

BINE-Fachbuch

Energieeffiziente Fenster und Verglasungen

4., vollständig überarbeitete Auflage

Andreas Wagner u. a.

LESEPROBE

Herausgeber

 **FIZ Karlsruhe**
Leibniz-Institut für
Informationsinfrastruktur

Fraunhofer IRB  **Verlag**

 **BINE**
Informationsdienst

BINE Informationsdienst berichtet über Themen der Energieforschung: Neue Materialien, Systeme und Komponenten, innovative Konzepte und Methoden. BINE-Leser werden so über Erfahrungen und Lerneffekte beim Einsatz neuer Technologien in der Praxis informiert. Denn erstklassige Informationen sind die Grundlage für richtungweisende Entscheidungen, sei es bei der Planung energetisch optimierter Gebäude, der Effizienzsteigerung industrieller Prozesse oder bei der Integration erneuerbarer Energien in bestehende Systeme.

Weitere Informationen finden Sie unter: www.bine.info

Für weitere Fragen stehen Ihnen zur Verfügung:

Micaela Münter (Redaktion)

BINE Informationsdienst, FIZ Karlsruhe, Büro Bonn

Kaiserstraße 185–197, 53113 Bonn

Tel. +49 2 28 92379-0, E-Mail: bine@fiz-karlsruhe.de, www.bine.info

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISBN: 978-3-8167-8749-5

ISBN (Print): 978-3-8167-8749-5 | ISBN (E-Book): 978-3-8167-8750-1

Layout: Dietmar Zimmermann | Umschlaggestaltung: Martin Kjer | Herstellung: Tim Oliver Pohl

Satz: Mediendesign Späth GmbH, Birenbach | Druck: DZA Druckerei zu Altenburg GmbH, Altenburg

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Titelfoto: Verbindungsbrücke des Fraunhofer IST mit EControl-Glas

(Quelle: EControl-Glas GmbH & Co. KG)

© by FIZ Karlsruhe

Verlag und Vertrieb:

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon +49 7 11 970-2500

Telefax +49 7 11 970-2508

irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Hinweis zu den Abbildungen: Soweit nachfolgend keine anderen Quellen genannt werden, stammen die Abbildungen von den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	7
1 Fenstertechnologie im Wandel	9
2 Gestaltung und Funktion von Fenstern	12
2.1 Gestalterische Aspekte	12
2.2 Funktionale Anforderungen	14
3 Bauphysikalische Grundlagen und Kennwerte	20
3.1 Licht- und Strahlungsdurchlässigkeit	20
3.2 Wärmetransport	26
3.3 Thermische Behaglichkeit	30
3.4 Taupunktunterschreitung	34
3.5 Schallschutz	35
3.6 Tageslichtnutzung	37
4 Verglasungen und Rahmen für verbesserten Wärmeschutz	43
4.1 Thermische Qualität und Behaglichkeitsaspekte	43
4.2 Selektive Beschichtungen für Wärme- und Sonnenschutzverglasungen	47
4.3 Gasfüllungen im Scheibenzwischenraum	55
4.4 Neue Werkstoffe für den Randverbund	58
4.5 Der Rahmen für sehr gut wärmedämmende Verglasungen	63
4.6 Übersicht über marktverfügbare Verglasungen	71
5 Innovativer Sonnenschutz und Lichtlenkung	74
5.1 Sonnen- und Blendschutzsysteme	74
5.2 Sonnenschutzverglasungen	79
5.3 Schaltbare Gläser zur Steuerung von Solarstrahlung und Licht	81
5.4 Richtungsselektive und lichtlenkende Verglasungen	87
6 Bautechnische Aspekte – das Fenster in der Gebäudehülle	94
6.1 Der Einbau von Fenstern	95
6.2 Erhaltung und energetische Sanierung von Fenstern	99
7 Energie und Ökologie	105
7.1 Das Fenster in der Energiebilanz des Gebäudes	105
7.2 Ökologische Bewertung von Fenstern	119

8	Berechnungsprogramme und weitere Werkzeuge für die energetische Bewertung von Fenstern	127
9	Zitierte Literatur und Abbildungsverzeichnis	133
9.1	Zitierte Literatur	133
9.2	Abbildungsverzeichnis	138
10	Energieforschung der Bundesregierung	142
10.1	Laufende und kürzlich abgeschlossene Forschungsvorhaben	142
10.2	Forschungsberichte	143
11	Weiterführende Literatur	145
12	Autor	148

LESEPROBE

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. Heute stehen wärmetechnisch hochwertige Fenster am Markt zur Verfügung, deren Dämmwerte zum Teil denen von Außenwänden älterer Gebäude nicht nachstehen.

