

Bild 3: Verlauf L_T , L_R , g und S bei abnehmender Transmission im sichtbaren Spektralbereich

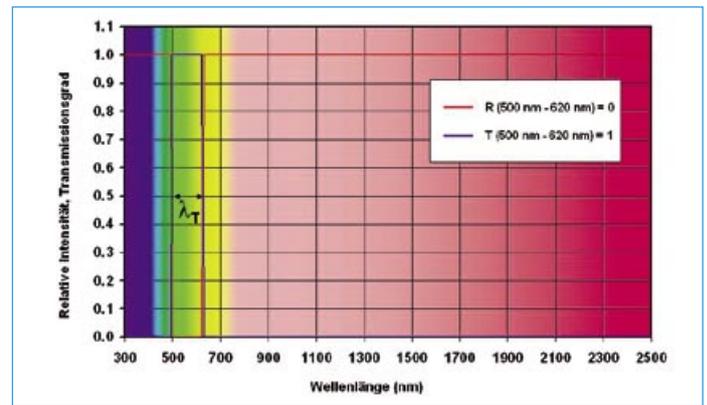


Bild 4: Eingeschränktes Transmissionsband ($500 \text{ nm} \leq \lambda_T \leq 620 \text{ nm}$)

bei diesen Werten im Auge behalten, dass es sich hier um eine idealisierte Betrachtung handelt: Keine Verluste durch Absorption, eine „unsichtbare“ Gegenseibe ohne Reflexion und Absorption und ein „kastenförmiges“ Transmissionsband, das so durch keine Beschichtung realisiert werden kann. Die praktische Grenze der Selektivität einer nicht idealisierten, realen und farbneutralen Beschichtung liegt etwa bei $S = 1.4$ also z. B. $L_T = 70 \%$, g -Wert = 50 %. Doch bei einem derart hohen g -Wert kann man nicht mehr von hochselektivem Sonnenschutz sprechen.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass bei einem idealen farbneutralen Sonnenschutz die theoretische Grenze der Selektivität von $S = 1,75$ nicht überschritten werden kann. Sonnenschutzbeschichtungen mit einer Selektivität $S \geq 1,75$ müssen demzufolge zwangsläufig eine Eigenfarbe in Reflexion und Transmission aufweisen.

Hohe Transmission ohne Farbneutralität

Lässt man die Forderung nach Farbneutralität fallen, eröffnet sich eine ausgezeichnete Möglichkeit, zusätzlich zur Unterdrückung der Transmission im UV und im nahen Infrarot die transmittierte Sonnenenergie im

sichtbaren Spektralbereich zu senken. Diese Möglichkeit besteht darin, die Transmission auf einem Wert von 100 % zu belassen, das Transmissionsband (λ_T) jedoch schrittweise einzuschränken. Dabei wird wieder jegliche Absorption ausgeschlossen.

In Bild 4 ist die Transmissionskurve exemplarisch für den Fall $500 \text{ nm} \leq \lambda_T \leq 620 \text{ nm}$, dargestellt und Tabelle 2 zeigt die zu den verschiedenen Transmissionsbändern gehörigen lichttechnischen Daten sowie die Farbwerte in Transmission ($L^*(T)$, $a^*(T)$, $b^*(T)$) und in Reflexion ($L^*(R)$, $a^*(R)$, $b^*(R)$). Die Zeilen mit den Farbwerten in Reflexion und Transmission sind mit den Farben hinterlegt wie sie etwa an der Verglasung auftreten. Die durch das schmalere werdende Transmissionsband bedingten Verläufe von L_T , L_R , g -Wert und Selektivität sind in Bild 5 graphisch dargestellt.

Durch diese schrittweise Einschränkung des Transmissionsbandes λ_T fällt der g -Wert nahezu linear, da die Intensität der Sonnenstrahlung im gesamten sichtbaren Spektralbereich ($380 \text{ nm} \leq \lambda_T \leq 780 \text{ nm}$) auf hohem Niveau weitgehend konstant ist. Dagegen wird L_T bis zu dem Transmissionsband $460 \text{ nm} \leq \lambda_T \leq 660 \text{ nm}$ kaum vermindert, da das menschliche Auge in den blauen und roten Randbereichen des sichtbaren Lichtes ($380 \text{ nm} \leq 460 \text{ nm}$ und $660 \text{ nm} \leq 780 \text{ nm}$) am wenigsten empfindlich ist. Die Einschrän-

kung des Transmissionsbandes führt ab $480 \text{ nm} \leq \lambda_T \leq 640 \text{ nm}$ zu einer Steigerung der Lichtreflexion L_R und so zu einer erheblichen Steigerung der Selektivität.

