechnologie im Wandel</b> .....                                | 6   |
| <b>2 Gestaltung und Funktion von Fenstern</b> .....                        | 9   |
| 2.1 Gestalterische Aspekte .....   | 9   |
| 2.2 Funktionale Anforderungen .....  | 12  |
| <b>3 Bauphysikalische Grundlagen und Kennwerte</b> .....                   | 18  |
| 3.1 Licht- und Strahlungsdurchlässigkeit .....                             | 18  |
| 3.2 Wärmetransport .....   | 23  |
| 3.3 Thermische Behaglichkeit .....   | 28  |
| 3.4 Taupunktunterschreitung .....  | 31  |
| 3.5 Schallschutz .....   | 32  |
| 3.6 Tageslichtnutzung .....  | 33  |
| <b>4 Verglasungen und Rahmen für verbesserten Wärmeschutz</b> .....        | 39  |
| 4.1 Thermische Qualität und Behaglichkeitsaspekte .....                    | 39  |
| 4.2 Selektive Beschichtungen für Wärme- und Sonnenschutzverglasungen ..... | 43  |
| 4.3 Gasfüllungen im Scheibenzwischenraum .....                             | 49  |
| 4.4 Neue Werkstoffe für den Randverbund .....                              | 52  |
| 4.5 Der Rahmen für sehr gut wärmedämmende Verglasungen .....               | 57  |
| 4.6 Übersicht über marktverfügbare Verglasungen .....                      | 62  |
| <b>5 Innovativer Sonnenschutz und Lichtlenkung</b> .....                   | 65  |
| 5.1 Sonnen- und Blendschutzsysteme .....                                   | 65  |
| 5.2 Sonnenschutzverglasungen .....   | 69  |
| 5.3 Schaltbare Gläser zur Steuerung von Solarstrahlung und Licht .....     | 71  |
| 5.4 Richtungsselektive und lichtlenkende Verglasungen .....                | 77  |
| <b>6 Bautechnische Aspekte – das Fenster in der Gebäudehülle</b> .....     | 83  |
| 6.1 Der Einbau von Fenstern .....  | 84  |
| 6.2 Erhaltung und energetische Sanierung von Fenstern .....                | 89  |
| <b>7 Energie und Ökologie</b> .....  | 94  |
| 7.1 Das Fenster in der Energiebilanz des Gebäudes .....                    | 94  |
| 7.2 Ökologische Bewertung von Fenstern .....                               | 109 |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| <b>8</b>  | <b>Berechnungsprogramme für Fenster</b> .....                 | 117 |
| <b>9</b>  | <b>Zitierte Literatur und Abbildungsverzeichnis</b> .....     | 122 |
| 9.1       | Zitierte Literatur .....                                      | 122 |
| 9.2       | Abbildungsverzeichnis .....                                   | 128 |
| <b>10</b> | <b>Laufende und abgeschlossene Forschungsvorhaben</b> .....   | 132 |
| 10.1      | Laufende und kürzlich abgeschlossene Forschungsvorhaben ..... | 132 |
| 10.2      | Forschungsberichte .....                                      | 135 |
| <b>11</b> | <b>Weiterführende Literatur</b> .....                         | 139 |
| <b>12</b> | <b>Autor</b> .....  | 144 |

## Vorwort

Weitgehend unspektakulär hat sich in den letzten beiden Jahrzehnten ein Wandel vollzogen: Fenster mauserten sich von der einfachen Gebäudekomponente zum High-Tech-Bauteil mit einem breiten Spektrum von Eigenschaften und Funktionen.

Nachdem anfangs die größten Fortschritte bei den Wärmeschutzverglasungen erzielt wurden, konnten in den vergangenen 10 Jahren die Fensterrahmen deutlich aufholen. Und neuerdings ermöglichen innovative Glastechnologien, die Nutzung von Tageslicht und Sonnenwärme bedarfsgerechter zu steuern.

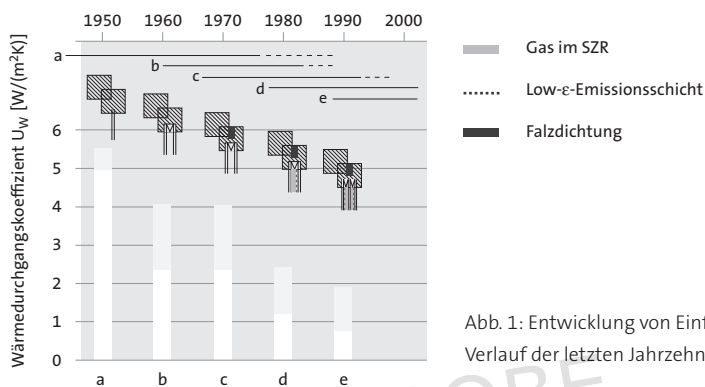
Daraus ergibt sich ein enormer Gestaltungsspielraum bei der Planung von Gebäudefassaden für den Winter, weil Wärmeschutz und thermischer Komfort mit der heute verfügbaren Glas- und Fenstertechnologie gut beherrschbar sind. Ein größeres Augenmerk ist jetzt vielmehr auf den Wärmeeintrag in Gebäude im Sommer zu legen. Hier geht es um die konsequente Vermeidung hoher Kühllasten bei gleichzeitiger Tageslichtnutzung. Nur eine ganzheitliche Bewertung von Gebäuden kann darüber Auskunft geben, in welchem Kontext eine Fassadenlösung unter energetischen und wirtschaftlichen Aspekten vorteilhaft ist. Einen Bewertungsmaßstab hierfür bietet u.a. die neue EnEV, weil darin die Energieaufwendungen für Kühlen und Klimatisieren, Beleuchten und Lüften bei der energetischen Gebäudeoptimierung berücksichtigt werden. Die Fassade mit energieeffizienten Fenstern und Verglasungen rückt also unter neuem Blickwinkel in den Fokus der Planer.

Die 3. Auflage dieses Informationspakets zum Thema Fenster wurde in dem Sinne komplett aktualisiert und um einige Schwerpunkte wesentlich erweitert. So gibt es neue Akzente zur neuen EnEV bzw. zur DIN V 18599, zur thermischen Behaglichkeit und zum Thema Tageslichtautonomie sowie Strombedarf für die künstliche Beleuchtung. Außerdem geht es in diesem Buch um die Nutzbarkeit solarer Energiegewinne und um die Energiebilanz von Fenstern im Winter und im Sommer. Auch die Kapitel zum optimierten Einbau von Superfenstern in Gebäude mit unterschiedlichem Wärmeschutzstandard und zur Sanierung von Fenstern wurden gründlich aktualisiert.