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 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 4. Auflage des Fachbuches zum Thema Fenster und Verglasungen wurde in dem Sinne komplett aktualisiert und um aktuelle Entwicklungen erweitert. Ein Fokus der Forschungsarbeiten liegt auf der direkten Kontrolle des Strahlungsdurchgangs durch Verglasungen. Erste »schaltbare Gläser« sind bereits auf dem Markt und im Einsatz. Die Weiterentwicklung von Rahmen für sehr gut dämmende Verglasungen wird vorangetrieben. Neue schlanke Rahmen bei gleichzeitig hoher Dämmwirkung sind das Ziel. Ein erster Prototyp aus einem formstabilen und wetterfesten Kunststoffmantel wurde bereits entwickelt.

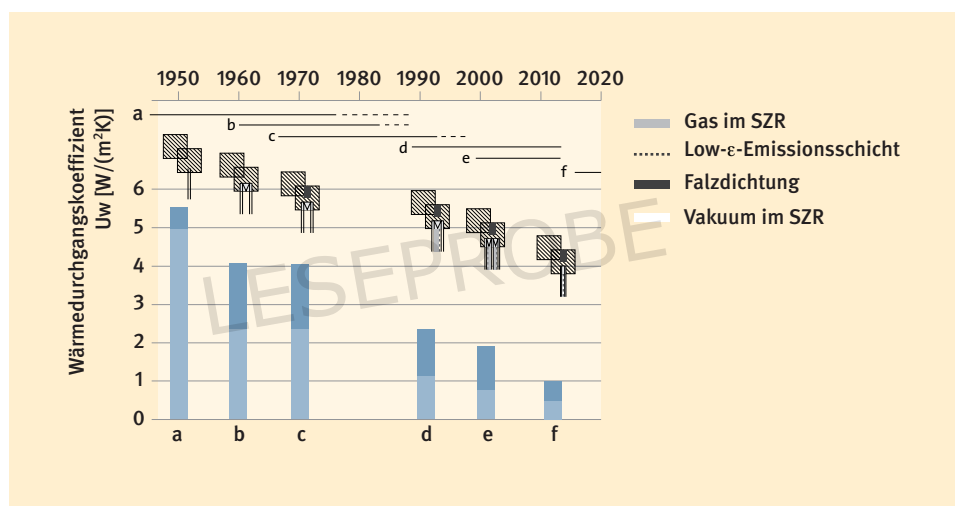
FIZ Karlsruhe
BINE Informationsdienst

LESEPROBE

1 Fenstertechnologie im Wandel

Von den ersten Gegenständen aus Glas bis zur heutigen Produktpalette an Gebrauchs- und Kunstgegenständen sowie Funktionsgläsern spannt sich ein weiter Bogen an materialwissenschaftlichen und herstellungstechnologischen Entwicklungen. Speziell im Bauwesen fanden in den letzten 25 Jahren wahre Quantensprünge bei der Verbesserung wärmedämmender und optischer Eigenschaften von Verglasungen statt. Während im unsanierten Gebäudebestand Zweischeiben-Isolierverglasungen oder Doppelverglasungen in Verbund- und Kastenfenstern noch weitgehend Standard sind, kommen seit 1995 ausschließlich so genannte Zweifach- oder Dreifach-Wärmeschutzverglasungen mit hauchdünnen Silberschichten und Edelgasfüllungen zum Einsatz (Abb. 1). Dieser Entwicklung haben nicht zuletzt die erhöhten Anforderungen an den Wärmeschutz in der damaligen Wärmeschutzverordnung (WSchVO) bzw. deren Fortschreibungen bis zur aktuellen Version, der ab dem Jahr 2002 gültigen Energieeinsparverordnung (EnEV) den Weg geebnet. Über verschiedene Material- und Beschichtungsparameter ist dabei 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 Wärmeflusses über Glasabstandshalter und Fensterrahmen erzielt. Im Vordergrund stand auch hier der Einsatz neuer Materialien – vorwiegend Kunststoffen mit geringer Wärmeleitfähigkeit.

