

Hohe Anforderungen an die Beschichtungsverfahren

Dr. Rolf Blessing

Architektur und Solartechnik haben sich durch funktionelle Beschichtungen revolutionär verändert. Bei Gebäudeverglasungen konnte der Wärmedurchgangskoeffizient von ca. $6 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ gesenkt werden. Die Solarenergiegewinne von Fassaden und Gläsern sind einstellbar geworden. Solarkollektoren mit niedrigsten Emissivitäten, höchsten Absorptionen und ansprechender Ästhetik sind verfügbar. Dies wird ermöglicht durch ultradünne Beschichtungen, die nahezu vollständig durch großflächiges Sputtern hergestellt werden. Mit den drastisch gestiegenen Anforderungen an die Bauprodukte sind auch die Anforderungen an die Beschichtungsverfahren und Anlagen drastisch gestiegen.

Architekturglasschichten

Beschichtungen auf Architekturglas dienen in erster Linie der Wärmedämmung und Heizenergieeinsparung. Zentrale Schichtkomponente ist eine Silberschicht, die das Energieabstrahlungsvermögen (Emissivität) der beschichteten Oberfläche um nahezu zwei Größenordnungen verändert. Transmission und Reflexion im sichtbaren Sonnenspektrum können dabei völlig unverändert bleiben.

Solche Silberschichten sind ultradünn und extrem gleichmäßig. Außerdem müssen sie hinsichtlich ihrer Fehlerfreiheit im Gefüge hohen Anforderungen genügen.

Schichtdicke d [in nm]	11
Homogenität Δd [in nm]	± 1
Flächenwiderstand R_{\square} [in Ω]	4
Emissivität [in %]	4
Beschichtungsformat [in m x m]	3,21 x 6

Tabelle 1: Eigenschaften von Ag-Schichten für Architekturglas

Aus Gründen der optischen Entspiegelung, Langzeitstabilität, Verarbeitbarkeit und dem Wunsch nach Variabilität sind die Silberschichten in ein Schichtpaket eingebaut, das auch dielektrische Schichten in Form von Metalloxiden enthält. Homogenität, Struktur und Fehlerfreiheit der Metalloxidschichten dürfen nicht schlechter sein als bei den Silberschichten. Sie haben aber weitere besondere Eigenschaften zu erfüllen.

Beispielsweise ermöglichen diese Schichten durch ihre speziellen Brechungsindizes, Absorptionskonstanten und Dispersionseigenschaften erst die optischen Wärmeschutz- oder Sonnenschutzschichten. Typische Schichtpakete für die Architektur

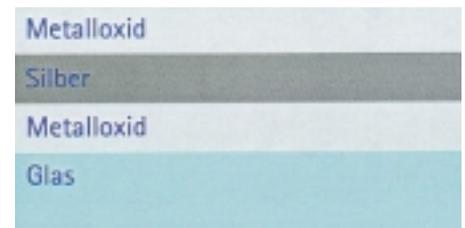


Bild 1: Wärmeschutzschichtsystem

Schichtdicke d [in nm]	$\approx 30 - 60$
Homogenität Δd [in nm]	± 1
Brechungsindex n	$1,5 < n < 2,5$
Dispersion	niedrig
absorptionsfrei	ja

Tabelle 2: Eigenschaften von Metalloxidschichten in der Architektur

haben den in Tabelle 1 und Bild 1 dargestellten Aufbau.

Aus dem 3schichtigen Grundaufbau können weitere Vielschichtsysteme für die jeweiligen Optimierungsfragestellungen entstehen. Diese Produkte haben heute schon Eigenschaften recht nahe an den physikalischen Grenzen.

ipasol	S	Performance	ϵ	Performance	k_v
68/34	2,00	98 %	2 %	98 %	1,0
67/34	1,94	97 %	2 %	98 %	1,0
52/29	1,79	88 %	3 %	97 %	1,1
40/23	1,74	85 %	3 %	97 %	1,1
Grenzwert	2,04	100 %	0 %	100 %	1,0

Tabelle 3: Performance – 100 % entspricht der physikalischen Grenze Selektivitätszahl $S = T_L/g$; T_L = Lichtdurchlässigkeit; g = Gesamtenergieeintrag. Die Selektivitätszahl S beschreibt das Verhältnis von Lichtdurchlässigkeit T_L zum Gesamtenergieeintrag g

Beispielsweise lassen moderne Sonnenschutzschichten heute schon nicht mehr Energie ins Haus als im sichtbaren Licht für die Ausleuchtung enthalten ist.

