

TNO-rapport
1999-BBI-R009

Anti-reflectie coatings voor toepassing op zonnecollectoren, PV systemen en tuinbouwkassen

TNO Bouw

Contactpersoon
Ing. H.P. Oversloot

Schoemakerstraat 97
Postbus 49
2600 AA Delft

Telefoon 015 269 69 00
Fax 015 269 52 99

Datum
21 juli 1999

Auteur(s)
ing. H.P. Oversloot, Drs. C.I.M.A. Spee, Drs. A. Veenstra

Opdrachtgever : NOVEM B.V.



Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar
gemaakt door middel van druk, foto-
kopie, microfilm of op welke andere
wijze dan ook, zonder voorafgaande
toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
Algemene Voorwaarden voor onder-
zoeksopdrachten aan TNO, dan wel
de betreffende terzake tussen de
partijen gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het
TNO-rapport aan direct belang-
hebbenden is toegestaan.

Projectleider : ing. H.P. Oversloot
Projectnummer : 006.96027/01.01

Aantal pagina's : 58

1999

Samenvatting

Een van de mogelijkheden om het aanwenden van zonlicht bij zonne-energie toepassingen zoals zonnecollectoren, PV systemen en tuinbouwkassen te optimaliseren is het gebruiken van anti-reflectie lagen op beglazingen. De potentiële opbrengst van anti-reflectie coatings voor deze toepassingen, de haalbaarheid ervan en de State of The Art van de coating-techniek worden in deze studie behandeld.

Ten gevolge van reflecties aan de oppervlakten van glas kan 8% van zoninstraling niet worden benut. Een anti-reflecterende laag zou dit verlies terug kunnen brengen tot 3%. Dit zou bij kleine huishoudelijke zonneboilers een vermeerdering van warmteopbrengst van 4% en bij PV systemen een prestatieverhoging van 5% opleveren. Tuinbouwers zullen naar verwachting een verhoging van 5% zien van oogst-opbrengst door 5% toename van zoninstraling, maar het effect op reductie van energiegebruik zal op jaarlijkse basis verwaarloosbaar zijn. Een warmte emissie-reducerende coating zou bij tuinbouwkassen echter wel een aanzienlijk reductie van energiegebruik bewerkstelligen. De bestedingsruimte voor geschikte coatings is geschat op NFL 10,- (zonnecollector) tot NFL 30,- (PV systeem) meerprijs per vierkante meter dubbelgecoat glas.

Specifieke eisen voor een coating worden sterk bepaald door de toepassing in tuinbouwkassen. Bestendigheid tegen specifieke chemicaliën, krasbestendigheid van de coating en emissie-reducerende eigenschappen worden met name geëist voor toepassingen in tuinbouwkassen. Verder wordt een levensduur van 15 jaar als voorwaarde gezien voor alle toepassingen. Een meest ideale coating zou geschikt moeten zijn voor alledrie toepassingen, vanwege het feit dat er dan een grootst mogelijk afzetvolume is voor een eventuele coatingfabrikant. Het totaal aan weggezet glas (zonne-energie en tuinbouw) zal de komende tien jaar ongeveer 550 ha/jaar bedragen. Het leeuwendeel hiervan is tuinbouwglas (400 ha/jaar), maar de zonne-energie markt is sterk groeiende.

Er zijn veel ontwikkelingen gaande in de coatingtechniek. Naast de al jaren verkrijgbare anti-reflectie coatings voor kleine toepassingen zijn ook de toepassing op grotere schaal in opkomst. Verwacht wordt dat gecoat architectuurglas binnen 5 tot 10 jaar standaard zal zijn. Momenteel zijn er twee producten op de Europese markt: Amiran® van de Schott groep (sol gel techniek) en LUXAR® van Euroglas (PVD techniek). Alhoewel de prijs dalende is, zijn beide producten nog steeds duur (ong. NLG 80/m²). De kwaliteit van deze lagen ontlopen elkaar niet veel. De aspecten waarop nog verbetering nodig is betreft, naast kostprijs, met name duurzaamheid (krasvastheid en bestendigheid tegen verontreinigd regenwater). Gezien de ontwikkelingen in de coatingtechnologie, de materialen en coatingdesigns zullen er naar alle waarschijnlijkheid meer producten op de markt verschijnen en zal de kostprijs gaan dalen. Momenteel is de beste techniek nog de sol-gel techniek te noemen, maar de opdamptechnieken (PVD en CVD) ontwikkelen momenteel snel en er wordt voor

