

Beim Putzen von verschmutzten Fensterscheiben hellen sich bekanntlich Räume auf. Schmutz auf Fensterscheiben – in der Regel handelt es sich um Bewitterungsschmutz auf der Scheibenaußenseite – schwächt einfallendes Tageslicht ab; die Fachleute sprechen hier auch von Licht-„Dämpfung“. Diesen zu untersuchen, macht m. E. sehr viel Sinn. Es zeigt sich, daß man dabei nicht nur über dessen Herkunft, Struktur und Eigenschaften etwas erfährt, sondern auch in dessen Verhalten auf Flachglasoberflächen Einblick erhält, was sicher für die Entwicklung von Oberflächen für die Außenanwendung, z. B. auch selbstreinigenden Oberflächen, von Interesse ist.

In der Veröffentlichung [1] wurde dieses Thema schon einmal abgehandelt. Es wurde dort die Abschwächung durch Bewitterungsschmutz auf Flachglasoberflächen anhand von spektralen Messungen im Bereich der Sonnenstrahlen nachgewiesen. Die Herkunft des Schmutzes wurde offen gelassen. Es wurde gezeigt, daß sich die Lichtabschwächung wie eine Absorption auswirkt. Im Bild 1 – entsprechend Bild 2 in [1] – ist nochmals, die gemessene spektrale Absorptionszunahme durch Bewitterungsschmutz auf Floatglasscheiben dargestellt, die unterschiedliche Zeiten außen exponiert waren.

Auf einen Blick:

- witterungsbedingte Schmutzablagerungen sind Aerosol-Partikel aus Erdatmosphäre
- abgelagerte streuende Aerosol-Partikel meist $D < 1 \mu\text{m}$
- bei Ablagerung behalten Aerosol-Partikel ihre Streueigenschaften für Licht bei
- thermisches Emissionsvermögen nahezu nicht beeinträchtigt
- einfallendes Tageslicht wird durch witterungsbedingte Schmutzablagerungen ins Rötliche verschoben

Von außen verschmutzte Fensterscheiben:

Wie der Lichteinfall geschwächt wird

Hans Joachim Gläser

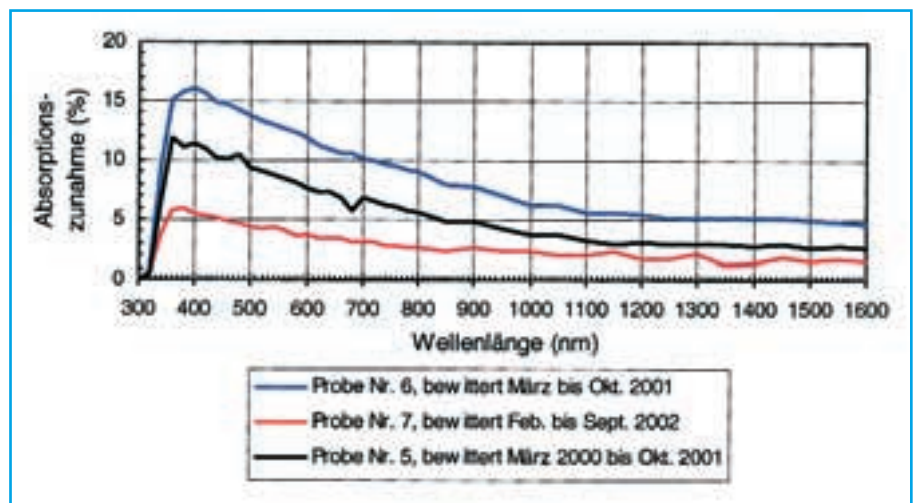


Bild 1: Spektrale Absorptionszunahme durch Bewitterungsschmutz auf Floatglasscheiben nach unterschiedlichen Außenexpositionen unter 30° Neigung (dargestellt ist die Differenz der Absorptionen von bewitterten sowie anschließend gereinigten Scheiben $\alpha_{\text{bew.}} - \alpha_{\text{bew. + ger.}}$ [1])