Somit stehen heute wärmetechnisch hochwertige Fenster am Markt zur Verfügung, deren Dämmwerte zum Teil denen von Außenwänden älterer Gebäude nicht nachstehen. Weiter noch: Das Fenster als früher 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 tatsächlichen Heizenergieeinsparungen. Und die Entwicklungen gehen weiter – das nächste Ziel sind Vakuum-Verglasungen, die als Zweischeibensystem mit minimalem Scheibenzwischenraum den gleichen Dämmwert erzielen sol-



■ **Abb. 1:** Entwicklung von Einfachfenstern in Deutschland über die letzten Jahrzehnte und perspektivische Entwicklung

len wie die heute besten Dreifach-Wärmeschutzverglasungen. Damit verringern sich die Gesamtdicke des Glasverbunds sowie sein Gewicht. Eine ähnliche Stoßrichtung verfolgt die Entwicklung hoch dämmender und wärmebrückenfreier Rahmen, sodass in Zukunft wieder Fenstersysteme mit üblichen Profilanalysen und -dicken bei hervorragender energetischer Qualität verfügbar sein werden.

Ein weiterer Fokus aktueller Forschungsarbeiten liegt auf der direkten Kontrolle des Strahlungsdurchgangs durch Verglasungen, wobei hier sowohl der Wärmeeintrag durch die Sonne als auch die Tageslichtbereitstellung von Interesse sind. Erste so genannte »schaltbare Gläser« sind auf dem Markt; sie öffnen den Weg zu dynamischen Klimahüllen, die ohne zusätzliche mechanische Verschattungssysteme Energie- und Lichtflüsse möglichst bedarfsgerecht regelbar machen sollen. Dabei werden physikalisch-optische Wirkprinzipien verschiedener Schichtsysteme sowie Mikro- und Nanostrukturen auf ihre Einsatzfähigkeit in realen Verglasungssystemen untersucht. Der Vollständigkeit halber seien hier auch (multi-)funktionale Oberflächen mit weiteren Eigenschaften (z. B. Lotusblüteneffekt zur Selbstreinigung oder Anti-Reflex-Oberflächen) genannt, die in diesem Buch jedoch nicht weiter betrachtet werden.

Der Fortschritt in der Verglasungstechnologie spiegelt sich natürlich wider in der Formensprache 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 in der Vergangenheit 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 großen Glasflächen – sowie eine oft geringere Nutzerzufriedenheit wegen des nicht zu beeinflussenden künstlichen Klimas sind der Preis für die architektonisch gewollte Abkopplung des (gläsernen) Baukörpers vom Außenklima.

Insbesondere die Mitte der 90er Jahre vom BMWi initiierte Forschungsinitiative »Energieoptimiertes Bauen« (EnOB) sowie dann ab 2002 auf gesetzgeberischer Ebene die Energieeinsparverordnung (EnEV) als nationale Umsetzung der EU-Gesamtenergieeffizienz-Richtlinie für Gebäude haben wieder für eine stärkere architektonische Auseinandersetzung mit der Wechselwirkung zwischen Innenraum- und Außenklima gesorgt. Ausschlaggebend war die geforderte Primärenergiekennzahl für die gesamte Gebäudetechnik – damit werden sämtliche Energieaufwendungen (Heizen, Kühlen/Klimatisieren, Beleuchten und Lüften) für die energetische Gebäudeoptimierung relevant und rücken somit auch verstärkt die Fassade in den Fokus der Planer. Dabei wird die Gestaltungsfreiheit hinsichtlich Wärmeschutz und Komfort im Winter

durch den bis heute erreichten Stand der Glastechnologie kaum mehr eingeschränkt. Knackpunkt sind vielmehr der sommerliche Wärmeschutz, d. h. die Vermeidung von hohen Kühllasten sowie die Tageslichtverfügbarkeit. Inwieweit hier voll verglaste Fassaden oder Glas-Doppelfassaden 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.

Nur eine ganzheitliche Bewertung kann darüber Auskunft geben, welche Fassadenkonzepte in welchem Kontext energetischen bzw. im erweiterten Sinne ökologischen, wirtschaftlichen und sozio-kulturellen Kriterien im Sinne der Nachhaltigkeit standhalten. Der o. g. Forschungsschwerpunkt EnOB zeigt hierzu innovative Ansätze im Bereich der Fenstertechnologie sowie Demonstrationsprojekte mit sehr ambitionierten Energiekennzahlen bei hoher Nutzerzufriedenheit (vgl. hierzu www.enob.info). Zukünftige innovative Fassaden werden sich wahrscheinlich durch einzelne funktionale Einheiten mit jeweils spezifisch optimierten Eigenschaften auszeichnen, um die verschiedenen Aufgaben wie Sichtbezug nach außen, Tageslichtversorgung, Solarenergiegewinnung, Lüftung, Sonnen- und Blendschutz effizient zu erfüllen. Dabei werden nur solche Lösungen eine hohe Nutzerakzeptanz erfahren, die die vielfältigen Anforderungen an den Komfort erfüllen und außerdem auch einen Nutzereingriff zur Regelung des Raumklimas (Lüften, Bedienung Sonnenschutz etc.) zulassen.

