

Sonnenschutzschichten bei Isolierverglasungen (III):

Was verlangt die Praxis?

In der vorangegangenen Folge der Artikelserie wurden Möglichkeiten und Grenzen von Sonnenschutzschichten untersucht und die in der Fassade sichtbaren Konsequenzen diskutiert. Im folgenden dritten und letzten Teil stehen die Anforderungen an Sonnenschutzbeschichtungen und das Design realer Systeme im Fokus.

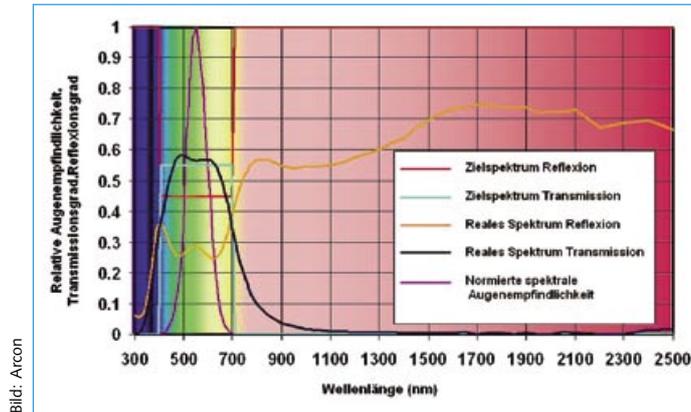


Bild 1: Ideale Zielspektren und reale Spektren einer hochselektiven Sonnenschutzverglasung

Absorptions- und Emissionsvermögen

In einer realen Sonnenschutzschicht tritt zwangsläufig Absorption auf. Diese hat in den verschiedenen Spektralbereichen unterschiedliche physikalische Ursachen und tritt mehr oder weniger intensiv auf. Nahezu alle Beschichtungsmaterialien und Floatgläser, welche heute zum Einsatz kommen, absorbieren das sichtbare Licht nur sehr geringfügig. Zwischen 600 nm und 1600 nm ist die Absorption hauptsächlich durch den Eisenoxidgehalt der Glasrohstoffe bestimmt. Im UV absorbieren sowohl Floatglas als auch die verschiedenen Beschichtungsmaterialien. Diese absorbierte und in Wärme umgewandelte Energie soll durch die sekundäre Wärmestrahlung möglichst nicht in das Gebäudeinnere gelangen.

Um die sekundäre Wärmestrahlung in das Gebäudeinnere zu minimieren, muss die Sonnenschutzbeschichtung ein möglichst geringes Emissionsvermögen aufweisen. Diese Eigenschaft kann durch leitfähige Schichten z. B. durch Metalle wie Kupfer, Gold und Silber realisiert werden. Je dicker die Metallschicht ausgebildet ist, desto geringer wird das Emissionsvermögen. Allerdings führen diese Schichten wieder zu erhöhter Reflexion und verminderter Transmission und müssen durch geeignete Oxidschichten wieder „entspiegelt“ werden.

Transmissionsfarbe

Zumeist wird in Transmission ein neutraler Farbeindruck gewünscht. Dieser kann durch

ein breites Transmissionsband λ_T erreicht werden, was jedoch den g-Wert erhöht und so die Selektivität beeinträchtigt. Bei Transmissionsbändern, die schmäler sind als der visuelle Spektralbereich, wird durch das Absenken der Transmission ein neutralerer Farbeindruck erreicht. Nur unter der Voraussetzung, dass dies mittels Reflexion geschieht, bleibt dabei die Selektivität unbeeinflusst. Werden absorbierende Schichten eingeführt, sinkt die Selektivität. Hohe Reflexion in der Fassade wirkt sich also auf die Selektivität vorteilhaft aus, d. h. man kann bei gleichbleibender Lichttransmission einen niedrigeren g-Wert erreichen.

Reflexionsfarbe

Die Reflexionsfarben hängen von den jeweiligen Trends im Objektbau und von den Wünschen der Bauherren und Architekten ab. Hauptsächlich werden neutrale Reflexionsfarben, niedrige Reflexionsgrade und ein blauer oder grüner Farbeindruck gewünscht.