# 1. Fenstertechnologie im Wandel

Von den ersten Gegenständen aus Glas bis zur heutigen Produktpalette an Gebrauchs- und Kunstgegenständen und Funktionsgläsern spannt sich ein weiter Bogen an materialwissenschaftlichen und herstellungstechnologischen Entwicklungen. Speziell im Bauwesen fanden in den letzten zwanzig Jahren wahre Quantensprünge bei der Verbesserung Wärme dämmender und optischer Eigenschaften von Verglasungen statt (Abb. 1). Während im älteren Gebäudebestand Zweischeiben-Isolierverglasungen oder Doppelverglasungen in Verbund- und Kastenfenstern noch weitgehend Standard sind, kommen seit 1995 ausschließlich so genannte Wärmeschutzverglasungen mit hauchdünnen Silber-schichten und Edelgasfüllungen zum Einsatz. Die erhöhten Anforderungen an den Wärmeschutz in der damaligen Wärmeschutzverordnung bzw. deren Fortschreibungen bis zur heute gültigen Energieeinsparverordnung (EnEV) haben diese Entwicklung vorgezeichnet. Über die Schichtparameter ist auch die Strahlungs- und Lichtdurchlässigkeit der Verglasungen in weitem Maße gezielt einstellbar. Ausgelöst durch die ebenfalls seit Mitte der 90er Jahre vehement vorangetriebene Entwicklung des Passivhaus-Standards und dem damit verbundenen Ziel, sämtliche thermische Schwachpunkte der Gebäudehülle konsequent zu eliminieren, wurden zudem bedeutende Fortschritte bei der Verringerung des Wärmefflusses über Glasabstandshalter und Fensterrahmen erzielt.

6



Somit stehen heute hochwertige Fenster am Markt zur Verfügung, deren Dämmwerte zum Teil denen von Außenwänden älterer Gebäude nicht nachstehen. Weiter noch: das Fenster als bislang thermisch schwächstes Bauteil der Gebäudehülle kann nun über Solargewinne effektiv zur Beheizung eines Gebäudes beitragen – passiv-solare Gebäudekonzepte führen damit auch in unseren Breiten zu Heizenergieeinsparungen. Das nächste Entwicklungsziel in diesem Kontext stellen Vakuum-Verglasungen mit noch höherer Dämmwirkung dar, bei denen sich Scheibenzwischenraum und damit die Gesamtdicke des Glasverbunds deutlich reduzieren. Ein weiterer Fokus aktueller Forschungs-

arbeiten liegt auf so genannten „schaltbaren Gläsern“, die den Weg zu dynamischen Klimahüllen von Gebäuden – vorwiegend im Nichtwohnungsbau – öffnen. Gegenüber heute verfügbaren „statischen“ Verglasungen und mechanischen Verschattungssystemen sollen Energie- und Lichtflüsse bedarfsgerechter und ohne mechanischen Verschleiß gesteuert oder geregelt werden können. Darüber hinaus wird an Mikrostrukturen für Gläser gearbeitet, die zu einer weiteren Verbesserung der Strahlungs- oder Lichtdurchlässigkeit führen bzw. Tageslicht gezielt umlenken.

Der Fortschritt in der Verglasungstechnologie spiegelt sich natürlich wider in der Formsprache der Architektur, die ihrerseits immer wieder Impulse für Weiterentwicklungen liefert. Der Wunsch nach natürlichem Licht und Sonnenwärme im Innenraum, in dem sich heute der Großteil unseres Lebens abspielt, oder die Erweiterung des Wohn- bzw. Lebensraumes durch Klimapuffer sind wesentliche Leitgedanken für den Umgang mit dem Baustoff Glas. Hinzu kommen gestalterische Aspekte wie das vermeintliche Aufheben der Trennung zwischen innen und außen über kaum noch wahrnehmbare transparente Hüllen und die daraus entstehende Leichtigkeit von verglasten Baukörpern. Die stetig weiterentwickelten Techniken zum großflächigen Einsatz von Glas in der Fassade und die damit entstandene „entwerferische Freiheit“ haben jedoch bei Nichtwohngebäuden vielfach zu Gebäudekonzepten mit luftdicht abgeschlossenen Glasfassaden geführt, deren Raumklima nur noch durch technische Systeme kontrollierbar ist. Ein hoher Energieverbrauch für Heizen, Kühlen, Lüften und oft auch Beleuchten, hohe Investitions-, Betriebs- und Instandhaltungskosten – nicht zuletzt für die Reinigung der Fassaden – sowie eine oft geringe Nutzerzufriedenheit wegen des künstlichen Klimas sind der Preis für die architektonisch gewollte Abkopplung des (gläsernen) Baukörpers vom Außenklima.

Seit einigen Jahren gibt es wieder eine stärkere architektonische Auseinandersetzung mit der Wechselwirkung zwischen Innenraum- und Außenklima. Diese Entwicklung ist auf gestiegene Komfortansprüche zurückzuführen sowie auf ein erhöhtes Energie- und Umweltbewusstsein. Gewünscht wird eine individuelle Regelung des Raumklimas – hier spielt die Fensterlüftung weiterhin eine große Rolle. Was den Wärmeschutz und den Komfort im Winter angeht, wird die Gestaltungsfreiheit von Fassaden durch den bis heute erreichten technischen Stand der Glastechnologie kaum mehr eingeschränkt. Knackpunkt ist vielmehr der sommerliche Wärmeschutz, d.h. die Vermeidung von hohen Kühllasten. Inwieweit hier voll verglaste Fassaden, Glas-Doppelfassaden oder auch großflächige Glasdächer einen sinnvollen Beitrag zum Raumklimakonzept bzw. zur Reduzierung des Aufwandes an Gebäudetechnik leisten können, muss in Abhängigkeit der Nutzeranforderungen und des Außenklimas im Einzelfall geprüft werden. Vielfach hat sich so manche „intelligente“ Glasfassade in der Nutzungsphase als nicht-intelligenter Planungsansatz erwiesen.

## 2. Gestaltung und Funktion von Fenstern

Kaum ein anderes Bauteil spielt in der Architektur als Funktions- und Gestaltungselement eine ähnlich bestimmende Rolle wie das Fenster. Die Art der Anordnung transparenter Bauteile sowie die Festlegung ihrer Formate und Teilungen prägen entscheidend das Bild einer Fassade und verleihen dieser einen eigenen, charakteristischen Rhythmus. Die Reduktion der Bewertung von Fenstern allein auf gestalterische Aspekte wird jedoch ihrer Bedeutung für die Nutzungsqualität eines Gebäudes keineswegs gerecht. Fenster müssen eine Vielzahl von – zum Teil gegensätzlichen – Anforderungen erfüllen und besitzen insbesondere bei großflächigem Einsatz in Nichtwohngebäuden eine Schlüsselrolle hinsichtlich Nutzerkomfort und Energieverbrauch der Gebäudetechnik. Ein hoher thermischer und visueller Komfort sichert die Gesundheit und Produktivität der Nutzer, während die Minimierung des Energieverbrauchs für Heizung, Kühlung und Beleuchtung geringe Betriebskosten garantiert.