Im Zusammenhang mit der Fortschreibung der EU-Gesamtenergieeffizienz-Richtlinie für Gebäude in Richtung von »nahezu Nullenergie-Gebäude« wird die Gebäudehülle – und damit die Fassade – einen neuen Stellenwert in Bezug auf die lokale Solarenergiegewinnung erhalten. Über Verglasungen mit transparenten Photovoltaik-Schichten können zukünftig u. U. auch Fenster zur Stromerzeugung am Gebäude beitragen; erste Prototypen werden bereits entwickelt, die jedoch noch hinsichtlich Wirkungsgrad, Lebensdauer sowie der weiteren Funktionalitäten eines Fensters – insbesondere Lichtdurchlässigkeit und Durchsicht – optimiert werden müssen. Eine weitere Zukunftsoption stellen organische Leuchtdioden-Schichten (OLED) auf Verglasungen dar, die neben der normalen Fensterfunktion entweder bei Dunkelheit als flächiges Leuchtmittel zur energieeffizienten Raumbelichtung dienen können oder in Form eines »Smart Window« ein Display für beliebige Darstellungen (auch Verschattung oder Verdunklung) zur Verfügung stellen. Technologische Herausforderung ist hier die Fertigung großer Flächen. Auch die thermische Solarenergienutzung mithilfe von Fensterkollektoren, wird verfolgt, wobei hierfür nur Bereiche der Fassade infrage kommen, die nicht für die Durchsicht benötigt werden. Die Absorbergeometrie oder integrierte Reflektoren müssen gleichzeitig für möglichst geringen Strahlungsdurchgang im Sommer sorgen.

Im Rahmen dieses Buches werden neben wichtigen energetischen Eigenschaften von Fenstern und Verglasungen die aktuellen technologischen Entwicklungen vorgestellt und bezüglich ihrer Umsetzung in der Baupraxis diskutiert. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Fenstertechnologie und nicht im konstruktiven Glasbau.

angesetzt werden [29]. Grundsätzlich entstehen je nach Bauart und Nutzung eines Gebäudes für die Verglasung sehr unterschiedliche und oft auch zeitlich variierende Anforderungen an U- und g-Wert, auf die mit entsprechenden Materialien sowie Verglasungs- und Fenster- bzw. Fassadensystemen reagiert werden muss.