Eine neutrale Reflexionsfarbe kann analog zur neutralen Transmissionsfarbe durch ein breites Reflexionsband erreicht werden. Die damit einhergehende Verbreiterung des Transmissionsbandes führt wieder zu einem erhöhten g-Wert und einer geringeren Selektivität. Werden gleichzeitig niedrige Reflexionsgrade gefordert, kann die Transmission nur durch absorbierende Schichtmaterialien gesenkt werden. Auch dies steigert den g-Wert und verringert so die Selektivität. Bei Reflexionsbändern, die schmäler sind als der visuelle Spektralbereich, wird durch eine Stei-

gerung des Reflexionsgrades ein neutralerer Farbeindruck erreicht, ohne die Selektivität zu beeinflussen.

Eine blaue Reflexionsfarbe kann durch ein Verschieben des Reflexions- und Transmissionsbandes in den langwelligen Spektralbereich hinein erreicht werden. Die Lichttransmission sinkt, die Selektivität wird vermindert. Die Transmissionsfarbe erscheint mehr gelblich. Ein Anheben der Grünreflexion beeinflusst die Selektivität kaum. Die Transmission wirkt durch diese Maßnahme im Allgemeinen etwas farbneutraler.

Bei diesen Betrachtungen wird der Zielkonflikt ein weiteres Mal deutlich: Die geforderte Farbneutralität und geringe Reflexion vermindern die Selektivität. Umgekehrt fordert eine hohe Selektivität eine hohe Reflexion und führt zu deutlichen Eigenfarben

Farbliche Veränderungen unter spitzen Betrachtungswinkeln

Bei genauer Beobachtung stellt man eine Änderung der Reflexionsfarbe bei einer Änderung des Betrachtungswinkels fest. Diese Farbänderung kann mit der so genannten Interferenz erklärt werden, die an dünnen Schichten auftritt. Dieser Effekt kann beeinflusst, aber nicht vermieden werden. Trotzdem wird gefordert, dass die Reflexionsfarben unter spitzen Betrachtungswinkeln möglichst erhalten bleiben.

Durch spitzere Betrachtungswinkel verschieben sich Transmissions- und Reflexionsbänder hin zu kürzeren Wellenlängen. Der dabei auftretende Effekt ist eine rote Reflexionsfar-

be, da die langwellige Grenze des Reflexionsbandes durch diese Verschiebung weiter in den sichtbaren Bereich rückt.

Diesem Effekt wird durch ein breites Transmissions- und Reflexionsband entgegengewirkt. Die Rotreflexion bei spitzen Winkeln kann durch ein Verschieben des Transmissions- und Reflexionsbandes in den unsichtbaren NIR-Bereich hinein vermieden werden. Die Verbreiterung führt zu einer Erhöhung des g-Wertes und das Verschieben des Transmissions- und Reflexionsbandes zu einer Senkung der Lichttransmission. Beide Maßnahmen haben eine Verringerung der Selektivität zur Folge.

Anforderungen beim Design realer Schichtsysteme

Das Design eines realen Schichtsystems erfordert also Maßnahmen, die fast immer zu einer Verringerung der Selektivität führen. Wegen der Neutralitätsanforderungen an die Transmissions- und Reflexionsfarben und der minimalen Änderung der Reflexionsfarben bei spitzen Betrachtungswinkeln werden die theoretisch möglichen Maximalwerte der Selektivität S mit einem realen Schichtsystem nicht erreicht.

Lediglich eine Maßnahme führt unter Beibehaltung hoher Farbneutralität zu einer Erhöhung der Selektivität. Diese Ausnahme besteht darin, die Transmission mittels Reflexion zu senken, d. h. die Absorption insbesondere im sichtbaren Spektrum durch ein geschicktes Schichtdesign weitgehend zu vermeiden. Die Reflexion lässt sich durch dickere Metallschichten im System, zumeist Silberschichten, effektiv erhöhen. Dadurch wird gleichzeitig das Emissionsvermögen der beschichteten Oberfläche vermindert und so die sekundäre Wärmestrahlung ins Gebäudeinnere weiter minimiert.

Ein reales Schichtsystem ist stets ein Kompromiss aus intensiven Farben in der Fassade, der Lichttransmission und des g-Wertes. Bei der Entwicklung eines Schichtsystems gilt es, ein Spektrum zu realisieren, das diesem Kompromiss gerecht wird. Ein kastenförmiges Zielspektrum sowie das dazugehörige reale Schichtsystem, das auf die genannten Anforderungen eingeht, sind in Bild 1 gezeigt.