de toekomst veel van verwacht wat betreft kostprijs, duurzaamheidsaspecten en optische eigenschappen.

Concluderend kan er gesteld worden dat het ontwikkelen van een specifieke anti-reflectie coating, geschikt voor zonne-energietoepassingen en/of voor tuinbouwkassen, behoort tot de momentele technische mogelijkheden. Gezien vanuit het marktpotentieel liggen er voldoende kansen voor een dergelijke ontwikkeling. Dit is echter sterk afhankelijk van de ontwikkeling van de vraag vanuit de tuinbouwsector en zonne-energiesector en van de interesse van coaters voor deze markten.

Naschrift: ten tijde van het afronden van dit rapport is een nieuwe anti-reflectie coating op de markt verschenen voor toepassing op beglazing van zonnecollectoren (SunArc, Denemarken). Er wordt verwezen naar het naschrift van dit rapport.

Inhoud

1	Inleiding	6
2	Potentieel AR coatings bij tuinbouw en zonne-energie techniek	8
2.1	Toepassing van AR coatings op zonne-energiesystemen en tuinbouwkassen.....	8
2.1.1	Potentiële opbrengst van anti-reflectie coatings	8
2.1.2	Inventarisatie van eisen	14
2.1.3	Conclusies.....	16
2.2	Marktoverzicht glas in tuinbouw en zonne-energiesystemen....	17
2.2.1	Zonnecollectoren.....	17
2.2.2	PV systemen	18
2.2.3	Tuinbouwkassen	19
2.2.4	Conclusies.....	19
2.3	Referenties.....	20
3	State of the Art Anti-reflectie coatings	21
3.1	inleiding anti-reflectie coatings.....	21
3.2	Werking van anti-reflectie coatings	21
3.2.1	Inleiding.....	21
3.2.2	Dubbellaags anti-reflectie coatings	24
3.2.3	Gradiënt index anti-reflectie lagen.....	30
3.3	Productietechnieken	31
3.3.1	Inleiding.....	31
3.3.2	Chemical Vapour Deposition (CVD).....	32
3.3.3	Physical Vapour Deposition (PVD)	33
3.3.4	Nat-chemische depositietechnieken (sol-gel)	35
3.4	Commercieel verkrijgbare anti-reflectie coatings.....	37
3.4.1	Inleiding.....	37
3.4.2	Schott	37
3.4.3	Prinz Optics	39
3.4.4	Euroglas-Trösch.....	39
3.5	Ontwikkelingen in anti-reflectie coatings.....	39
3.5.1	Inleiding.....	39
3.5.2	Metaalnitrides	40
3.5.3	Poreus silica.....	42
3.5.4	Hybride materialen.....	43
3.5.5	Periodische microstructuren	45
3.5.6	Stochastische microstructuren	48
3.6	Conclusies state-of-the-art anti-reflectie coatings.....	49
3.7	Referenties.....	50