Durch diesen selektiven Eingriff in den sichtbaren Spektralbereich treten bereits bei relativ breiten Transmissionsbändern intensive Farben auf, d. h. die Farbwerte a^* und b^* entfernen sich deutlich vom farbneutralen Ursprung ($a^* = 0$ und $b^* = 0$). Diese Farben werden jedoch wieder wegen der mangelnden Empfindlichkeit des menschlichen Auges in den Randbereichen des sichtbaren Spektrums kaum wahrgenommen. Dies kommt durch die geringen Werte $L^*(R)$ und die hohen Werte $L^*(T)$ zum Ausdruck. Erst ab dem Transmissionsband $480 \text{ nm} \leq \lambda_T \leq 640 \text{ nm}$ findet eine signifikante Absenkung der Reflexion $L^*(R)$ statt, so dass diese intensiven Farben auch wahrgenommen werden.

Die Entwicklung der Farbwerte bei der Einschränkung des Transmissionsbandes im roten und blauen Bereich des sichtbaren Spektrums ist für hochselektive Sonnenschutzbeschichtungen typisch. Es wird in Durchsicht rotes und blaues Licht zunehmend ausgeblendet, so dass lediglich grün-gelbes Licht durch die Verglasung tritt, was sich in den Farbwerten durch einen negativen $a^*(T)$ und ein positives $b^*(T)$ niederschlägt. Durch die Annahme einer absorptionsfreien Beschichtung werden die ausgeblendeten Spektralanteile blau und rot reflektiert. So nehmen in Reflexion a^* positive und b^* negative Werte an und es entsteht eine rotblaue (violette) Reflexionsfarbe.

Durch Verschieben eines Transmissionsbandes konstanter Breite können die Farben modifiziert werden. Verschiebt man das Band zu kürzeren Wellenlängen, werden $a^*(T)$ und $b^*(T)$ vermindert, gleichzeitig werden $a^*(R)$ und $b^*(R)$ erhöht. Dadurch erscheint in Durchsicht die Beschichtung weniger gelb und mehr grün, in Reflexion

VIS-Transmission (%) (ohne Absorption)	380-780	400-760	410-730	430-710	450-690	460-650	480-640	500-620	510-590	530-570
L_T (%)	100,00	100,00	99,99	99,94	99,87	98,73	95,81	88,89	72,59	46,17
L_R (%)	0,00	0,00	0,01	0,06	0,43	1,27	4,19	11,31	27,41	53,83
g (%)	87,01	83,13	46,49	41,61	36,30	33,94	27,68	21,49	12,45	6,33
S	1,75	1,88	2,15	2,4	2,74	2,92	3,46	4,13	5,83	7,29
$L^*(T)$	100,0	100,0	100,0	100,0	99,8	99,5	98,3	95,4	88,1	73,5
$a^*(T)$	0,00	-0,06	-0,26	-3,09	-13,12	-20,87	-33,42	-42,70	-77,02	-81,49
$b^*(T)$	0,00	0,09	0,43	5,32	25,66	42,37	83,37	115,34	117,43	115,42
$L^*(R)$	0,00	0,01	0,06	0,6	4,0	11,3	24,6	40,4	59,6	78,5
$a^*(R)$	0,00	1,30	6,16	62,03	130,08	136,97	129,06	102,65	83,29	51,85
$b^*(R)$	0,00	-2,18	-5,96	-56,94	-105,27	-113,62	-115,95	-98,92	-67,57	-36,57

Tabelle 2: Lichttechnische Daten und Farbwerte bei verschiedenen Transmissionsbändern