Mit dem Zielspektrum wurde eine Lichttransmission von 55 % angestrebt. Da das System als absorptionsfrei angenommen wurde, fällt das Zielspektrum für die Reflexion mit 45 % entsprechend hoch aus. Das Transmissionsband wurde mit $410 \text{ nm} \leq \lambda_T \leq 700 \text{ nm}$ bewusst breit gewählt, um ein hohes Maß an Farbneutralität zu erreichen. Das



Der Autor:

Dr. Marcus Frank studierte Physik mit dem Schwerpunkt angewandte Optik in Erlangen; 1994 Diplom; 1994–1999 wissenschaftlicher

Mitarbeiter am Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik in Jena; Promotion zum Thema „Mikrostrukturierte Interferenzschichtsysteme“. Seit 1999 ist er innerhalb der Arcon-Gruppe für die Entwicklung der Beschichtungsprodukte verantwortlich.

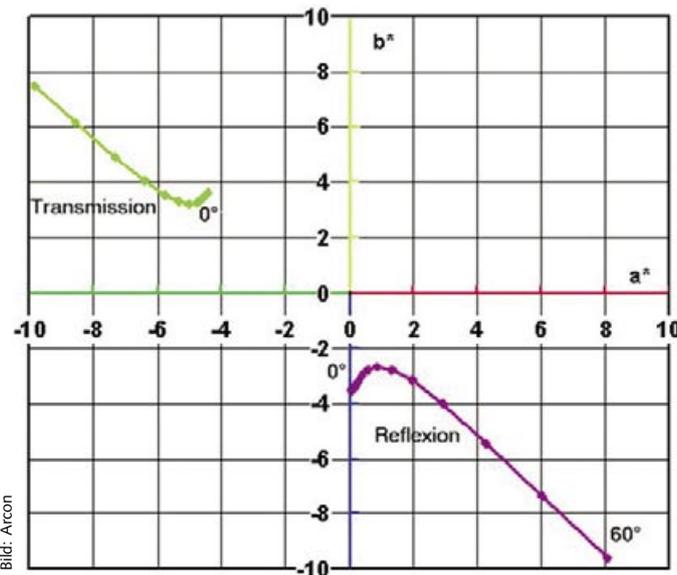


Bild 2: Entwicklung der Reflexions- und Transmissionsfarbwerte mit spitzen Betrachtungswinkeln

Zentrum des Transmissionsbandes ist spektral auf das Maximum der Augenempfindlichkeit ausgerichtet, um für die gegebene Transmissionsbandbreite eine maximale Selektivität zu gewährleisten.

In Tabelle 1 sind die Farbwerte sowie die lichttechnischen Daten der Zielspektren und der realen Spektren einander gegenübergestellt. Die Farbwerte gelten für die Monoscheiben (in Reflexion jeweils für die Glasseite). Die lichttechnischen Werte wurden mittels der Vorschrift DIN EN 410 berechnet, im Falle des Zielspektrums wieder mit einer idealen „unsichtbaren“ Gegenscheibe, im Realfall mit Floatglas.

Das Zielspektrum zeichnet sich durch eine hohe Farbneutralität und eine hohe Selektivität aus, die durch die Absorptionsfreiheit ermöglicht wird.

Aufgrund weiterer physikalischer und anwendungstechnischer Randbedingungen kann das gewünschte Kastenspektrum im Realfall nicht exakt erreicht werden. Die ge-

wünschte Lichttransmission wird fast erreicht, die auftretende Absorption führt jedoch zu einem höheren g-Wert und somit zu einer geringeren Selektivität. Die Farbneutralität geht verloren. Die wenigen Freiheitsgrade, die beim Schichtdesign verbleiben, werden ausgenutzt, um die gewünschten Reflexionsfarben einzustellen. In dem gezeigten Beispiel wird ein reiner Blauton erreicht.

Die Änderung des Farbwertes mit dem Betrachtungswinkel des realen Produktes ist in Bild 2 gezeigt.