4	Slotconclusies en aanbevelingen	52
5	Naschrift.....	53

1 Inleiding

Het aanwenden van zonlicht voor energieproductie vindt zijn toepassingen onder andere in zonneboilers, fotovoltaïsche systemen en bij de glastuinbouw. Bij deze toepassingen is het, met name in gebieden met relatief weinig zoninstraling, van groot belang het zonlicht zo efficiënt en effectief mogelijk om te zetten, met zo min mogelijk verlies. Naast tal van andere verbeteropties is het verlagen van lichtreflectie aan de beglazing van zonnecollectoren, fotovoltaïsche systemen (PV) en tuinbouwkassen een mogelijkheid om de efficiëntie te verhogen. Daarnaast is het verlagen van de warmteuitstraling (warmteemissie) een manier om verliezen te beperken. Gezien de voortgaande ontwikkelingen op het gebied van anti-reflectie coatings (AR coatings) en emissiebeperkende coatings (lowE coatings), is het denkbaar deze coatings toe te passen bij zonne-energiesystemen en tuinbouwkassen. In dit rapport zal de haalbaarheid hiervan onderzocht worden, gebaseerd op de huidige "State of the Art".

Tengevolge van reflecties van licht aan glas kan circa 8% van opvallende stralingsintensiteit niet worden benut in zonnecollectoren en zonnecellen. Met het aanbrengen van een anti-reflectie coating zou de reflectie aan glas teruggebracht kunnen worden tot ongeveer 3%. Dit levert een rendementsverbetering op bij zonne-energie toepassingen voor de opwekking van warmte en elektriciteit. Bij de glastuinbouw zou zowel een verlaging van energiegebruik als een verhoging van de gewasopbrengst bewerkstelligd kunnen worden door een hogere lichttransmissie van het glas. Het toepassen van low E coating zou bij tuinbouwkassen en zonnecollectoren een verlaging van het warmteverlies tot gevolg kunnen hebben. Deze effecten zijn onderwerpen van studie in dit rapport.

Verder zal onderzocht worden of er mogelijk een enkel type coating geschikt is voor alle drie genoemde toepassingen, gelet op fysische eigenschappen, duurzaamheidsaspecten en financiële aspecten. Het combineren van deze potentiële toepassingen voor AR coatings heeft commerciële voordelen. De huidige en toekomstige marktontwikkelingen van beglazingen van tuinbouwkassen en zonne-energiesystemen zal daarom in kaart gebracht worden.

Samenvattend wordt er in deze studie de volgende vraagstelling gehanteerd:

- Wat is de potentiële opbrengst van het toepassen van AR coatings op zonne-energiesystemen en tuinbouwkassen?
- Wat zijn de eisen die moeten worden gesteld aan de eigenschappen van een mogelijke antireflectie coating, die zowel bij zonne-energie systemen als bij tuinbouwkassen wordt toegepast?
- Wat mag een mogelijke antireflectie coating momenteel kosten, afgewogen tegen de extra opbrengsten?

- Is er een bestaande of te ontwikkelen coating denkbaar die toepasbaar is op alle drie toepassingen?
- Wat is het potentiële marktvolume van te coaten glasoppervlakken, in de nabije en verdere toekomst?
- Wat is de 'State of the Art' van geschikte coatings en welke coating is het meest kansrijk gezien kosten, opbrengst en duurzaamheid?

In deel 2 van dit rapport wordt het potentieel van de toepassing van AR coatings onderzocht voor zonne-energiesystemen en tuinbouwkassen, aan de hand van studie naar de opbrengsten, een eisenoverzicht voor geschikte coatings en een prognose van de marktvolumes.

Deel 3 wordt "*the state of the art*" van anti-reflectie coatings behandeld. Aan bod komen: werkingsprincipes, type coatings, productietechnieken, huidige AR coating fabrikanten en toekomstige ontwikkelingen.

In deel 4 tenslotte worden de slotconclusies en aanbevelingen behandeld.