Anmerkung: In der Veröffentlichung [1] wurde fälschlicherweise $\alpha_{\text{bew.}} - \alpha_{\text{bew. + ger.}}$ als Absorption der Schmutzablagerung selbst gedeutet, was ein Unterschied zur Deutung in dieser Veröffentlichung ist. Die Korrektur hat aber auf die übrigen in Veröffentlichung [1] getroffenen Aussagen und Folgerungen keine Auswirkungen, da eine Korrelation zwischen diesen beiden Größen existiert

Die gleiche Tendenz der spektralen Lichtabschwächung, gemessen als spektrale Absorptionszunahme, zeigte auch das beschichtete Floatglas „K-Glass“ (Pilkington), das mit der Schicht zum Außenraum bewittert wurde [2]. Es ist deshalb festzustellen: Die Abschwächung des Lichtdurchgangs hängt bei Floatglas und „K-Glass“ bezüglich der Intensität von der Bewitterungsperiode ab (siehe Bild 1); bei beiden Gläsern steigt sie jedoch von etwa der Wellenlänge $\lambda = 1000 \mu\text{m}$ ($= 1 \mu\text{m}$) zu kleineren Wellenlängen, d. h. vom roten zum blauen Spektralbereich an. Einen gleichartigen spektralen Verlauf zeigt auch die Messung der diffusen Transmission und Reflexion an Floatglasproben, z. B. an „K-Glass“-Proben, die bis zu zwei Jahren außenbewittert wurden (siehe Bilder 2 und 3). Man weiß, daß die diffuse Transmission und Reflexion der unbewitterten „K-Glass“-Probe in den Bildern 2 und 3 durch Lichtstreuung an der sehr rauhen Oberfläche

der „K-Glass“-Schicht verursacht und als „Schleier“, in der angelsächsischen Literatur als „Haze“ bezeichnet wird.

Anmerkung: Dieser Effekt wird heute für die Erhöhung des Wirkungsgrades der Photovoltaik-Zellen auf der Basis von amorphem Silizium in Verbindung mit diesen beschichteten Scheiben ausgenutzt, s. a. [3], [4]; bei Fensterverglasungen stört er, wenn er mit bloßem Auge sichtbar ist.

Es ist deshalb davon auszugehen, daß die erhöhten diffusen Transmissionen und die erhöhte diffuse Reflexion bei den bewitterten Proben in den Bildern 2 und 3 ebenfalls auf Lichtstreuungsprozesse an den witterungsbedingten Schmutzablagerungen zurückzuführen sind.

Ein weiteres Phänomen ist, daß sich bei allen bisher untersuchten, mit der Schicht zur Außenseite bewitterten „K-Glass“-Scheiben deren niedrige thermische Emissionsvermögens ϵ nahezu nicht veränderte (max. Abweichung 2 % abs., s. [1], [2], [5], [6], [7]). Dies ist nur möglich, wenn man da-

von ausgeht, daß der Bewitterungsschmutz im Spektralbereich des thermischen Emissionsvermögens, d. h. noch weiter zum roten Spektralbereich hin, im fernen Infrarot ($\lambda = 5,5$ bis $50 \mu\text{m}$), nicht geschwächt wird, also dort hochtransparent ist.

Alle diese Beobachtungen, insbesondere die Zunahme der Effekte vom roten zum blauen Spektralbereich hin, sind ein Indiz dafür, daß Lichtstreuung an Partikeln im Spiel ist, wie z. B. auch bei den Phänomenen Morgen- und Abendrot.