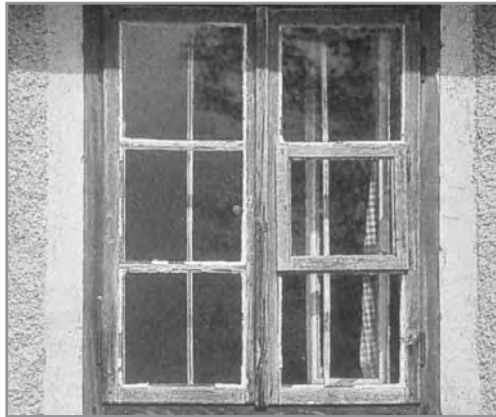
Fenster können nur dann eine hohe Lebensdauer erreichen, wenn keine planungs- oder ausführungsbedingten Funktionsmängel oder gar Schäden während der Nutzungszeit auftreten. Dazu muss der Architekt bereits in der Entwurfsphase sämtliche nutzungsspezifischen Anforderungen erfassen und mit seinen gestalterischen Zielen in Einklang bringen. In der weiteren Ausführungsplanung und Bauausführung gilt es dann, die einzelnen Funktionsmerkmale (z.B. Wärme- und Schallschutz) konkret zu spezifizieren und beim Einbau sorgfältig zu überprüfen. So kann z.B. das Vertauschen von Außen- und Innenseite einer Verglasung bei deren Einbau den Solarstrahlungsdurchgang stark beeinflussen und somit einen ungewollten Sonnenschutz oder zu hohen Energieeintrag hervorrufen. Je besser die gestalterische Lösung für die jeweilige Fensterkonstruktion an die Nutzeranforderungen angepasst ist (z.B. die Rahmenstärke und Beschläge von großen, zu öffnenden Fensterflügeln), desto höher die spätere Gebrauchstauglichkeit und folglich umso geringer die Gefahr von nutzungsbedingten Ausfällen.

### 2.1 Gestalterische Aspekte

Während die ersten Fenster in der Römerzeit – transluzente Gussglasscheiben – vornehmlich dem Witterungsschutz dienten, wurden sie ab dem Mittelalter gezielt als Gestaltungselement für Raum und Licht eingesetzt. Bedeutende Zeugnisse dieser Epoche sind die gotischen Kirchen. Ab dem 13. Jahrhundert hielten Glasfenster auch in Profanbauten Einzug, wobei die Scheiben in Blei gefasst und zu kleinformatigen Fenstern zusammengesetzt wurden. Die Aneinanderreihung dieser Fenster ermöglichte die Gestaltung ganzer Fensterwände, wie sie z.B. aus mittelalterlichen Rathäusern bekannt

sind. Im ausgehenden Mittelalter stand Spiegelglas als technologischer Fortschritt im Blickpunkt der Architektur, das vornehmlich in Innenräumen von Barockschlössern eingesetzt wurde, um diese weiter und heller erscheinen zu lassen.

Der Wunsch, subtropische Pflanzen im mittel- und nordeuropäischen Klima zu halten, führte im 19. Jahrhundert zu einem weiteren markanten Abschnitt der Glasarchitektur – dem Bau von Gewächshäusern, etwas später gefolgt von großen Ausstellungshallen. Dies wurde möglich durch das Beherrschen weit gespannter Glas-Eisenkonstruktionen und die Industrialisierung der Glasherstellung. Augenfälligstes Beispiel ist der Kristallpalast in London – aber auch viele Orangerien und verglaste Passagen und Bahnhofshallen in Großstädten stehen für diese Epoche. Im Wohnungsbau eröffneten Wintergärten und verglaste Loggien mit meist kleinteiligen Glasfassaden die Möglichkeit einer temporären Nutzung von Sonnenlicht.

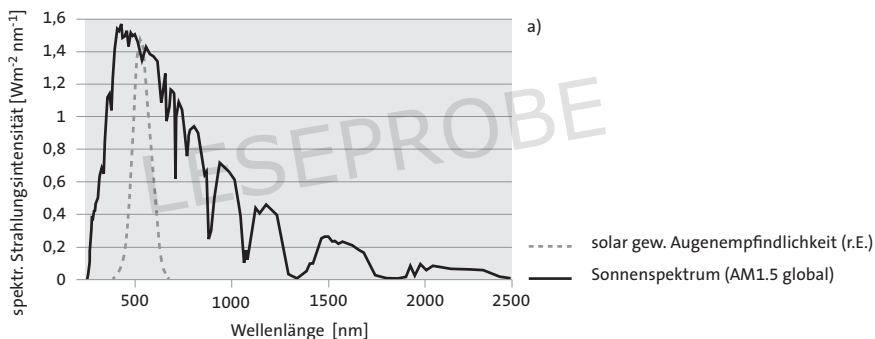


## 3. Bauphysikalische Grundlagen und Kennwerte

### 3.1 Licht- und Strahlungsdurchlässigkeit

Für die Beurteilung des Strahlungsdurchgangs durch transparente Bauteile spielt das Spektrum des Sonnenlichts eine wichtige Rolle. Nur ca. 50% der auf die Erde auftreffenden Solarstrahlung entfällt auf den Bereich des sichtbaren Lichts mit Wellenlängen zwischen 380 und 780 Nanometern<sup>2</sup>. Die andere Hälfte der Strahlungsleistung liegt in Wellenlängenbereichen, die für das menschliche Auge nicht wahrnehmbar sind, nämlich etwa 6% im Bereich der Ultraviolettstrahlung (290 bis 380 nm) und ca. 44% im nahen Infrarotbereich zwischen 780 und 2.500 nm [4]. Dabei hängt die aktuelle spektrale Verteilung stark von dem zurückgelegten Weg der Strahlen durch die Atmosphäre und den jeweiligen meteorologischen Randbedingungen ab. Aus diesem Grund werden sämtliche optischen Kenndaten von Verglasungen auf ein Referenzspektrum bezogen, das die globale Strahlungsleistung (Direkt- und Diffusstrahlung) nach Durchgang durch das 1,5-fache der Atmosphäre wiedergibt (AM 1,5). Ebenso wird bei der Helligkeitsempfindlichkeit des menschlichen Auges verfahren, die für verschiedene (solare) Beleuchtungssituationen sehr unterschiedlich ist. Auch hier bezieht man sich auf das AM 1,5 Spektrum, das mit der Helligkeitsempfindlichkeit gewichtet wird [5].

Neben dem Solarspektrum muss auch die Wärmestrahlung im fernen Infrarotbereich berücksichtigt werden, die bis zu Wellenlängen von 400.000 nm wirksam ist. Bei einem Temperaturstrahler auf Raumtemperatur liegt das Maximum der Strahlungsleistung bei etwa 10.000 nm. Abb. 4 zeigt das AM 1,5 Solarspektrum und die gewichtete Helligkeitsempfindlichkeit des Auges zusammen mit den Spektren eines idealen Temperaturstrahlers (Planck'scher Strahler) bei unterschiedlichen Temperaturen.