Die Emissivität moderner Schichtoberflächen erreicht heute bereits Werte bis herab zu 2 % ein Wert, ebenfalls sehr nahe an der Grenze von 0 %.

Solare Absorberschichten

Schichten zur Absorption solarer Energie finden in Flach- oder Röhrenkollektoren Anwendung. Sie werden in der Regel auf Kupferbänder aufgebracht und müssen der sonnenbestrahlten Oberfläche eine möglichst hohe Absorption verleihen. Die niedrige Emissivität der unbehandelten Kupferoberfläche soll erhalten bleiben. Hier haben absorbierende Metallschichten die klassischen Galvanikschichten abgelöst.

Gradientenschichten auf der Basis von Nickel-Chrom-Eisen Legierungen oder Titanoxinitriden absorbieren etwa 95 % der solaren Energieeinstrahlung, sind aber noch dünn genug, um im Bereich der thermischen Infrarotstrahlung transparent zu sein. Damit bleibt die Emissivität der Kupferoberfläche erhalten – zu Gunsten der Wärmeerträge der Kollektoren.

Das großflächige Sputterverfahren kann hier im Bereich der ökologisch sensiblen Solarbranche seinen Grundvorteil der absoluten Umweltverträglichkeit ausspielen. Ein Vorteil, der immer maßgeblicher wird.

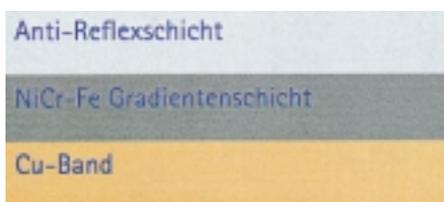


Bild 2: Absorberschichtsystem – umweltverträgliche NiCr-Fe Gradientenschicht auf Kupferband als hochselektive Absorberschicht für Solarkollektoren