4.2 Selektive Beschichtungen für Wärme- und Sonnenschutzverglasungen

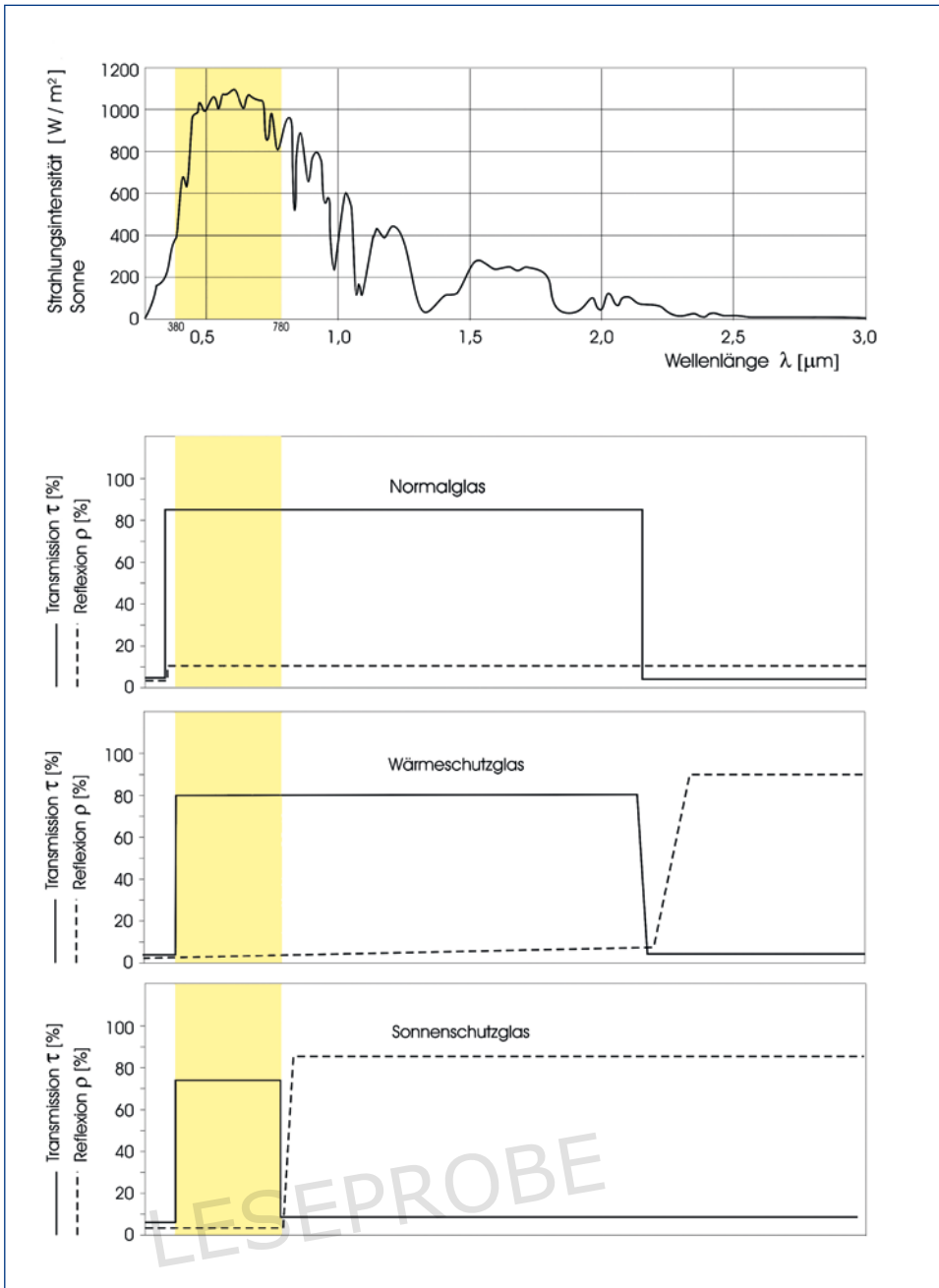
Damit Verglasungen die an sie gestellten Anforderungen hinsichtlich des Wärme- und Sonnenschutzes erfüllen können, wird zunächst die spektrale Verteilung von Licht-, Solar- und Wärmestrahlung gezielt zum »Einstellen« der licht- und wärmetechnischen Kennwerte ausgenutzt. Man verleiht dabei den Gläsern unterschiedliche optische Eigenschaften in den verschiedenen Wellenlängenbereichen. Abb. 26 zeigt die idealisierten spektralen Eigenschaften für ein Wärmeschutzglas mit hohem Energiedurchlassgrad über das gesamte Solarspektrum und für ein Sonnenschutzglas mit hoher Selektivität im Vergleich zu einem Normalglas.

Beschichtungsverfahren und Oberflächentechnologien

Zur Beeinflussung der strahlungsphysikalischen Eigenschaften von Gläsern werden Edelmetall- oder Halbleiter-Oxidschichten verwendet. Edelmetallschichten werden über ein Kathodenzerstäubungsverfahren (Sputtern) auf die Glasoberfläche aufgebracht. Dabei werden die Glasscheiben durch eine mit Argon gefüllte Vakuum-Kammer transportiert. An Kathoden, die sich wenige Zentimeter über den Glasscheiben befinden, ist das Rohmaterial für die Beschichtung befestigt. Durch Anlegen einer hohen Spannung wird mit dem Edelgas ein Plasma gezündet und energiereiche Argon-Ionen schlagen aus dem Rohmaterial Atome, die auf die Glasoberfläche geschleudert werden und dort eine dünne Schicht bilden [30].