Beim Morgen- und Abendrot mit sehr schräg einfallenden Sonnenstrahlen wird das einfallende Licht erheblich abgeschwächt. Im Gegensatz zur Mittagszeit mit steiler Sonneneinstrahlung kann man deshalb am frühen Morgen und späten Abend in die Sonne schauen. Sie erscheint dann rötlich. Physiklehrbüchern ist zu entnehmen, daß diese Abschwächung ganz wesentlich durch Streuung an Aerosol-Partikeln, d. h. Schmutzpartikeln in der Atmosphäre erfolgt. Sie wirkt sich dahingehend aus, daß, wie beim abgelagerten Bewitterungsschmutz auf Scheiben, der Rotanteil des Sonnenlichtes bevorzugt durchgelassen wird, d. h. bevorzugt sichtbar ist (vergleiche im Bild 1, die Absorptionszunahme ist in diesem Spektralbereich gering), zum blauen Spektralbereich hin wird jedoch das einfallende Licht immer mehr gestreut und somit abgeschwächt (im Bild 1 steigt die Absorptionszunahme zum blauen Spektralbereich hin); die Lichtstreuung hat zur Folge, daß der Himmel bei zur Sonne abgewandten Blickrichtungen azurblau wirkt. Die Frage ist deshalb, ob zwischen dem optischen Verhalten von Bewitterungsschmutz auf Floatglas bzw. „K-Glass“ und den Phänomenen Morgen- und Abendrot ein Zusammenhang besteht.

Energieverlust

Es stellt sich hier als erstes die Frage: Wie kommt es, daß sich Lichtabschwächung durch Streuung beim abgelagerten Bewitterungsschmutz als Absorption, d. h. als Energieverlust auswirkt (siehe Bild 1)?

Bei Sonnenstrahleneinfall in die Erdatmosphäre macht sich die Lichtabschwächung durch den blauen Himmel bemerkbar. Streuung bedeutet Lichtablenkung. In dem abgelagerten Schmutz, vergleichbar mit einem porösen Festkörper, erfahren durch Streuung abgelenkte Strahlen im Gegensatz zur relativ dünnen Erdatmosphäre auf sehr kurzen Strecken eine Folge von Ablenkungen an Partikeln (Bild 4), wobei, vergleichbar in etwa mit einer angestoßenen Billardkugel, kontinuierlich Energie verloren geht.

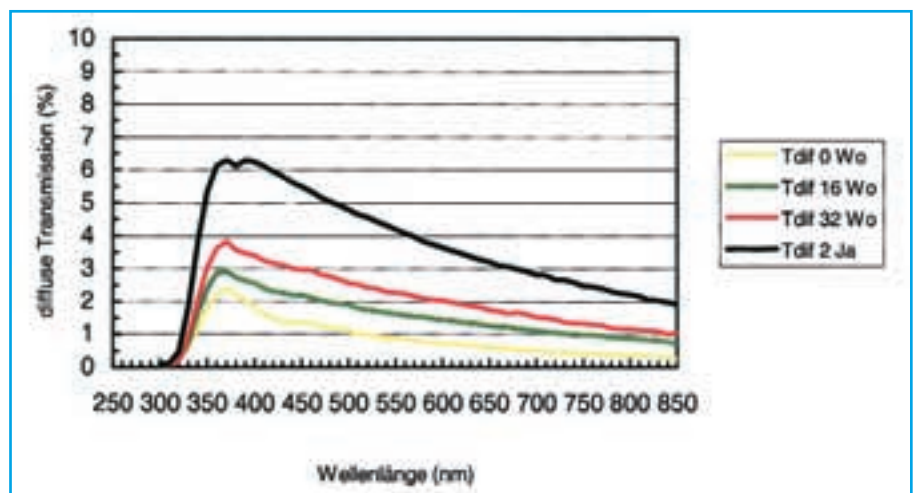


Bild 2: Spektraler Verlauf der diffusen Transmission von „K-Glass“-Proben, die bis zu zwei Jahren mit der Schicht zur Außenseite unter 30° Neigung bewittert wurden

Ein Teil des gestreuten Lichtes entweicht wieder zur Vorder- und Rückseite der Schmutzablagerung und ist als diffuse Reflexion bzw. Transmission, wie in den Bildern 2 und 3 gezeigt, meßbar. Der Rest des einfallenden Lichtes läuft sich quasi in dem abgelagerten Schmutz tot. Dies ist der Grund, warum sich die Abschwächung durch Streuung in einem Festkörper wie eine Absorption auswirkt. Es gilt auch hier das Gesetz: $1 = \text{Transmission} + \text{Reflexion} + \text{Absorption}$.