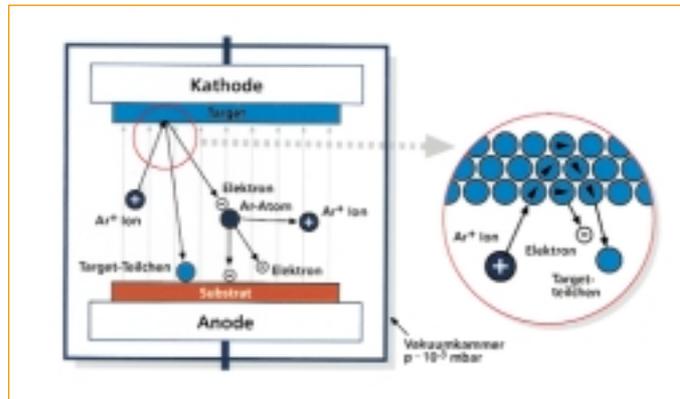


Bild 3: Prinzip Magnetronsputtern

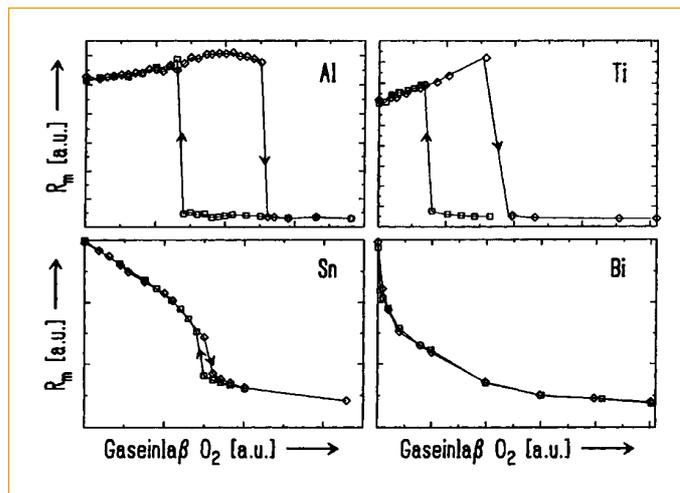


Bild 4: Sputterkennlinien

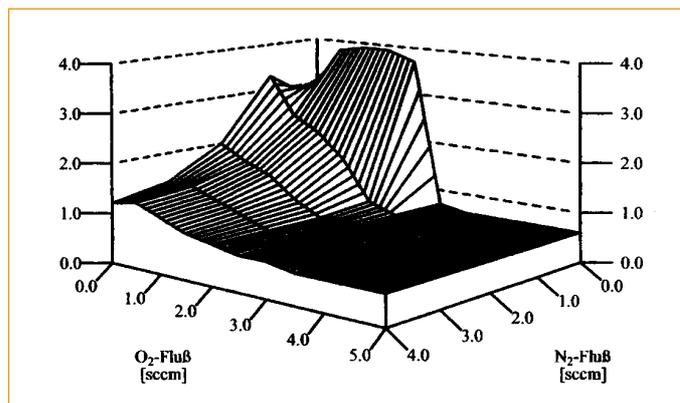


Bild 5: Kennlinienfeld – Sputterausbeute in Abhängigkeit vom O₂- bzw. N₂-Fluß

Das Beschichtungsverfahren

Das Beschichtungsverfahren sowohl für Architekturglasbeschichtungen als auch für solare Absorptionsschichten hat etwa vergleichbaren Kriterien zu entsprechen. Diese sind:

- Großflächigkeit
- Homogenität
- Beschichtungsraten/Taktzeiten
- Output (p. a.)
- Kosten
- Umweltverträglichkeit
- Materialien u. a.

Für großflächige, homogene Beschichtungen mit selektiven optischen Eigenschaften haben sich planare, magnetfeldunterstützte Kathodenzerstäubungsverfahren durchgesetzt. Sie sind unter dem Begriff „Magnetronsputtern“ bekannt. Dabei werden Gasionen aus einer Plasmaentladung auf die Kathode beschleunigt und lösen dort durch Stoß mechanisch Atome ab.