Eine hohe IR-Reflexion und damit ein geringer Emissionsgrad wird mit einer hohen Elektronendichte und der damit verbundenen hohen Leitfähigkeit der Metallschicht erreicht. Je dünner und gleichmäßiger die Schichten aufgebracht werden, desto höher ist die solare Transmission im nahen IR-Spektrum. Spezielle Additive (z. B. NiCr) und ein kontrollierter Sputter-Prozess vermeiden bei sehr dünnen Schichten qualitätsmindernde Porositäten, die sich durch inhomogenes Schichtwachstum ausbilden können [7]. Als Edelmetall wird Silber verwendet, da bei Gold und Kupfer aufgrund der höheren Absorption im sichtbaren Spektralbereich farbliche Verzerrungen bei Transmission und Reflexion auftreten. Eine Erhöhung der Transmission von Silberschichten im sichtbaren Spektralbereich kann durch den Einsatz zusätzlicher entspiegelnder Schichten erreicht werden [30]. Hierzu kommen Dielektrika mit hohem Brechungsindex zum Einsatz (In_2O_3 , SnO_2 , TiO_2 , ZnO , ZnS). Über die Dicke der Silberschicht(en)¹³ wird der Einsatzbereich des Glases – dünne Schichten für hohe Solargewinne bzw. dickere für den Sonnenschutz – gesteuert [7]. Die Edelmetallschichten, die als soft coatings bezeichnet werden, müssen innerhalb des Scheibenzwischenraumes angeordnet sein, da sie sehr empfindlich gegen äußere Einflüsse sind. Sie benötigen eine zusätzliche Schutzschicht (Gesamtschichtdicke ca. 100 nm). Inzwischen sind manche edelmetallhaltigen Wärme- und Sonnenschutzschichten erhaltlich, die auch vor dem Tempern von Sicherheitsglas aufgebracht werden können.

¹³ Aus Kostengründen und zur Verbesserung der spektralen Selektivität werden oft zwei dünne Silberschichten anstelle einer dicken Schicht hergestellt



■ **Abb. 26:** Idealisierte qualitative Anforderungen für Funktionsgläser: das Wärmeschutzglas soll ein Maximum an Strahlungsenergie durchlassen und erst im fernen Infrarot einen hohen Reflexionsgrad (niedrige Emissivität) für Wärmestrahlung aufweisen, während beim selektiven Sonnenschutzglas der hohe Transmissionsgrad möglichst nur auf den Bereich des sichtbaren Lichtes beschränkt wird.

Bei der Sprühpyrolyse wird eine Lösung, die das Beschichtungsmaterial enthält, mit einem Trägergas (Luft, Stickstoff, Argon) über ein Düsensystem versprüht. Dadurch bildet sich ein Aerosol, das verdampft, bevor es die Glasoberfläche erreicht (chemical vapour deposition). Gängige Materialien sind die Oxide der Metalle Zink, Cadmium, Zinn oder Indium, die mit fremden Materialien (z. B. Fluor, Antimon, Aluminium) dotiert werden müssen, um metallischen Charakter anzunehmen [30]. Pyrolytisch aufgebraute Halbleiterschichten weisen aufgrund der wesentlich geringeren Elektronendichte und des deshalb schwächeren metallischen Charakters eine geringere Reflexion im IR-Spektrum auf. Außerdem lassen sich im Vergleich zu Edelmetallschichten keine so hohen Selektivitätszahlen erreichen, da die IR-Reflexion erst bei Wellenlängen deutlich oberhalb des sichtbaren Bereichs ($\lambda > 1.500\text{ nm}$) beginnt [7]. Die Schichten zeichnen sich durch eine hohe chemische und mechanische Stabilität aus (hard coatings), so dass sie direkt mit der Atmosphäre in Verbindung stehen können. Sie werden deshalb auch auf gefärbten Gläsern von Sonnenschutzverglasungen eingesetzt, deren Emissionsgrad so deutlich verbessert werden kann.

Ein weiteres Beschichtungsverfahren ist das Auftragen und Einbrennen von Emailfarben auf Einscheibensicherheitsglas oder teilvorgespanntes Glas, das dann zu Isolierverglasungen weiter verarbeitet werden kann. Eine vollflächige weiße Siebdruckschicht kann die Transmission reduzieren und die Reflexion nach außen erhöhen, jeweils um einen Faktor zwei bis vier, und dadurch die Sonnenschutzwirkung verstärken (siehe Abb. 27). Mit den heutigen Druckverfahren ist es auch möglich, Digitalbilder mit Emailfarben auf Glas zu drucken, was neue Gestaltungsmöglichkeiten eröffnet [31].