Anmerkung: Die manchmal zur Blendung führende intensive Lichtstreuung von Schmutz auf Windschutzscheiben bei Sonnenstrahleneinfall beruht auf dem gleichen Effekt.

Farbgläser (z. B. auch Sonnenbrillen auf der Basis von Farbgläsern) schwächen einfallende Lichtstrahlen auch durch Absorption ab. Hier beruht die Abschwächung jedoch nicht auf Streuung, sondern auf Energieabgabe an Farbstoffe (Metalloxide) in der Glasmatrix. Die Ursache der Lichtabsorption ist also eine andere.

Streuende Aerosol-Partikel

Die entscheidende Frage ist nun: Welche Größe haben die streuenden Aerosol-Partikel in der Erdatmosphäre und gibt es hier einen Zusammenhang mit dem auf Floatglas und „K-Glass“ abgelagerten Bewitterungsschmutz?

Aus der Theorie, s. a. [8], weiß man, daß Lichtstreuung entscheidend von der Größe der streuenden Partikel abhängt und daß sie besonders sensitiv ist, wenn die Partikelgröße D in der Größenordnung der einfallenden Lichtwellenlänge λ ist. Man nutzt dies z. B. für die Entwicklung von Disper-

sionsfarben aus. Im Bild 5 ist die aus der Meteorologie bekannte Größenverteilung der Aerosol-Partikel der kontinentalen Erdatmosphäre wiedergegeben, die auch die Phänomene Morgen- und Abendrot wesentlich bewirkt. Man erkennt, daß Aerosol-Partikel mit einem Durchmesser kleiner $1 \mu\text{m}$ in der kontinentalen Atmosphäre überwiegen. Sehr große Partikel (Durchmesser $> 10 \mu\text{m}$) sind so schwer, daß sie schon nahe ihres Entstehungsortes zur Erdoberfläche herabfallen. Sehr kleine Aerosol-Partikel (Durchmesser $< 0,1 \mu\text{m}$) lagern sich zu größeren mit einem Durchmesser bis zu $1 \mu\text{m}$ zusammen. Sie wirken als Kondensationskeime für Regentropfen und werden deshalb u. a. auch mit Regen aus der Erdatmosphäre eliminiert, d. h. auf Oberflächen abgelagert. Wertet man die den Bildern 1 bis 3 zugrunde liegenden Messungen theoretisch weitergehend aus (die Rayleigh-Gans-Debye-Näherung der Lichtstreuungstheorie ist hier ein Ansatz [8]), so stellt man fest, daß die beim Bewitterungsschmutz wirksame Streuung im Bereich des sichtbaren Lichtes ebenfalls auf Partikeln mit einer Größe $D < 1 \mu\text{m}$ beruht. Die Wellenlänge des einfallenden Lichtes λ ist hier vergleichbar mit der Partikelgröße D , es gilt also: $\lambda \sim D$.

Aus dem Vergleich der Bilder 1 bis 3 und 5 können deshalb folgende Schlußfolgerungen gezogen werden:

1. Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Aerosol-Partikelverteilung in der Erdatmosphäre und dem auf der Oberfläche von Floatglas und „K-Glass“ abgelagertem Bewitterungsschmutz.
2. Die Lichtstreuungseigenschaften der Aerosol-Partikel bleiben bei der Ablagerung auf der Floatglas- und „K-Glass“-Oberfläche in hohem Maße erhalten.

3. Es existiert damit auch ein Zusammenhang zwischen dem optischen Verhalten von Bewitterungsschmutz auf Floatglas- und „K-Glass“-Oberflächen und den Phänomenen Morgen- bzw. Abendrot.