<sup>2</sup> 1 nm = 10<sup>-9</sup> m

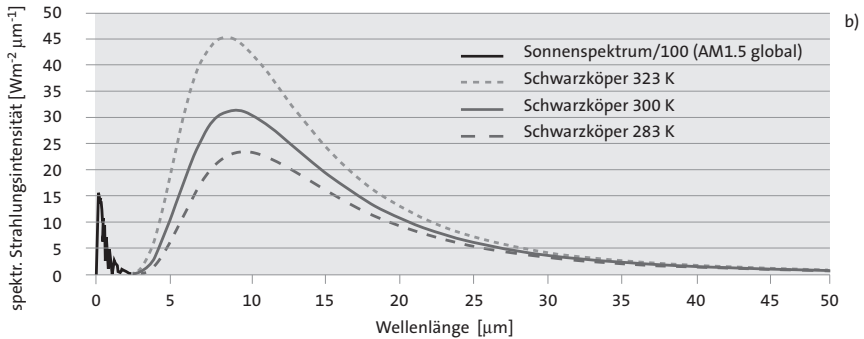


Abb. 4: Spektralbereiche der Solarstrahlung (a) und Wärmestrahlung (b). Das Solarspektrum in (b) ist um einen Faktor 100 verkleinert dargestellt

Die durch eine Verglasung in den Raum einfallende Solarstrahlung (Abb. 4a) bzw. die aus dem Raum an die Umgebung abgegebene Wärmestrahlung (Abb. 4b) kann über die optischen Eigenschaften der Glasscheiben quantifiziert werden. Aus Gründen der Energieerhaltung gilt, dass die Summe der Anteile von durchgelassener, absorbierter und reflektierter Strahlung für jede Wellenlänge  $\lambda$  immer eins (100%) ergeben muss:

$$\tau(\lambda) + \alpha(\lambda) + \rho(\lambda) = 1$$

mit  $\tau$  Transmissionsgrad [ ]

$\alpha$  Absorptionsgrad [ ]

$\rho$  Reflexionsgrad [ ]

Sämtliche optische Kenndaten (auch die im Folgenden aufgeführten) gelten stets für den Strahlungseinfall senkrecht auf die Verglasungsebene, und sie werden auf die unverglaste Wandöffnung bezogen. Zur Bewertung des Solarstrahlungsdurchgangs durch eine Verglasung werden Transmissions-, Absorptions- und Reflexionsgrad als integrale Werte über das gesamte Solarspektrum angegeben ( $\tau_e$ ,  $\alpha_e$ ,  $\rho_e$ ), während für die Lichtdurchlässigkeit nur der Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts berücksichtigt wird.

Kennzeichnend für alle physikalischen Körper ist weiterhin ihr Vermögen, Wärme abzustrahlen (Emission). Dieses Emissionsverhalten wird über den Emissionsgrad  $\varepsilon$  beschrieben, der bei schwarzen Körpern eins und bei realen (grauen) Strahlern immer kleiner eins ist<sup>3</sup>. Bei fester Wellenlänge  $\lambda$  und Temperatur  $T$  gilt für alle Körper:

$$\alpha(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T)$$

<sup>3</sup> Reale Körper sind in der Regel selektive Strahler, d.h. ihr Emissionsgrad ist abhängig von der Lichtwellenlänge

## 4. Verglasungen und Rahmen für verbesserten Wärmeschutz

### 4.1 Thermische Qualität und Behaglichkeitsaspekte

Für die energetische Bewertung einer Verglasung bzw. eines Fensters ist es interessant, neben den in Kap. 3.1 und 3.2 vorgestellten Kennwerten eine Größe heranzuziehen, welche die potenziellen Solargewinne direkt mit den Wärmeverlusten verrechnet. Hierzu dient der äquivalente Wärmedurchgangskoeffizient

$$U_{\text{eq,w}} = U_{\text{w}} - g \times S_{\text{F}} \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{K}].$$

Er bewertet das über die Heizperiode anfallende Solarstrahlungsangebot  $S_{\text{F}}$  orientierungsabhängig und gibt durch sein Vorzeichen Auskunft über Netto-Energiegewinne (+) bzw. -verluste (–) eines Fensters während der Heizperiode. Abb. 18 zeigt den äquivalenten U-Wert für verschiedene Verglasungen und Rahmen eines Fensters mit Standardmaßen. Aus der Grafik wird deutlich, welches Heizenergieeinsparpotenzial in hochwertigen Fenstern mit niedrigem  $U_{\text{w}}$ -Wert steckt, aber auch wie groß der Einfluss von Randverbund, Rahmen und Einbausituation ist. Bei Betrachtung des reinen Verglasungsanteils weist eine breite Palette der heute verfügbaren Wärmeschutzverglasungen bei Süd- bzw. Ost/West-Orientierung Energiegewinne über die Heizperiode auf und selbst nach Norden orientierte Verglasungen können mit entsprechenden Kennwerten eine neutrale Energiebilanz erreichen. Dies ist ein wichtiger Aspekt für die Planung von Fassaden hinsichtlich des Verhältnisses von Glas- und Rahmenflächenanteilen.

Für Verglasungen und Rahmen von Passivhäusern, deren extrem strenge Anforderungen an die thermische Qualität der Gebäudehülle aus der Limitierung der maximalen Heizleistung auf  $10 \text{ W}/\text{m}^2$  resultieren<sup>14</sup> und damit aus dem Verzicht auf eine konventionelle Warmwasserheizung, wurden spezielle Kriterien formuliert [23]:

Verglasung:  $U_{\text{g}} - 1,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \times g < 0$

Gesamtfenster inkl. Rahmen:  $U_{\text{w}} \leq 0,8 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  (mit  $U_{\text{g}} = 0,7 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ )

<sup>14</sup> entsprechend einem Heizwärmebedarf von  $15 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{a}$  über die gesamt Heizperiode

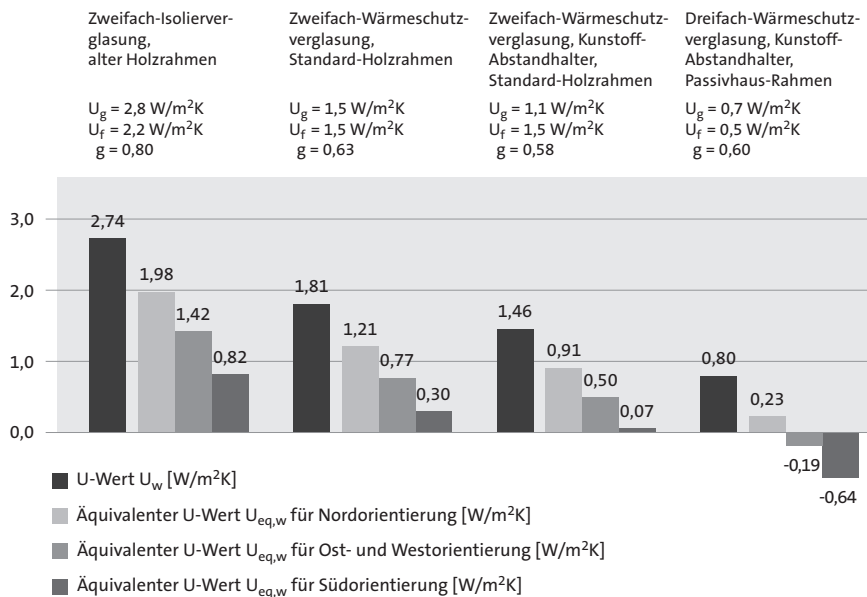


Abb. 18:  $U_w$ -Wert und äquivalenter Wärmedurchgangskoeffizient  $U_{eq,w}$  verschiedener Fenstertypen bei unterschiedlichen Orientierungen und unter Berücksichtigung der Einbausituation

Über  $U_{w,eff}$  wird zusätzlich die Wärmebrückenwirkung der jeweiligen Einbausituation berücksichtigt; hier gilt als Grenzwert  $U_{w,eff} \leq 0,85 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Aus den Ungleichungen wird klar, dass die (technologisch bedingte) Abnahme des  $g$ -Wertes mit kleiner werdendem  $U$ -Wert für Südverglasungen so gering wie möglich ausfallen sollte, um die besonders für Wohngebäude im Passivhaus-Standard unverzichtbaren solaren Gewinne nicht zu sehr zu dezimieren.