Im Zusammenhang mit der Veränderung der optischen Eigenschaften von Gläsern kommt auch Oberflächenstrukturen im Mikro- oder Nanometermaßstab eine große Bedeutung zu, was hier nur kurz angerissen werden soll. Nicht weiter ausgeführt werden mögliche Modifikationen nicht-optischer Eigenschaften wie z. B. Reinigungsunterstützung, Kratz- oder Beschlagenschutz, die heute schon am Markt verfügbar sind. Mithilfe von Strukturen, die kleiner sind als die Wellenlänge des Lichts, können Gläser z. B. breitbandig, d. h. über den sichtbaren Bereich des Lichts hinaus im gesamten Solarspektrum, entspiegelt werden. Technologisch gelingt dies durch mechanisches Prägen einer Verbundpolymer-Oberflächenschicht (ORMOCER-Schicht) im Submikronbereich oder durch Aufbringen von porösen anorganischen Sol-Gel-Schichten. Dadurch lassen sich hochtransparente Abdeckungen für Sonnenkollektoren und Verglasungen mit sehr hohem g-Wert herstellen [32]. Gegenüber konventionellen Gläsern ist eine Erhöhung



■ **Abb. 27:** Glasfassade mit Siebdruck als Sonnenschutz

des solaren Transmissionsgrades um 4 bis 8 % möglich. Weiterhin werden Glas-Folien-Kombinationen mit Antireflex-Glas untersucht.

Interferenzlithographie ermöglicht mithilfe von ultravioletten Laserstrahlen das Generieren von Urformen, aus denen sog. Foto-Resists Prägwerkzeuge hergestellt werden zur kostengünstigen Replikation von Mikrostrukturen in großen Flächen. Damit wird eine sehr gute Lichtauskopplung aus Tageslichtelementen oder eine gezielte Lichtlenkung erreicht [33]. Für Lichtlenkung und winkelselektive Transmission eignen sich dabei prismatische oder gewölbte Mikrostrukturen mit Dimensionen zwischen 10 und 100 nm (siehe Kap. 5.4).

Durch die gezielte Verbindung von Beschichtungs- und Strukturierungstechnologien können weitere funktionale Verglasungen entwickelt werden, um Anforderungen wie sommerlichen Wärmeschutz, ganzjährigen Blendschutz und hohe Tageslichtverfügbarkeit bestmöglich zu kombinieren.

Eigenschaften von low- ϵ -Verglasungen

Aufgrund der hohen Anforderungen an den Wärmeschutz werden in kommerziellen Verglasungen fast nur Edelmetallbeschichtungen eingesetzt, deren Emissionsgrad ϵ im Bereich von 0,02 bis 0,09 liegt. Pyrolytisch beschichtete Verglasungen, die in Wärmeschutzverglasungen vorwiegend für den Sanierungsbereich und sonst für Sonnenschutzverglasungen verwendet werden, weisen einen Emissionsgrad zwischen 0,14 und 0,20 auf.

Neben den jeweiligen spezifischen spektralen Eigenschaften einer Schicht entscheidet auch die Anordnung der Beschichtung in der Verglasung über deren Wirkung. Während sich die Beschichtung einer Zweifach-Wärmeschutzverglasung an der Außenseite der Innenscheibe befindet, wird sie für eine Sonnenschutzverglasung auf der Innenseite der Außenscheibe angeordnet. In Abb. 28 ist exemplarisch der Einfluss der Beschichtungsposition in einer Zweifachverglasung bei gleich bleibenden Schichteigenschaften dargestellt. Die Sonnenschutzverglasung weist bei gleich bleibendem U-Wert gegenüber der Wärmeschutzverglasung einen geringeren g-Wert auf, da die in der ersten Scheibe absorbierte Solarstrahlung zum größeren Teil direkt wieder nach außen abgegeben wird. Weiterhin ist zu erkennen, dass beschichtete Verglasungen – je nach Absorption der Solarstrahlung im nahen Infrarot an der inneren Scheibe – bei Besonnung erhöhte Temperaturen an der Innenoberfläche aufweisen können, was hinsichtlich des thermischen Komforts beachtet werden muss. Raumseitige Beschichtungen weisen nur ein relativ geringes Verbesserungspotenzial gegenüber einer unbeschichteten Zweifach-Isolierverglasung auf und führen zu problematischen Innenoberflächentemperaturen im Winter und im Sommer. Aus den aufgezeigten Unterschieden bzgl. der Kennwerte folgt, dass beim Einbau von Fenstern bzw. Verglasungen unbedingt auf die richtige und auf eine gleiche Einbaulage geachtet werden muss. Zusätzlich treten sonst auch Unterschiede in der optischen Wirkung (Reflexionsgrad, Farbeindruck) auf.