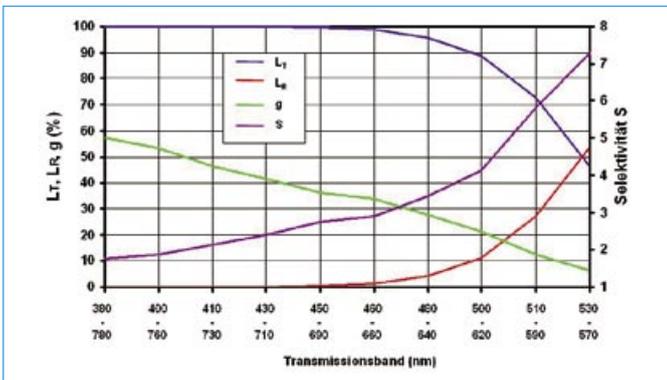


Bild 5: Verlauf L_T , L_R , g und S bei verschiedenen Transmissionsbändern

weniger blau und mehr rot. Verschiebt man das Transmissionsband zu längeren Wellenlängen, entwickeln sich die Farben in die umgekehrte Richtung. Die Durchsicht erscheint gelblicher und die Reflexion bläulicher. In jedem Fall wird durch eine Verschiebung die Transmission gesenkt und der g -Wert gesteigert, d. h. die Selektivität vermindert. Die Auswirkungen der Verschiebung des Transmissionsbandes auf die lichttechnischen Daten sind in Tabelle 3 in den Spalten 3 und 4 im Vergleich zu Spalte 2 dargestellt. In Spalte 1 sind die lichttechnischen Größen und die Farbwerte bezeichnet. Die Zeilen mit den Farbwerten sind mit Farben hinterlegt wie sie an der Verglasung auftreten.

Durch eine Verminderung der Transmission bei konstanter Bandbreite λ_T wird $a^*(T)$ vergrößert, $b^*(T)$ verkleinert, $a^*(R)$ verkleinert und $b^*(R)$ vergrößert. Die Farbwerte bewegen sich auf den Ursprung zu, wodurch die Beschichtung sowohl in Durchsicht als auch in Reflexion farbneutraler erscheint. Die Selektivität bleibt wie erwartet gleich. Die Farbentwicklungen durch Verminderung der Transmission sind in Tabelle 3 in den Spalten 2 und 5 gegenübergestellt.

außerhalb des Transmissionsbandes werden ebenfalls absorbiert. Es wird also in keinem Teil des Spektrums Licht reflektiert. Zusätzlich wird auf Ebene 2 eine Beschichtung mit einem normalen Emissionsvermögen von 2 % vorausgesetzt. Die Auswirkungen der Absorption sind in Tabelle 3 in den Spalten 5 und 6 vergleichend dargestellt. Die Lichttransmission bleibt unbeeinflusst, da nun derselbe Lichtanteil absorbiert statt reflektiert wird. Dasselbe gilt für die Transmissionsfarben. Für die Lichtreflexion gilt erwartungsgemäß $L_R = 0\%$, d. h. es können auch keine Reflexionsfarben auftreten (d. h. $L^*(R) = a^*(R) = b^*(R) = 0$). Allerdings wird die absorbierte Lichtenergie in Wärmeenergie umgewandelt, die nun als sekundäre Wärmestrahlung q abgestrahlt wird, wobei der Anteil q_i zusätzlich zur direkt transmittierten Sonnenenergie E_t ins Gebäude gelangt. Demzufolge wird bei gleichbleibender Lichttransmission der g -Wert erhöht, was zu einer Verringerung der Selektivität führt. Der Effekt ist umso ausgeprägter, je größer das Emissionsvermögen der Beschichtung ist.