Die Anforderungen an die thermische Qualität von Fenstern und insbesondere von (großflächigen) Verglasungen resultieren in erster Linie aus strengeren energetischen Anforderungen an Gebäude. Entsprechend hochwertige Fenster beeinflussen jedoch auch den thermischen Komfort dahingehend, dass sich u.U. der Heizkörper nicht mehr direkt unter dem Fenster befinden muss, um Strahlungsasymmetrie und Kaltluftabfall zu kompensieren (vergleiche Kap. 3.3). Entscheidende Einflussgrößen sind neben der Fenstergröße und-qualität die Art der Lüftung sowie Konvektionsquellen im Raum. Bei Außenluftdurchlässen in der Außenfassade kann auf den außen liegenden Heizkörper nicht verzichtet werden.

Besonders hohe Anforderungen gelten auch hier wieder für Passivhäuser, die nur über den Zuluftstrom der Lüftungsanlage beheizt werden. Demzufolge werden z.B. deutlich

# 5 Innovativer Sonnenschutz und Lichtlenkung

## 5.1 Sonnen- und Blendschutzsysteme

Primäre Aufgabe eines Sonnenschutzsystems ist der Schutz des Innenraumes vor Überwärmung durch solare Einstrahlung. Insbesondere im Zusammenhang mit (fensternen) Arbeitsplätzen entstehen aber weitere Anforderungen wie die Wahrung des Außenbezugs über möglichst lange Zeiten sowie ein effektiver Blendschutz. Außerdem soll das bei direkter Sonneneinstrahlung besonders hohe Tageslichtangebot zur Raumbeleuchtung genutzt werden. Diese sich teilweise widersprechenden Anforderungen sind nur schwer zu erfüllen, da die solare Einstrahlung neben ihrer spektralen Verteilung eine für jeden Ort unterschiedliche, winkelabhängige und zeitliche Verteilung ihres Diffus- und vor allem des Direktstrahlungsanteils aufweist [5]. Die Herausforderung besteht also grundsätzlich darin, mit der Verglasung bzw. dem Fenster-/Fassadensystem zu jeder Zeit den notwendigen Schutz (Wärmeschutz, Reduktion der Kühllast, Blendschutz) mit der bestmöglichen Versorgung (Tageslichtbeleuchtung, Durchsicht, Solarbeiträge zur Beheizung) zu kombinieren [42].

Hinsichtlich der reinen Sonnenschutzfunktion sind neben den entstehenden solaren Wärmelasten für den Innenraum auch die direkte Besonnung von Personen sowie die Wärmeabstrahlung von der inneren Oberfläche des Sonnenschutzes oder der Verglasung („Kachelofeneffekt“) zu beachten. Die letzten beiden Faktoren können entscheidend zur Minderung des thermischen Komforts beitragen. Bei der Optimierung des Blendschutzes steht man vor dem Problem, einerseits vor störenden Blendquellen – beispielsweise der Sonne – schützen zu müssen und andererseits den Sichtbezug nach Außen zu gewährleisten. Die wesentliche Anforderung an den Blendschutz ist die Reduktion der Leuchtdichte im Sichtfeld. Zu beachten ist dabei, dass die Blendwirkung auch von der Richtung der Blendquelle sowie den Kontrasten, z.B. eines Bildschirms, abhängt [21]. Die individuelle Wahrnehmung von Blendung weist eine erhebliche Bandbreite auf, ein Blendschutz sollte deshalb soweit wie möglich einem Arbeitsplatz zugeordnet sein.

Das Tageslichtangebot hängt wesentlich von geometrischen Faktoren ab, die bereits früh im Planungsprozess fixiert werden. Um Tageslicht nutzen zu können, müssen die Fassade und der dahinter liegende Raum bestimmte Anforderungen erfüllen, die unter dem Begriff „Raumpotenzial“ zusammengefasst werden. Wesentliche Qualitätsmerkmale der Fassade sind in diesem Zusammenhang die Größe und Position der Fenster sowie die optischen Eigenschaften der Verglasung bzw. des Sonnen-/Blendschutzes. Diese umfangreichen Anforderungen an Sonnen- und Blendschutzsysteme werden in

der prEN 14501 in Form von Leistungsmerkmalen zusammengefasst, die zur Produktbeschreibung bzw. Spezifikation herangezogen werden können. Über physikalische Parameter (überwiegend optische Kenngrößen) kann weiterhin eine Klassifizierung der Systeme vorgenommen werden. Die dazugehörige prEN 14500 liefert die anzuwendenden Prüf- und Berechnungsverfahren. Damit ist erstmals eine einheitliche Beschreibung und Bewertung von Sonnen- und Blendschutzsystemen erreicht worden, mit der sich unterschiedliche Produkte vergleichen lassen.

Es ist offensichtlich, dass Verglasungen mit ihren statischen Funktionen das oben beschriebene Anforderungsspektrum nicht in vollem Umfang abdecken können, weshalb in der Regel zusätzliche mechanische Systeme zur Steuerung des Strahlungs- und Lichteintrags verwendet werden. Aus wirtschaftlichen Gründen wird dabei meist nur ein System (neben einer optimierten Verglasung) eingesetzt, um die Sonnen- und Blendschutzfunktion zu gewährleisten, wenngleich die Einsatzzeiten und -bedingungen nicht immer übereinstimmen müssen – z.B. im Winter, wenn wegen der tief stehenden Sonne ein Blendschutz erforderlich ist, solare Gewinne aber genutzt werden können.

66 Auf dem Markt steht heute eine breite Palette an Produkten zur Verfügung (siehe z.B. [43]), mit denen auf das dynamische Strahlungsangebot recht gut reagiert werden kann, allerdings mit unterschiedlicher Einschränkung der Durchsicht. Aus Abb. 37 ist ersichtlich, dass außen liegende, bewegliche Sonnenschutzvorrichtungen den wirksamsten Schutz vor Erwärmung im Innenraum bieten. Die sich widersprechenden Anforderungen an Sonnen-, Blendschutz und Sichtbezug lassen sich sehr gut durch Jalousien mit unterschiedlich profilierten und verstellbaren Lamellen erfüllen, bei denen über weite Winkelbereiche der direkte Strahlungsdurchgang vermieden werden kann (cut off Winkel) und doch noch ein zufrieden stellender Ausblick erreicht wird. Mit diesen Systemen kann – z.B. mit Unterstützung durch eine automatische Steuerung – auch einem oft zu beobachtenden Nutzerverhalten entgegen gewirkt werden, den Sonnenschutz erst dann zu aktivieren, wenn er als Blendschutz benötigt wird. Beschattungen mit zusätzlich unabhängig verstellbaren Lamellen im Überkopfbereich stellen die beste Lösung hinsichtlich eines kombinierten Sonnen- und Blendschutzes mit gleichzeitiger Tageslichtnutzung dar. Abb. 38 zeigt die Lichtumlenkung an den oberen horizontal ausgerichteten Lamellen und die damit erzielbare Raumausleuchtung mit Tageslicht.