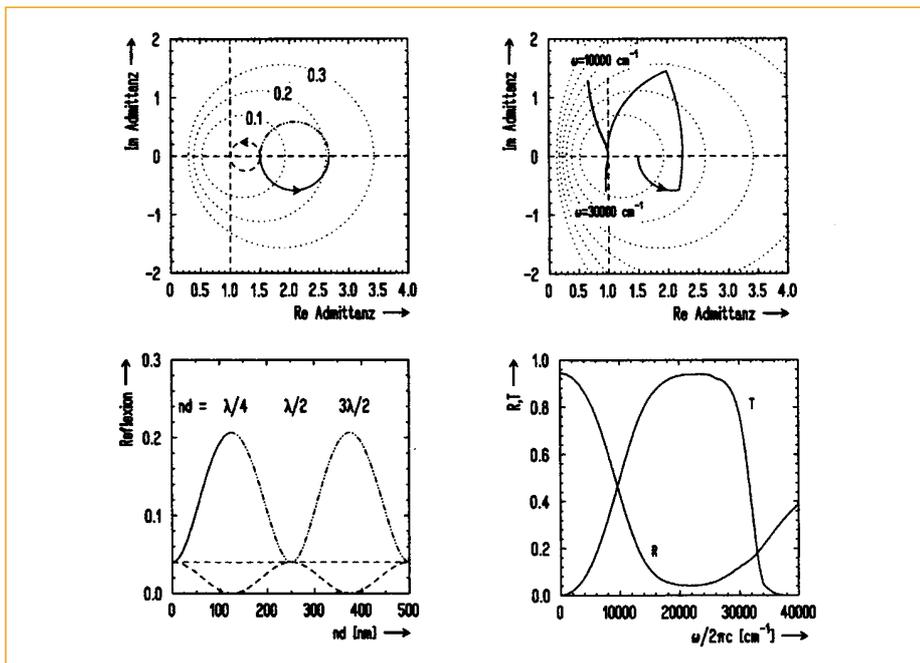


Bild 6: (links) Admittanzmodell – Auf Glassubstrat ($n_D = 1,5$) werden zwei verschiedene Dielektrika aufgebracht (--- $n_D = 2$ und - - - $n_D = \sqrt{1,5}$). Die obere Abbildung zeigt den Admittanzverlauf $Y(d)$ für die Wellenzahl $20\,000 \text{ cm}^{-1}$. Hierbei nimmt die Schichtdicke in Pfeilrichtung zu. Die Isoreflexionslinien sind eingezeichnet (...). In der unteren Abbildung ist das Reflexionsvermögen über der optischen Schichtdicke aufgetragen. Die Maxima sind um $\pi/2$ phasenverschoben. Für $n_D = 2$ ist der Funktionsverlauf bis $n_D = \lambda/4$ durchgezogen (-). Die rechte Darstellung zeigt den Admittanzverlauf eines Dreischichtsystems: $Dk (n_D = 2)/\text{Metall} (KM = 3,5)/Dk (n_D = 2)$ auf Glas ($n_s = 1,5$). Neben $Y(d)$ (Wellenzahl: $20\,000 \text{ cm}^{-1}$) ist auch Y_{dmax} eingezeichnet (Wellenzahl: $10\,000 \dots 30\,000 \text{ cm}^{-1}$). Unten: Reflexion und Transmission des oberen Systems

Durch Zugabe reaktiver Gase in die Entladung lassen sich nicht leitende, dielektrische Schichten herstellen (Oxide, Nitride). Metallische Schichten erhält man aus der nicht reaktiven Plasmaentladung. Die dielektrischen Eigenschaften der Schichten, deren Struktur und Stöchiometrie hängen in komplexer Weise vom Beschichtungsprozess ab.

Durch Kultivierung der Prozeßgeometrie, der Entladung, des Gasinlasses und des Vakuumsystems lassen sich die Schichteigenschaften optimieren. Besonders hilfreich sind dabei Kennlinien und die Festlegung von Arbeitspunkten. Dadurch lassen sich die gewünschten Schichten einstellen und zeitlich konstant halten. Bei der Verwendung mehrerer reaktiver Gase ergeben sich so Kennlinienfelder, innerhalb derer beherrschbare Arbeitspunkte zu wählen sind.

Moderne Magnetronsputteranlagen sind Vielkathoden-Durchlaufsysteme. Die Taktzeit für die Beschichtung einer Charge (z. B. ein Blatt $3,21 \times 6 \text{ m}^2$) liegt unterhalb 60 sec. Die Jahreskapazität beträgt pro Anlage bis zu 8 Mio. m^2 .

Üblicherweise kann ohne Kathodenumbau eine ganze Palette unterschiedlicher Schichtsysteme hergestellt werden. Meist handelt es sich dabei um diverse Sonnenschutzschichten. Diese dienen der Minimierung des Energieeintrages in ein Gebäude und der Veringerung der Klimatisierungskosten.