- Das theoretische Maximum der Selektivität bei einer absolut farbneutralen Sonnenschutzschicht beträgt $S = 1.75$ (idealisiertes Kastenspektrum).
- Das praktisch realisierbare Maximum der Selektivität einer farbneutralen Beschichtung liegt etwa bei $S = 1.4$. D. h. umgekehrt, Beschichtungen mit $S > 1.4$ sind nicht farbneutral.
- Durch eine Einschränkung des Transmissionsbandes kann die Selektivität beträchtlich gesteigert werden. D. h. der g -Wert wird bei hoher Lichttransmission stark verringert.
- Sonnenschutzschichten mit $S \geq 1.75$ weisen allerdings zwangsläufig eine ausgeprägte Eigenfarbe in Reflexion und Transmission auf.
- Hochselektive Sonnenschutzbeschichtungen zeigen typische Farben. In Transmission sind sie im Allgemeinen gelbgrün, in Reflexion rotblau.
- Die Farben können durch Verschieben der Transmissionsbänder den gestalterischen Wünschen entsprechend verändert werden. Die Transmission wird dadurch erheblich gesenkt, die Selektivität wird vermindert.
- Durch eine Erhöhung der Reflexion bei konstanter Bandbreite kann eine bessere Farbneutralität erreicht werden. Die Selektivität bleibt dabei konstant.
- Absorption im Schichtsystem erhöht den g -Wert, verringert also die Selektivität. Diese Verringerung ist umso erheblicher, je größer das Emissionsvermögen der Beschichtung ist.
- Hochreflektierende Sonnenschutzbeschichtungen weisen bei gleicher Lichttransmission im Allgemeinen eine höhere Selektivität auf als Beschichtungen mit niedrigerer Lichtreflexion.

In der nächsten und letzten Folge wird näher auf die realen Anforderungen an Sonnenschutzbeschichtungen eingegangen. Anhand eines realen Schichtsystems wird der beschriebene Zielkonflikt, der durch die geforderte Farbneutralität bei gleichzeitig hoher Transparenz und niedrigem g -Wert entsteht, nochmals verdeutlicht. Die farbliche Wirkung des realen Schichtsystems und dessen Verhalten bei verschiedenen Betrachtungswinkeln werden ausführlicher beschrieben. ■

Lichttechnische Daten, Farbwerte	590 nm - 570 nm ($T=100\%$) (ohne Absorption)	500 nm - 540 nm ($T=100\%$) (Verschiebung zu kürzeren Wellenlängen, ohne Absorption)	560 nm - 580 nm ($T=100\%$) (Verschiebung zu längeren Wellenlängen, ohne Absorption)	590-570 nm ($T=70, R=30$) (Transmissionsänderung ohne Absorption)	590-570 nm ($T=10, R=90$) (Transmissionsänderung mit Absorption)
L_T (%)	46.17	33.71	37.39	32.32	30.32
L_R (%)	53.83	66.29	62.61	67.68	69.68
g (%)	6.33	8.65	8.95	4.43	8.87
S	7.29	3.5	4.21	7.29	3.45
$L^*(T)$	73.5	51.7	67.8	63.5	63.5
$a^*(T)$	81.69	155.27	8.65	-72.36	-72.36
$b^*(T)$	115.42	33.26	115.39	101.51	101.51
$L^*(R)$	73.5	51.7	67.8	63.5	63.5
$a^*(R)$	51.86	54.25	-6.43	32.82	0.01
$b^*(R)$	-36.27	-21.87	-28.11	-23.91	0.02

Tabelle 3: Beeinflussung der Farbwerte durch Verschieben des Transmissionsbandes und durch Absorption

In den bisherigen Betrachtungen wurden völlig absorptionsfreie Beschichtungen angenommen. In realen Schichtsystemen kann Absorption in Glas und Beschichtungsmaterialien jedoch nicht ausgeschlossen werden. Deshalb stellt sich noch die Frage, wie sich die lichttechnischen Daten einer Sonnenschutzbeschichtung ändern, sobald Absorption einbezogen wird. In dem folgenden Beispiel wird von einer extremen Absorption ausgegangen. Im Band $530 \text{ nm} \leq \lambda_T \leq 570 \text{ nm}$ wird eine Transmission von 30 % angenommen, die verbleibenden 70 % werden absorbiert. Alle Anteile der Sonnenenergie

Um eine möglichst hohe Selektivität erreichen zu können ist demzufolge bei gleichbleibender Lichttransmission eine hohe Lichtreflexion günstiger als eine hohe Absorption.

Ergebnisse

- Eine Senkung der transmittierten Sonnenenergie im gesamten sichtbaren Spektralbereich durch Reflexion hat neben der Senkung des g -Wertes auch eine Senkung der Lichttransmission zur Folge. Die Selektivität kann dadurch nicht gesteigert werden; sie bleibt konstant.

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.