Wichtig ist bei dieser Betrachtung vor allem die Entwicklung der Reflexionsfarbwerte. Mit spitzen Betrachtungswinkeln verschieben sich Transmissions- und Reflexionsbänder hin zu kürzeren Wellenlängen. Dadurch rückt die langwellige Grenze des Reflexionsbandes weiter in den sichtbaren Bereich und es tritt eine rote Reflexionsfarbe auf. Dies kommt in Bild 2 durch den steigenden a^* -Wert zum Ausdruck. Bei senkrechter Betrachtung (0°) gilt nahezu $a^* = 0$, bei einem Winkel von

| Lichttechnische Daten, Farbwerte | Zielspektrum | reales Spektrum |
|----------------------------------|--------------|-----------------|
| L_T (%) | 54,98 | 52,13 |
| L_R (%) | 45,02 | 29,91 |
| g (%) | 24,36 | 27,02 |
| S | 2,26 | 1,93 |
| L^* (T) | 79,03 | 79,72 |
| a^* (T) | -0,28 | -4,41 |
| b^* (T) | 0,34 | 3,65 |
| L^* (R) | 72,90 | 54,22 |
| a^* (R) | 0,32 | 0,09 |
| b^* (R) | -0,38 | -3,63 |

Tabelle 1: Lichttechnische Daten und Farbwerte der Zielspektren und realen Spektren

60° wird $a^* = 8$ erreicht. Bei dem oben untersuchten realen Fall wird eine reine Rotreflexion jedoch durch eine mit dem Winkel zunehmende Blaureflexion größtenteils „kaschiert“. Ausgehend von $b^* = -3,5$ bei 0° steigt der b^* -Wert bis ca. 30° leicht an, fällt dann aber im gleichem Maße, wie a^* ansteigt. So tritt unter einem spitzen Betrachtungswinkel ein violetter Farbton auf, der mit zunehmendem Winkel intensiver wird. Eine reine Rotreflexion wird so vermieden.

Durch leistungsfähige theoretische Berechnungsmöglichkeiten und durch eine ausgereifte Beschichtungstechnologie wird die Gratwanderung zwischen maximaler Lichttransmission und minimaler Energietransmission unter den weiteren genannten Nebenbedingungen heute erfolgreich gemeistert. Die Schichtsysteme werden entsprechend der benötigten Performance der Isolierverglasung ausgelegt und die Farben werden so berechnet, dass sie als Gestaltungselement in der Fassade eingesetzt werden können.

Schlussbetrachtungen

Bei der Herstellung hochselektiver Sonnenschutzschichten werden gegenwärtig die sehr guten theoretischen und technischen Möglichkeiten vollständig ausgeschöpft.

Diese physikalischen und technologischen Randbedingungen müssen von Schichtdesignern, Isolierglasherstellern und nicht zuletzt von Anwendern beachtet werden:

- Bei absorptionsfreien Schichtsystemen führt eine Absenkung der Transmission im gesamten sichtbaren Spektralbereich nicht zu einer Steigerung der Selektivität. Lichttransmission und g -Wert werden im gleichen Verhältnis gesenkt. Die Farbneutralität bleibt dadurch erhalten, die Durchsicht erscheint grau.
- Eine Einschränkung des Transmissionsbandes im sichtbaren Spektralbereich steigert die Selektivität beträchtlich. Als direkte Folge dieser Maßnahme treten jedoch intensive Farben auf, im Allgemeinen (i. A.) gelbgrün in Transmission und rotblau in Reflexion.
- Durch ein Verschieben des Transmissionsbandes in den kurz- oder langwelligen Bereich des Spektrums können die Transmissions- und Reflexionsfarben modifiziert werden. Dadurch werden die Transmission und damit die Selektivität i. A. gesenkt.
- Reflexions- und Transmissionsfarben können nicht unabhängig voneinander eingestellt werden. In absorptionsfreien Systemen sind sie streng komplementär.
- Ein Absenken der Transmission bei konstanter Bandbreite führt zu einem neutraleren Farbeindruck in Transmission und Reflexion. Die Selektivität wird bei fehlender Absorption nicht beeinflusst.
- Durch Absorption entsteht sekundäre Wärmestrahlung. Dadurch wird der g -Wert erhöht und die Selektivität der Beschichtung vermindert. Je größer das Emissionsvermögen der Beschichtung desto mehr wird dieser Effekt verstärkt.
- Hochreflektierende Schichtsysteme weisen bei gleicher Lichttransmission i. A. einen niedrigeren g -Wert auf und haben somit eine höhere Selektivität. ■