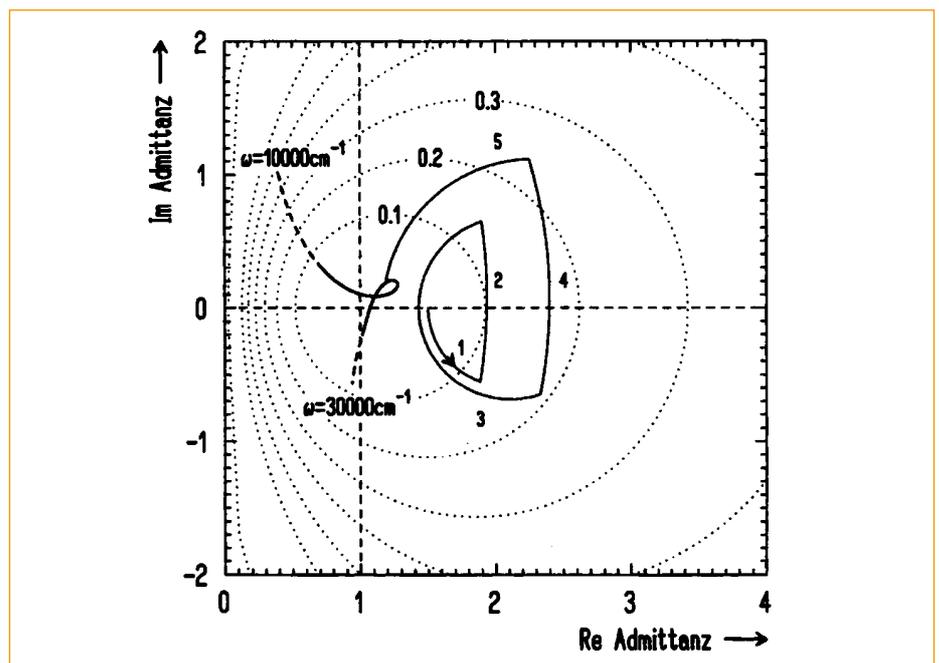


Bild 7: Admittanzdarstellung 5-Schichtsystem – Admittanzverlauf eines optimierten 5-Schichtsystems Glas/AiN/Ag/AiN/Ag/AiN. $Y(d)$ ist für die Wellenzahl $20\,000 \text{ cm}^{-1}$ dargestellt. Die Schichten sind der Reihenfolge nach numeriert. Y_{dmax} hat einen schleifenförmigen Verlauf in der Nähe des Vakuumpunktes und nähert sich bei kleinen Wellenzahlen schneller der imaginären Achse als dies beim Dreischichtsystem der Fall ist (- sichtbarer Bereich). Die IR-Reflexion hat somit einen steileren Verlauf

Der physikalische Hintergrund

Die optische Wirkung dünner Schichten läßt sich am Transmissions- und Reflexionsverlauf – abhängig von der jeweiligen Schichtdicke – verfolgen. Oft schafft aber die Betrachtung der Admittanz besseren Überblick.

Die relative Admittanz ist das Verhältnis von magnetischer zu elektrischer Feldstärke.

$$y = z_0 \frac{H}{E}$$

($z_0 = 377 \Omega$ Vakuumwellenwiderstand)

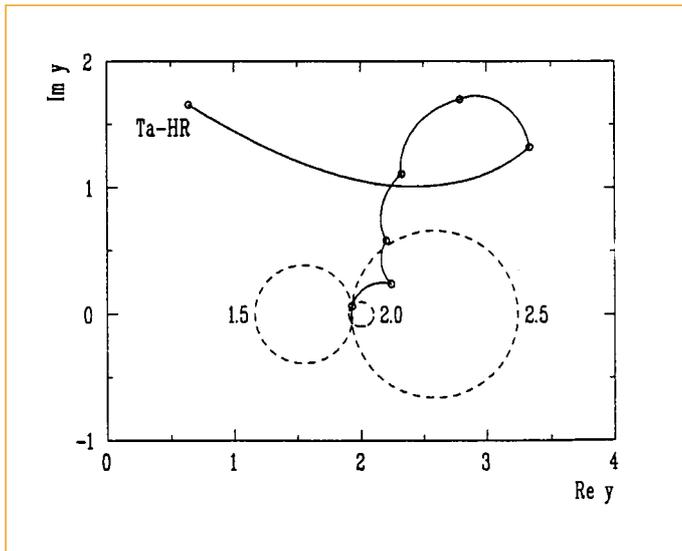


Bild 8: Admittanzdarstellung eines solaren Absorberschichtsystems: Relative Admittanz des Systems aus sechs TaO_x -Schichten nach Tabelle 4 mit der Schichtdicke als Parameter bei $20\,000\text{ cm}^{-1}$ für $= 0^\circ$ Einfallswinkel (-) TaO_x -Schichten; (---) zusätzliche Deckschicht mit $n = 1,5/2/2,5$

Nr.	Material	Dicke [nm]
8	Al_2O_3	80
7	Ta_2O_5	32
6	TaO_x	25
5	TaO_x	25
4	TaO_x	25
3	TaO_x	25
2	TaO_x	25
1	Ta	100

Tabelle 4: System mit Al_2O_3 -Deckschicht – Schichtaufbau und die breitbandige solare Entspiegelung eines Schichtsystems