Thermisches Emissionsvermögen

Dem schließt sich die Frage an: Warum ist der abgelagerte Bewitterungsschmutz auf „K-Glass“- und dann auch auf Floatglas-Oberflächen im fernen Infrarot ($\lambda = 5,5\text{--}50\ \mu\text{m}$) hochtransparent, so daß er das thermische Emissionsvermögen nahezu nicht beeinflusst?

Im Vergleich zum sichtbaren Bereich ändert sich das Streuverhalten der abgelagerten Partikel im fernen Infrarot entscheidend.

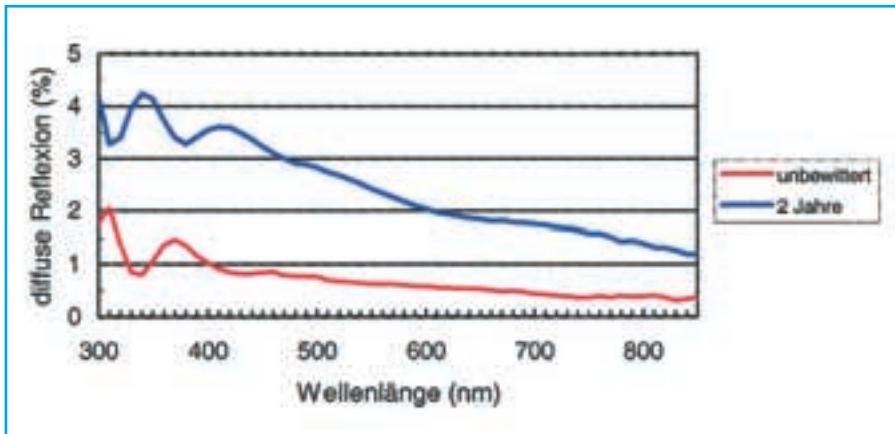


Bild 3: Spektraler Verlauf der diffusen Reflexion einer „K-Glass“-Probe, die mit der Schicht zur Außenseite unter 30° Neigung zwei Jahre bewittert wurde, im Vergleich zu einer unbewitterten Probe (Messungen der Schichtseite)

Da die Größe der abgelagerten Partikel $D < 1\ \mu\text{m}$ ist, folgt hier, daß die Wellenlänge λ der einfallenden Strahlung größer als die Partikelgröße D ist, also $\lambda > D$ gilt. In diesem Fall kann das Verhalten der streuenden Partikel mit der Rayleigh-Näherung der Streutheorie [8] gedeutet werden. Gemäß dieser Näherung ist die Streuintensität proportional zum Kehrwert der 4. Potenz der Wellenlänge λ , d. h. es gilt: $I_{\text{str.}} \sim 1/\lambda^4$.

Die Intensität der gestreuten Strahlung nimmt im Falle $\lambda > D$ also mit steigender Wellenlänge enorm schnell ab. Die sehr geringe Abschwächung der einfallenden Strahlung und damit hohe Transparenz des Bewitterungsschmutzes auf Floatglas und „K-Glass“ im Strahlungsbereich des thermischen Emissionsvermögens beruht hierauf, was zur Folge hat, daß deren thermisches Emissionsvermögen durch abgelagerten Bewitterungsschmutz nahezu nicht beeinflusst wird.

Streustrahlungsmessungen

Welche Erkenntnisse kann man aus der Untersuchung der Streustrahlung des Lichtes gewinnen?