2 Potentieel AR coatings bij tuinbouw en zonne-energie techniek

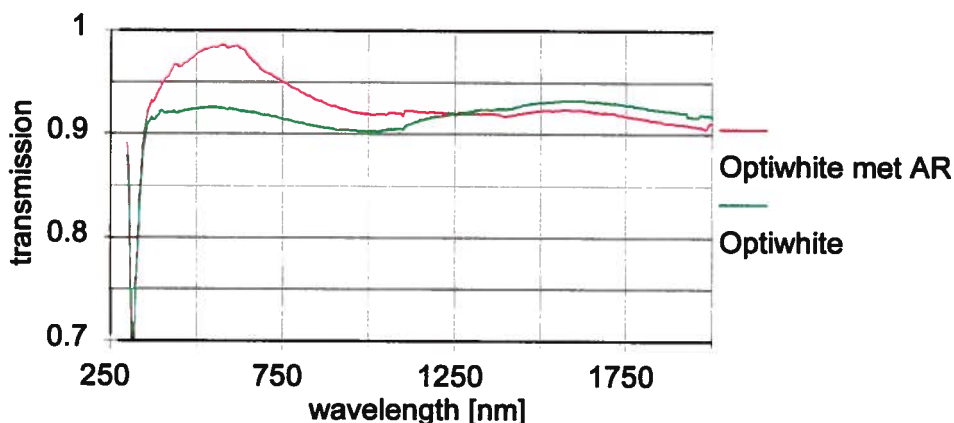
2.1 Toepassing van AR coatings op zonne-energiesystemen en tuinbouwkassen

De werking van anti-reflectie coatings kan op verschillende fysische principes gebaseerd zijn, er zijn verschillende varianten, die al of niet al commercieel verkrijgbaar zijn. Voor de werking en principes van reflectieonderdrukkende lagen wordt verwezen naar hoofdstuk 5 van dit rapport en naar Oversloot [1993]. In dit hoofdstuk wordt de potentiële meeropbrengst geschat bij toepassing op zonnecollectoren, PV systemen en tuinbouwkassen, uitgedrukt in energiewinst en in mogelijke financiële meeropbrengsten. Er worden schattingen gemaakt van de bestedingsruimte voor anti-reflectie coatings, afgeleid uit de potentiële meeropbrengsten. Deze schatting van de bestedingsruimte is een grove schatting en is derhalve enkel bedoeld om een orde van grootte aan te geven. Verder wordt er in dit hoofdstuk aangegeven welke eisen er gesteld moeten worden aan een mogelijke anti-reflectie coating bij de drie toepassingen.

2.1.1 Potentiële opbrengst van anti-reflectie coatings

Licht dat op glas valt wordt voor 8% gereflecteerd. Afhankelijk van het type kunnen anti-reflectie coatings deze reflectie reduceren tot 1% - 6%. Meest voorkomend is een reductie van reflectie van 8% tot 3%, wat resulteert in 5% meer lichttransmissie, zie ook figuur 0. Om een indruk te krijgen van de mogelijke opbrengsten wordt uitgegaan van deze reductie. Voor zonnecollectoren, PV systemen en tuinbouwkassen is een berekening gemaakt van de meeropbrengsten bij een toename van lichtintensiteit van 5%, uitgedrukt in bespaarde energie of extra gewasopbrengst en hieruit voortvloeiende financiële meeropbrengsten. De gegevens die voor de berekeningen gebruikt zijn betreffen onder andere de huidige energieprijzen, rendementen van zonne-energiesystemen en huidige kosten van systemen, kassen en beglazingen. Er wordt gerekend met een stelregel dat drie vijfde deel van de besparingen (in guldens per m²) uitgegeven kan worden aan een anti-reflectie coating, om reden dat er enige winst ingecalculleerd moet worden. Van hieruit zal een indruk worden gegeven van de maximale bestedingsruimte.

doorlating



Figuur 0: Transmissie zonlicht door glas met en zonder AR coating (een voorbeeld)

2.1.1.1 Zonnecollectoren en anti-reflectie coatings

Met behulp van het model "Solar Hot Water Systems VA115" van VABI/TNO Bouw is de meeropbrengst als gevolg van een transmissieverbetering van 5% berekend, bij een referentiezonneboiler voor huishoudelijk gebruik. Met dit model kan de energieopbrengst van zonnecollectoren voorspeld worden als functie van een aantal inputparameters, zoals de hoeveelheid ontvangen instraling.