## 6 Bautechnische Aspekte – das Fenster in der Gebäudehülle

Fensterkonstruktionen lassen sich auf die in Abb. 54 gezeigten Grundtypen zurückführen. Das Einfachfenster besteht aus einem Blendrahmen und einem oder mehreren nebeneinander liegenden Flügeln mit Ein-, Zwei- oder Dreischeibenverglasung. Beim Verbundfenster liegen zwei Fensterflügel hintereinander, die über einen Beschlag miteinander verbunden sind und einen gemeinsamen Drehpunkt besitzen. Die Trennung der Flügel erfolgt in der Regel nur zu Reinigungszwecken. Durch die Kombination von Ein- und Zweischeibenverglasungen kann der Wärme- und Schallschutz verbessert werden. Kastenfenster bestehen aus zwei Einfachfenstern, deren Blendrahmen über ein umlaufendes 10 bis 15 cm breites Futter (Kasten) verbunden sind. Beide Flügel haben eigene Drehpunkte, auch hier können Mehrscheiben-Isolierverglasungen Anwendung finden. Kastenfenster werden in der Regel als Drehfenster ausgeführt, in Altbauten finden sich im Oberlichtbereich auch Kipp- und Klappfenster.

Daneben wurden in den vergangenen Jahren für den Bereich der Büro- und Verwaltungsgebäude eine ganze Reihe unterschiedlicher Glas-Doppelfassaden entwickelt, auf die wegen deren Vielfalt und Komplexität hier nicht weiter eingegangen werden soll. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen durch verschiedenartig integrierte Fenster sowie verschiedene Luftführungs- und Öffnungskonzepte in der äußeren Glashaut. Die anfängliche Euphorie, mit der diese Entwicklungen begrüßt wurden, hat sich zwar gelegt, Bedeutung behalten die Konzepte aber weiterhin im Hochhausbau, sofern trotz der hohen Windlasten zu öffnende Fenster gewünscht werden.

83

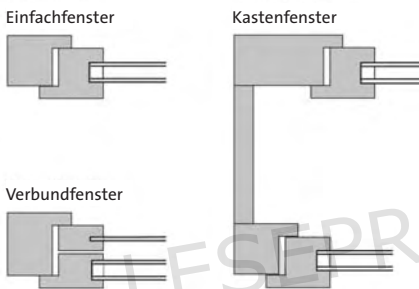


Abb. 54: Konstruktionsarten von Fenstern

Fenster sind vielfältigen Beanspruchungen ausgesetzt. Sie müssen sämtlichen mechanischen Belastungen durch Eigengewicht, Windlasten, Erschütterungen und (missbräuchliche) Nutzung standhalten und thermisch bedingte Längenänderungen und Verformungen kompensieren können.

Der Rahmen muss weiterhin eine schnelle und kontrollierte Abfuhr von anfallendem Regen- und Tauwasser ermöglichen sowie den Durchtritt von Schlagregen verhindern. Hinzu kommt ein dauerhafter Anschluss des Fensters an den Baukörper, wobei Winddichtigkeit und von innen nach außen abnehmende Dampfdichtigkeit zu gewährleisten sind.

In Kap. 4 wurden neue Werkstoffe und Rahmenkonstruktionen für energieeffiziente Fenster vorgestellt. Dabei ist entscheidend, dass diese Komponenten über die energetische Verbesserung hinaus auch sämtliche bautechnischen und nutzungsbedingten Anforderungen langfristig erfüllen, um Fenster von hoher Gebrauchstauglichkeit zu erhalten. In einem vom BMWi geförderten Forschungsvorhaben wurde die Gebrauchstauglichkeit sehr gut wärmedämmter Fenster im eingebauten Zustand bei Alt- und Neubauten eingehend untersucht [61]. Neben der wärmetechnischen Vermessung von Fenstern mit thermisch verbesserten Abstandhaltern wurde vor allem der erhöhte Glaseinstand in Rahmen auf die Gefahr von Glasbruch aufgrund thermischer Spannungen überprüft. Weiterhin wurden verschiedene Entwässerungssysteme von Rahmen hinsichtlich ihrer Gebrauchstauglichkeit getestet. Die Ergebnisse waren durchweg positiv und wiesen keine besonderen Problemfelder im Vergleich zu bekannten Konstruktionen auf.

Ein weiterer Aspekt bei der Betrachtung des Fensters in der Fassade sind thermische Schwachstellen, die beim Anschluss sehr gut wärmedämmender Verglasungen und Rahmen an die Außenwand entstehen können. Diese Anschlüsse müssen bauphysikalisch beherrscht werden, um erhöhten Wärmeabfluss verbunden mit niedrigen Oberflächentemperaturen oder sogar Tauwasser zu vermeiden. Gängige Anschlusssysteme und Montagerichtlinien müssen deshalb für neue Fensterkonstruktionen auf ihre Anwendbarkeit hin überprüft bzw. weiterentwickelt werden. In diesem Sinne sind auch Fensterkonstruktionen zu betrachten, bei denen bewusst – aus gestalterischen Gründen – auf sehr schmale Rahmenansichtsbreiten verbunden mit großen Glasflächen gesetzt wird. Mit sehr gut wärmedämmender Verglasung kann aufgrund des Flächenverhältnisses von Verglasung zu Rahmen durchaus ein guter Wärmedämmstandard für die Außenfassade erreicht werden, wenn auch nicht Passivhaus-Standard. Die je nach Flächenanteil mehr oder weniger zu Buche schlagende Wärmebrückenwirkung des Rahmens wird in diesem Fall in Kauf genommen, solange entweder durch die Qualität des Rahmens selbst oder durch die Art des Einbaus die bauphysikalischen Mindestanforderungen erfüllt sind.

## 6.1 Der Einbau von Fenstern

Um die o.g. Anforderungen an Fenster sicher erfüllen zu können, ist eine dreistufige Planung des Fenstereinbaus anzustreben: die Anordnung des Fensters im Wandquerschnitt, die Befestigung des Fensters und schließlich die Abdichtung nach innen und außen [41].