Aus der weitergehenden Auswertung der Spektren zu Bild 1 ergab sich auch, daß das optische Verhalten des Bewitterungsschmutzes auf Floatglas- und „K-Glass“-Oberflächen mit dem von sehr feinen transparenten Keramiken vergleichbar ist [10]. Hier handelt es sich um Festkörper, die durch Sinterung aus Partikeln mit einer Größe $D < 5\ \mu\text{m}$ (in der Regel mit einheitlicherer Größe als im Bewitterungsschmutz) hergestellt und mal mehr, mal weniger porös sind. Der abgelagerte Bewitterungsschmutz – oben mit einem porösen Festkörper verglichen – besteht hingegen aus

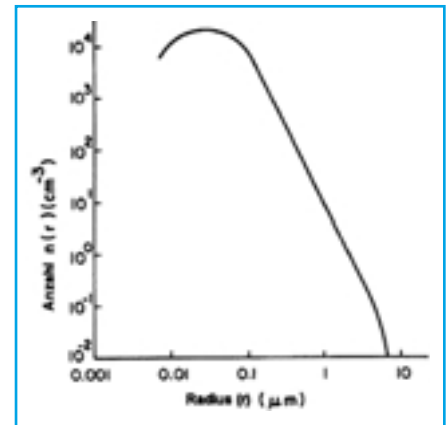


Bild 5: Größenverteilung der Aerosol-Partikel in der kontinentalen Atmosphäre. Auf der Abszisse ist der Partikelradius aufgetragen, auf der Ordinate die Anzahl der Partikel mit dem Radius r pro cm^3 , d. h. die Konzentration der Partikel [9]

hen UV ($\lambda < 380\ \text{nm}$) durchgeführt werden. Das ist mit abgelagertem Bewitterungsschmutz auf Floatglas nicht möglich, da Floatglas in diesem Spektralbereich eine zu hohe Eigenabsorption hat. Mit außenbewittertem, im UV höher transparentem Borosilikatglas hat man hier ggf. bessere Möglichkeiten.

Allgemein ist festzustellen, daß man durch Lichtstreuuntersuchungen die Struktur und Anzahl der abgelagerten, streuenden Aerosol-Partikel auf Oberflächen erkunden kann [s. a. 8]. Diese Untersuchungen alleine ergeben jedoch noch kein vollständiges Verständnis des abgelagerten Bewitterungsschmutzes auf Oberflächen. Hierzu benötigt man weitere Untersuchungen, die die Topographie der Oberfläche abbilden (z. B. AFM, s. a. [2]) sowie die Chemie von Oberflächen analysieren (z. B. SIMS, SNMS und XPS, s. a. [11]). Mit dem Ensemble der aufgeführten Untersuchungsmethoden sollte es jedoch möglich sein, die Physik und Chemie des Bewitterungsschmutzes auf Oberflächen zu erforschen. Dies könnte dann u. a. auch Grundlage der heute mit großer Intensität vorangetriebenen Entwicklung von selbstreinigenden Oberflächen sein. Denn wenn man – so ist wenigstens meine Meinung – den Schmutz nicht kennt, ist es Glücksache, wenn man eine Methode findet, mit der man ihn ggf. vermeiden kann.

einer Zusammenlagerung, d. h. einem Agglomerat von Aerosol-Partikeln, die ihr Lichtstreuverhalten im Agglomerat beibehalten. Die Agglomerate selbst, die man bei Oberflächenuntersuchungen (z. B. AFM, s. a. [2]) sieht, können – auch durch weitere Zusammenlagerung bei der Ablagerung – durchaus größer $1\ \mu\text{m}$ sein und tragen ggf. nicht oder nur unwesentlich zur Lichtstreuung bei. Um das jedoch genauer abklären zu können, müssen exakte spektrale Messungen des Bewitterungsschmutzes im na-



Bild 4: Schematische Darstellung der Lichtstreuung an Partikeln

Gewonnene Erkenntnisse

Welche Folgerungen kann man aus den bisherigen Erkenntnissen ziehen?

1. Bei der witterungsbedingten Schmutzablagerung auf Floatglas und „K-Glass“ handelt es sich um Aerosol-Partikel aus der Erdatmosphäre.