Kennwerte je nach Position der low- ϵ -Schicht

In Abb. 28 wird auch deutlich, dass eine zweite Beschichtung innerhalb einer Zweifachverglasung keine deutliche Verbesserung des U_g -Wertes bewirkt. Der Grad der Verbesserung ist abhängig vom Emissionsgrad der Beschichtungen – je schlechter die Einzelbeschichtung, desto größer ist die Verbesserungsmöglichkeit. Eine deutliche Verbesserung des U_g -Wertes auf unter $1 \text{ W/m}^2\text{K}$ wird erst mit Dreifach-Wärmeschutzverglasungen erreicht, die in der Regel auf der Außenseite der inneren und der Innenseite der äußersten Glasscheibe beschichtet sind (vgl. Abb. 29). Werden die Beschichtungen auf der Außenseite der inneren und der Außen-

Verglasung außen innen	U_g -Wert	g -Wert	T_{oi} [°C]	T_{oi} [°C]
	[W/m ² K]	[-]	Winter	Sommer
	1,35	0,63	16,6	31,2
	1,35	0,57	16,6	27,5
	2,67	0,61	13,3	38,0
	1,26	0,53	16,8	30,7

Randbedingungen:

 Winter: $T_a = 0^\circ\text{C}$, $T_i = 20^\circ\text{C}$, Wind = 3,4 m/s, keine Einstrahlung

 Sommer: $T_a = 30^\circ\text{C}$, $T_i = 25^\circ\text{C}$, Wind = 3,4 m/s, 500 W/m² Einstrahlung

Verglasung:

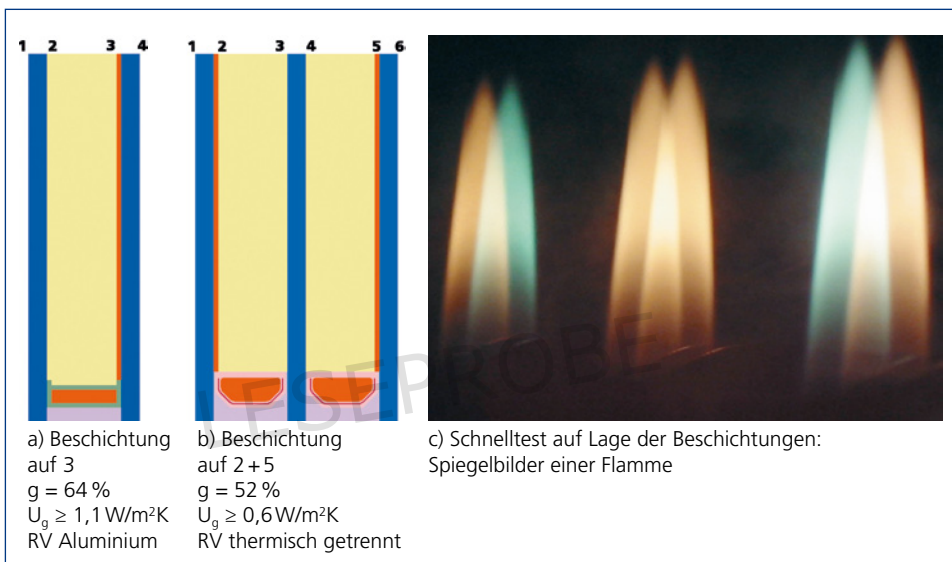
 Klarglas: 3,9 mm, $\tau_e = 0,89$

 beschichtetes Glas: 3,8 mm, $\tau_e = 0,60$, $\varepsilon = 0,066 / 0,836$

Scheibenzwischenraum: 12,0 mm, Argon

(berechnet mit WINDOW 5, siehe Kap. 8)

■ **Abb. 28:** Einfluss einer niedrig-emittierenden Schicht auf die thermische und optische Qualität einer Zweischeibenverglasung mit Argonfüllung



■ **Abb. 29:** Schematische Darstellung von Wärmeschutzverglasungen mit Beschichtungen auf unterschiedlichen Positionen. a) Zweifachverglasung mit low- ε -Beschichtung an Oberfläche 3. b) Dreifachverglasung mit low- ε -Beschichtung an Oberflächen 2+5. c) Mit einer Flamme kann die Scheibenzahl einer Verglasung visualisiert werden. Über die Farben erkennt man die Position der Beschichtungen.

12 Autor



Andreas Wagner, geboren 1959, Professor für Bauphysik und Technischen Ausbau am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Fakultät für Architektur. 1979 bis 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, Betriebsstrategien für solarbasierte Gebäudetechnik-Konzepte, thermischer Komfort und Nutzerzufriedenheit in Gebäuden, Lichttechnik und visueller Komfort, Begleitung des Förderprogramms EnOB des BMWi.

Kontakt:

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Fachgebiet Bauphysik & Technischer Ausbau,
Englerstraße 7, 76131 Karlsruhe
wagner@kit.edu, <http://fbta.arch.kit.edu>

Koautoren



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, 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.