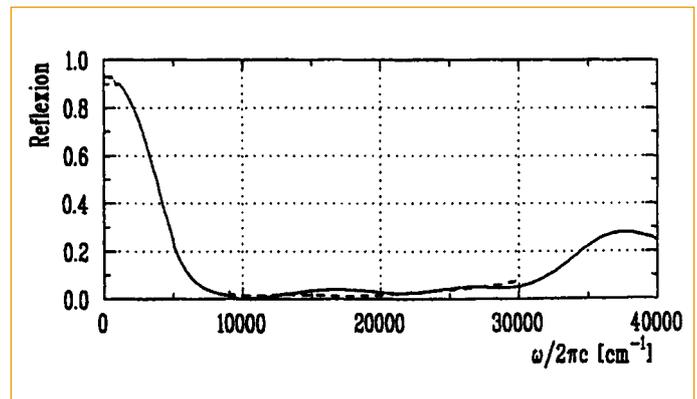
Aus den Maxwellgleichungen erhält man eine Transfermatrix für die Felder der Rückseite in die der Vorderseite einer Schicht. Bei Vielfachschichtsystemen erreicht man das Gleiche durch Matrixmultiplikation.

In der Admittanzdarstellung (Bild 6) für Dielektrika werden für wachsende Schichtdicken Kreise durchlaufen. Die Darstellung erlaubt ein übersichtliches Design auch für komplexe Schichtsysteme. Bei der Betrachtung der Schichtseite startet ein Schichtsystem auf Glas beim Wert 1,5 des Realteils der relativen Admittanz. Für entspiegelnde Schichten muß der Admittanzkreisbogen bei der Vakuumadmittanz 1 enden, um die Antireflexbedingung zu erfüllen.

Eine Optimierung der Farbempfindlichkeit als Folge von Schichtdickenschwankungen erfolgt durch rechnerische Modellierung, wobei für unterschiedliche Wellenzahlen gerechnet wird. Die Admittanzpunkte für alle sichtbaren Wellenzahlen müssen innerhalb eines (kreisförmig berandeten) Isoreflexionsgebietes liegen. Somit ist sichergestellt, daß kein spektraler Anteil mit zu hohem Wert reflektiert wird und dadurch Farbeffekte erzeugt.

Dreh- und Angelpunkt für diese Modellrechnungen sind realistische dielektrische Funktionen für die gesputterten Dünnschichtmaterialien. Hierin liegt das eigentliche Know-how und nur damit lassen sich komplexe Entwicklungen ersetzen durch realitätsnahe Simulationsrechnungen.

Bild 9: Spektrale solare Reflexion eines Absorberschichtsystems – Reflexion des Systems nach Tabelle 4 aus sechs TaO_x -Schichten und einer Al_2O_3 -Deckschicht auf einem Ta-Halbraum (-) Messung und (---) Simulation Bilder: Interpane



Die Anwendung auf Absorberschichten

Absorberschichten benötigen absorbierende Metalle. Diese stellen sich nicht mehr als Kreise im Admittanzmodell dar, sondern als Spiralen.

Ein Schichtsystem aus sechs Tantaloxidschichten, aufgebracht auf einem Metall (Ta), endet beim Realteil der Admittanz von etwa 2. Zur Entspiegelung wird ein Material mit Brechungsindex 1,5 benötigt.

Komplexe Schichten möglich

Großflächige Beschichtungen für die Architektur mit herausragender Performance sind heute Stand der Technik. Wärmeschutzschichten garantieren wegen optimaler Wärmeübergangskoeffizienten und hohem Solarenergiedurchgang minimalen Energieeinsatz für die Heizung. Sonnenschutzschichten minimieren den Klimatisierungsaufwand kommerzieller Gebäude mit Glasfassaden.

Eine optimierte Sputter-Durchlaufanlagentechnik gewährleistet Prozeßstabilität, Schichthomogenität und hohes Produktionsvolumen unter wirtschaftlichen Bedingungen.

Die Messung dünnschichtspezifischer dielektrischer Daten und der Einsatz moderner Modellierungstechniken erlauben Design und Ausführung auch komplexer Schichtsysteme. □

Literatur:

- [1] J. Stollenwerk: Reaktives Sputtern von Oxidfilmen – Herstellung dielektrischer dünner Schichten für technische Anwendungen, 1993
- [2] Th. Muggenburg: Temperaturbeständige Dünnschichtsysteme auf Floatglas für energietechnische Anwendungen, 1995
- [3] M. Harke: Optische Eigenschaften reaktiv gesputterter Metalloxidschichten für die Verwendung in funktionalen Mehrschichtsystem, 1993