Die Befestigung von Fenstern soll diese in ihrer Lage halten und für die sichere Ableitung aller planmäßig einwirkenden Kräfte in den Baukörper sorgen. Kräfte in der Fensterebene werden durch (nur auf Druck zu belastende) Tragklötze abgeleitet, während Dübel, Laschen, Winkel, Anker etc. horizontal wirkende Kräfte aufnehmen. Dabei dürfen keine Verformungen auftreten, welche die Funktionsfähigkeit des Fensters beeinträchtigen

## 7 Energie und Ökologie

Ein Kriterium von zunehmender Bedeutung bei der Gebäudeplanung bzw. der Auswahl von Baumaterialien und Bauteilen stellt die gesamte durch ein Bauwerk verursachte Umweltbelastung dar, d.h. Verbrauch von Ressourcen, Beeinträchtigung und Inanspruchnahme von Luft, Boden, Wasser und Schäden an Lebewesen. Allerdings ist eine solche gesamtheitliche Betrachtung, in welcher der (prognostizierte) Energiebedarf während der Nutzungsphase nur einen Teilbereich ausmacht, äußerst komplex, da zusätzlich zu den Energieströmen sämtliche stofflichen Ströme und auch Emissionen vollständig und quantitativ über den gesamten Lebenszyklus erfasst oder geschätzt werden müssen. Auf Basis einer solchen Bilanzierung vom Rohstoffabbau über Transportvorgänge, Herstellung und die gesamte Nutzungsphase bis hin zum Re- oder Downcycling bzw. zur Entsorgung können dann Umwelteinwirkungen wie Treibhauseffekt, Bodenversauerung, Humantoxizität u. v. a. bestimmt und die Auswirkungen bewertet werden. Während die rein energetische Bilanzierung mit einer überschaubaren Anzahl festzulegender Randbedingungen weitgehend unproblematisch ist und für die Gebäudeoptimierung auch schon seit längerem herangezogen wird, haben sich Lebenszyklusanalysen und Ökobilanzen wegen ihrer hohen Komplexität noch nicht im Planungsalltag etabliert.

94

### 7.1 Das Fenster in der Energiebilanz des Gebäudes

Die in Kap. 2.2 formulierten Anforderungen an Fenster implizieren deren Einfluss auf den Energiebedarf zum Heizen, Lüften, Kühlen und Beleuchten. Wie stark jeder dieser Teilbereiche der Gesamtenergiebilanz eines Gebäudes jeweils berührt wird, hängt vom Außenklima, der Nutzungsart und den damit zusammenhängenden raumklimatischen Anforderungen sowie verschiedenen gebäude- und raumspezifischen Parametern ab. Zu diesen gehören u.a.:

- Lage, Anordnung und Ausrichtung des Gebäudes,
- Geometrie und Struktur des Baukörpers, Grundrisskonzept, Geschosshöhen und Raumtiefe,
- Orientierung, Anordnung und Flächenanteile der Fenster an den einzelnen Fassaden, Verglasungsqualität, Sonnen-/Blendschutz sowie
- Innenraumgestaltung (Oberflächen, aktivierbare Speichermasse), Möglichkeit zur freien Lüftung bzw. Nachtlüftung.

Betrachtet man nur die fensterabhängigen Einflussparameter, so spielen für den Heiz- und Kühlenergiebedarf die durch das bauliche Umfeld verursachten und gebäudeeigene Verschattungen, die Orientierung der Fenster, der Verglasungsanteil an den einzelnen Fassaden, die Verglasungsqualität sowie Sonnenschutzeinrichtungen eine

bedeutende Rolle. Für die Tageslichtnutzung kommen noch die Anordnung der Fenster in der Fassade sowie eventuell zusätzliche Blendschutzeinrichtungen dazu.

Das Bauen mit Glas wird häufig mit Begriffen wie „Solares Bauen“ oder „Solararchitektur“ verknüpft, unter denen sich eine ganze Bandbreite von Strategien, Technologien und Philosophien subsumiert. Leitgedanke ist dabei vornehmlich die direkte Nutzung von solarer Strahlungsenergie in Form von Wärme und Licht im Gebäudeinneren. Heute verfügbare Verglasungen und Rahmen ermöglichen – im Wohnungsbau – tatsächlich substantielle solare Heizwärmegewinne und können sogar zu einer positiven Energiebilanz des Bauteils Fenster über die gesamte Heizperiode beitragen (vgl. Abb. 18). Andererseits zeigen selbst Passivhäuser, dass das winterliche Solarstrahlungsangebot trotz minimaler Wärmeverluste nicht ausreicht, um vollständig auf eine zusätzliche Beheizung zu verzichten.

Differenzierter stellt sich die Situation bei komplexeren Nutzungen im Bereich des Nichtwohnungsbaus dar. Aufgrund der in der Regel deutlich höheren internen Wärmefreisetzung ist der solare Wärmegewinn zur Heizung von untergeordneter Bedeutung und kann außerhalb der Wintermonate zu einer deutlichen Raumüberwärmung führen. Insofern kommt hier den Fenstern eine wichtige Rolle hinsichtlich der effektiven Begrenzung von Strahlungseinträgen in das Gebäude zu, um den Energieaufwand für die Raumklimatisierung gering zu halten. Der sorgsame Umgang mit dem Verglasungsanteil der Fassaden, gekoppelt mit effektiven Sonnenschutzmaßnahmen, ist eine wesentliche Voraussetzung für geringe Kühllasten und damit eine eventuelle passive Kühlung. Hinzu kommt bei diesen Gebäuden der Aspekt der Tageslichtnutzung an Arbeitsplätzen, der weitere Anforderungen an die Fassade hinsichtlich des visuellen Komforts stellt, andererseits aber den Anteil an erforderlicher Beleuchtungsenergie entscheidend beeinflusst.

Die Dimensionierung von Glasflächen und die Auswahl der für die jeweilige Gebäudenutzung optimalen Glasqualität unter Berücksichtigung des solaren Strahlungsangebots auf die Fassaden stehen folglich in engem Zusammenhang mit der energetischen Optimierung eines Gebäudes. Mit dem nach der neuen Energieeinsparverordnung (EnEV) erforderlichen Nachweis der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (DIN 18599) wird der Stellenwert der Fassaden- bzw. Fensterplanung im Rahmen des architektonischen Entwurfs offensichtlich und Nachteile einzelner Planungsentscheidungen werden transparent. Die Optimierung der Glasflächen kann in vielen Fällen nur mit Hilfe von Vergleichsberechnungen erfolgen. Dabei ist je nach Fragestellung abzuwägen, ob ein statisches Bilanzverfahren<sup>28</sup> ausreicht – z.B. zur Bewertung solarer Gewinne in der Heizwärmebilanz eines Wohngebäudes – oder ob das Raumklima mit Hilfe dynamischer thermischer Gebäudesimulationen detaillierter untersucht werden muss.

<sup>28</sup> Jahres-/Monatsbilanz nach EN 832 bzw. DIN 4108-6, Monatsbilanz nach DIN V 18599

## 8 Berechnungsprogramme für Fenster

Die für die thermischen und optischen Eigenschaften von Verglasungen und Fenstern relevanten und normierten Kenndaten sind in der Regel direkt von den Glasherstellern und Fensterbaufirmen erhältlich. Allerdings sind diese produktbezogenen Herstellerdaten allein nicht immer dazu geeignet, auftretende Fragen im Planungsprozess zu beantworten. Seien es von den Standardbedingungen abweichende Randbedingungen, unter denen ein Produkt geprüft werden soll, Kombinationen von Komponenten, die nicht als Produkt verfügbar sind und deren Kennwerte konstruktionsbedingt nicht ohne weiteres überlagert werden dürfen (z.B. Sonnenschutz in einem Kastenfenster) oder Fragestellungen, die nicht über die normierten Kenndaten zu beantworten sind – in solchen Situationen sind andere Planungshilfsmittel erforderlich, um zu richtigen Entscheidungen zu gelangen.