De meeropbrengst kan op twee wijzen uitgedrukt worden in bespaarde guldens. De eerste manier is het bepalen van de extra warmteopbrengst over de gehele levensduur van een zonneboiler tengevolge van de transmissieverhoging, waarbij de meeropbrengst omgerekend wordt naar gasbesparing in guldens¹. Een tweede manier is het zodanig theoretisch verkleinen van het gecoate collectoroppervlak dat dezelfde opbrengst verkregen wordt als bij de ongecoate collector. De bespaarde kosten worden bepaald met de kosten van collectoren per m².

De uitkomsten uit de analyse zijn te vinden in tabel 1. Er wordt gerekend met een gasprijs van f 0,55 /m³, een collectorprijs van f 400,-/m² en een levensduur van 15 jaar. Verder wordt een energie-inhoud van gas van 35,17 MJ/m³ en een rendement van 0,65 voor opwarming van warmwater met conventionele warmwatertoestellen gehanteerd.

¹ Anders gezegd: besparing van gas door minder naverwarming.

Tabel 1: Resultaten berekening meeropbrengst en besparing bij 5% meer lichttransmissie

Afdekking	Collector oppervlak	Warmteopbrengst in MJ/jaar	Bespaarde guldens over levensduur [f/m ²]
IJzervrij glas	2.72	4111	-
IJzervrij glas + AR	2.72	4277	21,60
IJzervrij glas + AR	2.61	4111	16,20

Opmerkingen

- **Levensduur AR coating:** Er wordt gemakshalve vanuit gegaan dat een AR coating een levensduur heeft die gelijk is aan de zonnecollector. Een levensduur van minimaal 15 jaar zal bij introductie van een eventuele coating als voorwaarde moeten gelden.
- **Nut van meeropbrengst:** Als de opbrengst gaat toenemen van een zonnecollector is deze meeropbrengst pas een heuse energiebesparing als de extra opgeleverde energie ook daadwerkelijk nuttig aangewend kan worden. De dimensionering van zonnecollectoren is altijd zo geoptimaliseerd dat de energie-input in de zomer de warmwatervraag dekt. Het is dus mogelijk dat de meeropbrengst niet geheel nuttig aangewend kan worden, waardoor er ook geen sprake hoeft te zijn van een werkelijke energiebesparing.
- **Gasprijzen:** Er kan verwacht worden dat de gasprijzen in de toekomst zullen stijgen in de komende jaren. De bespaarde kosten bij toepassing van AR coatings zullen hiermee toenemen.
- **Bespaarde kosten collectoroppervlak:** Het bepalen van de bespaarde kosten van verminderd collectoroppervlak is een grove schatting. Het verminderen van collectoroppervlak zal niet een evenredige kostenreductie tot gevolg hebben omdat de prijs van de collector niet enkel bepaald wordt door de hoeveelheid gebruikte materialen bij de productie. De berekende waarde zal dus een overschatting zijn. Verder kan opgemerkt worden dat zonnecollectoren meestal niet per geval op maat gemaakt worden. Een reductie van het collectoroppervlak, als gevolg van een hogere collectoropbrengst, zal dus pas bij een volgende herontwerpfase gerealiseerd kunnen worden.
- **Subsidie:** Een verhoging van de opbrengst van collectoren kan leiden tot het verhogen van de hoeveelheid subsidie op zonneboilers. Hiernaar is echter niet gekeken in deze studie.

Uitgaande van bovenstaande wordt de maximale bestedingsruimte voor antireflectie coatings op zonnecollectoren geschat op 10 gulden per m².

2.1.1.2 Fotovoltaïsche systemen

Mits de extra hoeveelheid instraling in het juiste golflengtegebied ligt, mag worden aangenomen dat elke procent meer instraling een procent meer energie-output van

het PV systeem tot gevolg heeft². Er is evenwel een extra warmteontwikkeling als gevolg van de extra instraling te verwachten, wat het rendement van zonnecellen kan doen afnemen. De verwachte warmtestijging in de cellen is naar inschatting echter zo laag, dat dit effect als verwaarloosbaar beschouwd kan worden.