2. Die abgelagerten streuenden Aerosol-Partikel haben im wesentlichen eine Größe D kleiner $1 \mu\text{m}$.
3. Sie behalten bei der Ablagerung ihre Streueigenschaften für Licht bei.
4. Das hat zur Folge, daß witterungsbedingte Schmutzablagerung auf Floatglas und „K-Glass“ wegen des für kleine Partikeldurchmesser D im Vergleich zur Wellenlängen λ der einfallenden Strahlung gültigen Rayleighschen Streumechanismus im Strahlungsbereich des thermischen Emissionsvermögens hoch transparent ist. Das thermische Emissionsvermögen wird bei Floatglas und „K-Glass“ deshalb durch witterungsbedingte Schmutzablagerung nahezu nicht beeinflusst.

Dieses Phänomen gilt weltweit, wenigstens so lange, wie die Aerosol-Partikelverteilung in der Atmosphäre durch Extremereignisse, wie z. B. starken Vulkanismus und Waldbrände, nicht zu größeren Partikeln verschoben wird. Die Sonne scheint dann aber auch frühmorgens oder spätabends nicht mehr rötlich, s. a. [8].

5. Durch reguläre witterungsbedingte Schmutzablagerung auf Verglasungen wird das einfallende Tageslicht leicht zum Rötlichen verschoben. Dies folgt aus Bild 1.

Da es während der Bewitterung ggf. zu Reaktionen zwischen den abgelagerten Aerosol-Partikeln und den jeweiligen Oberflächen kommen kann, die auch die optischen Eigenschaften beeinflussen, ist nicht davon auszugehen, daß diese Erkenntnisse allgemein für bewitterte Oberflächen, z. B. auch alle beschichteten Flachgläser gelten. Es muß hier jede Oberfläche auf ihr Außenbewitterungsverhalten geprüft werden.

Der Autor dankt Frau Dr.-Ing. E. Rädlein, Lehrstuhl Keramik und Verbundwerkstoffe der Uni Bayreuth, und Prof. Dr. R. Clasen, Lehrstuhl Pulvertechnologie der Uni Saarbrücken, für wertvolle Anregungen und Hilfen zu diesem Bericht.

Literatur

- [1] Gläser, H.J.: Verschmutzung von Fensterverglasungen bei Außenbewitterungen, *glaswelt* 1/2003, Seiten 26–30
 [2] Rädlein, E. et al.: Weathering of tin oxid coated glass with low IR emissivity, *Glass*

- Sci. Technol.* 75 (2002), Seiten 125–131
 [3] Müller, J.; Rech, B.; Lechner, P.; Schade, H.: TCO für Silicium-Dünnschichtsolarmodule: Status und Perspektiven, Workshop Forschungs-Verbund Sonnenenergie (FVS) 2002, TCO für Dünnschichtsolarmodule II, 16.–17. 09. 02 im FZ Jülich
 [4] Gläser, H. J.: *Dünnschichttechnologie auf Flachglas*, Verlag Karl Hofmann, Schorndorf, 1999, Seite 302
 [5] Gläser, H. J.: *Dünnschichttechnologie auf Flachglas*, Verlag Karl Hofmann, Schorndorf, 1999, Seite 198
 [6] Gläser, H. J.: Nochmals: Entspricht der k_v -Wert gemäß DIN noch den modernen Anforderungen?, *GFF*, 7/2000, Seiten 22–27
 [7] Gläser, H. J.: Low-emissive coatings on the outer surface of heat-insulating glasses – a challenge to the flat glass industry, *Glass Sci. Technol.* 75 (2002), Seiten 12–20
 [8] van Hulst, H. C.: *Light Scattering by Small Particles*, Dover Publications, Inc., New York, 1982
 [9] <http://indigo.meteor.tu-darmstadt.de/umet/script/Kapitel1/kap01.html>
 [10] Apetz, R.; van Burggen, M. P. B.: *Transparent Alumina: A Light Scattering Model*, wird veröffentlicht
 [11] Faude, F.; Goschnik, J.: XPS, SIMS and SNMS applied to a combined analysis of aerosol particles from a region of considerable air pollution in the upper Rhine valley, *Fresenius J. Anal. Chem.*, 358 (1997), Seiten 67–72