Aus diesem Grund wurden verschiedene Berechnungsprogramme entwickelt, mit denen Kennwerte für fast beliebige Konstellationen von Verglasungen und Rahmen ermittelt werden können. Damit lassen sich nicht nur die Einflüsse verschiedener Einzelkomponenten eines Fensters – z.B. Art des Abstandhalters, Rahmenkonstruktion, Qualität von Beschichtungen – auf die „integralen“ Kennwerte wie z.B.  $U_g$ -,  $U_w$ - oder  $g$ -Wert untersuchen, sondern auch die Fragestellung, aus welchen Einzelkomponenten ein Fenster zusammengesetzt werden muss, um bestimmte Anforderungen zu erfüllen. Mit mehrdimensionalen Wärmebrückenberechnungen können weiterhin unterschiedliche Einbausituationen überprüft werden – insbesondere für Passivhäuser oder Altbausanierungen eine wichtige Fragestellung. Im Folgenden wird – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – ein kurzer Überblick zu wichtigen am Markt verfügbaren Programmen und ihren wesentlichen Eigenschaften gegeben. In Abb. 79 sind die Programme zusammen mit der jeweiligen Bezugsadresse aufgeführt.

Ein sehr einfaches Programm ist UwCal der Firma Schüco, das maßunabhängige Berechnungen des U-Wertes von Fenstern nach dem Tabellenverfahren der DIN 4108-4 und maßabhängige Berechnungen nach dem entsprechenden Formelverfahren (vgl. Kap. 3.2) erlaubt. Ein Menü hilft bei der Eingabe der erforderlichen Größen. Es handelt sich jedoch eher um eine Berechnungshilfe als um ein Programm zur Bewertung verschiedener Fenstersysteme bzw. Komponenten. Ein ähnliches Programm ist WinUw der Firma Ensinger (Thermix-Abstandhalter), mit dem ebenfalls Berechnungen des  $U_w$ -Wertes durchgeführt werden können und das eine grafische Ergebnisdarstellung enthält. Bei den Eingabeparametern bestehen jedoch Beschränkungen.

Das einzige komplexe deutschsprachige Programm für die normengerechte Berechnung wärmetechnischer und optischer Kennwerte nach EN-Standard ist das Programm GLAD von der Eidgenössischen Material- und Prüfanstalt (EMPA) aus der Schweiz (siehe Abb. 77). In einer Datenbank sind verschiedene Fenstergeometrien sowie sämtliche Einzelkomponenten eines Fensters inklusive Sonnenschutzelementen enthalten, die beliebig kombiniert werden können. Für die Berechnung eines Fensters müssen neben der Komponentenwahl die Fenstergröße bzw. -geometrie und die Randbedingungen (Standort, Klima) spezifiziert werden. Datensätze aus GLAD können exportiert werden und stehen somit u.a. auch für andere Energieberechnungsprogramme zur Verfügung. Das Programm ist in zwei Versionen erhältlich, eine Planerversion für Ingenieure und Architekten und eine Expertenversion für die Glashersteller mit der Möglichkeit, eigene neue Glaskombinationen zu erstellen [85].

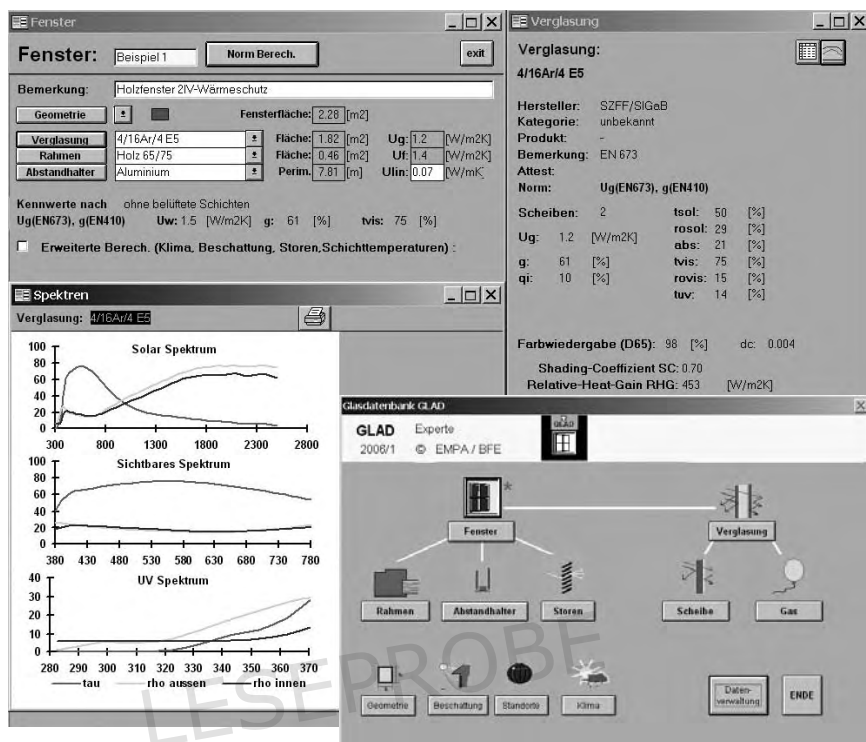


Abb. 77: Eingabeoberfläche des Berechnungsprogramms GLAD

## 12 Autor

### Prof. Andreas Wagner

Andreas Wagner, geboren 1959, Professor für Bauphysik und Technischen Ausbau an der Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Architektur. 1979 – 1987 Studium des Maschinenbaus an der Universität Karlsruhe, 1987 bis 1995 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme Freiburg, seit 1995 Professur in Karlsruhe, seit 1999 (Gründungs-) Partner der ip5 Ingenieurpartnerschaft.



Forschungsschwerpunkte: Monitoring und Bewertung der Energie-Performance von Gebäuden, Regelungs- und Betriebsstrategien für HLK-Anlagen, thermischer Komfort in Gebäuden, Lichttechnik und visueller Komfort, Begleitung des Förderprogramms EnOB des BMWi.

### Kontakt

Fachgebiet Bauphysik & Technischer Ausbau,  
Universität Karlsruhe (TH), Englerstraße 7, 76131 Karlsruhe  
wagner@fbta.uni-karlsruhe.de, www.fbta.uni-karlsruhe.de

### Co-Autoren

#### Sebastian Herkel

Sebastian Herkel, geboren 1966, Maschinenbaustudium in Karlsruhe, seit 1992 am Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme in Freiburg. Leitet dort die Gruppe Solares Bauen mit den Schwerpunkten Energieeffizientes Bauen, Raumklima und Solare Energieversorgung.



Sebastian Herkel lieferte Beiträge zu den Kapiteln 3 und 5

#### Walter Kohne

Walter Kohne, geboren 1959, Architekturstudium in Hannover und Zürich, seit 1994 eigenes Büro in Frankfurt und Karlsruhe, parallel dazu von 1994 bis 1999 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Gebäudeplanung an der Universität Karlsruhe (TH). Breites Spektrum an Bauten und Projekten in Architektur und Städtebau, zahlreiche nationale und internationale Wettbewerbe.



Walter Kohne lieferte Beiträge zum Kapitel 6