De extra opbrengst is ook hier op twee manier berekend. De extra elektrische energie kan zowel omgerekend worden naar extra bespaarde energie en als naar bespaard oppervlakte zonnecel. Bij het de berekening wordt uitgegaan van de huidige elektriciteitsprijs (f 0,25 per kWh) en de huidige en prijzen van PV systemen (1200 NFL per m²). De technische levensduur van PV systemen wordt geschat op 15 jaar. Er wordt uitgegaan van een systeem met multi kristallijne cellen, 10% systeemrendement (100 Wp per m²) en een jaaropbrengst van 800 kWh per kWp. De resultaten, berekend bij een transmissieverbetering van 5%, staan in tabel 2.

Tabel 2: Berekening van de potentiële meeropbrengst en besparing met AR coatings op glazen afdekking van PV systemen

		Bespaarde guldens over levensduur [f/m ²]
Systeemrendement met AR coating	10,5 %	
Jaaropbrengst met AR coating	840 kWh per Wp	f 10,-
Reductie oppervlak	0,048 m ² per m ²	f 57,60

Opmerkingen

- **Levensduur AR coatings:** Er wordt uitgegaan dat levensduur van AR coatings 15 jaar is. Dit wordt als voorwaarde gezien voor te introduceren coatings.
- **Elektriciteitsprijs:** Verwacht kan worden dat de elektriciteitsprijs gaat stijgen in de toekomst, dit is niet verwerkt in de berekening.
- **Nut extra energieopbrengst:** Indien de meeropbrengst onmiddellijk nuttig aanwendbaar is, kan de besparing bepaald worden met de werkelijke elektriciteitsprijs. Er is echter ook een situatie denkbaar waarbij, bij netgekoppelde systemen, de extra opgewekte energie aan het elektriciteitsnet wordt geleverd. In dat geval geldt er een terugleveringsvergoeding, die verschilt per situatie en per energiebedrijf.
- **Prijs PV:** De prijzen van PV systemen gaan naar verwachting sterk dalen. De te besparen kosten door aanbrengen van een AR coating zal dan ook gaan dalen in de toekomst.
- **Bespaarde kosten PV oppervlak:** Uitgaande van het uitvoeren van PV in laminaten, waarbij PV per oppervlakte geleverd wordt, mag de besparing van f 57, 60 gezien worden als daadwerkelijke besparing.

² Het toepassen van AR coating op glazen afdekking op PV moet overigens niet worden verward met het toepassen van AR coating op het siliciumoppervlak van de cellen.

Uitgaande van bovenstaande wordt de maximale bestedingsruimte voor antireflectie coatings op PV systemen geschat op 30 gulden per m², mits de PV systemen verkleind uitgevoerd kunnen worden

2.1.1.3 Tuinbouwkassen

Het verhogen van de zon-instraling in tuinbouwkassen leidt tot een tweetal effecten. Het eerste effect is een toename van de hoeveelheid toegevoerde warmte door de zon zodat bespaard wordt op stookkosten. Ten tweede levert meer zonlicht meer oogst op, daar de groei van het gewas toeneemt bij een hogere instraling. Het schatten van de hoeveelheid van deze opbrengsten is echter moeilijk, daar de opbrengst van kassen en de wijze van telen sterk gerelateerd is aan het type gewas dat gekweekt wordt. Bovendien is de ontwikkeling van de oogst op een complexe manier afhankelijk van veel meer factoren dan alleen de temperatuur en de hoeveelheid instraling.

Warmtewinst

Met behulp van het simulatiemodel "Warmtevraag voor Tuinbouwkassen" van TNO Bouw/sectie DEGO is de jaarlijkse warmtewinst berekend bij 5% hogere lichttransmissie van de beglazingen en de daaruit voortvloeiende besparing van gas (HR ketel). Doordat de maximale zoninvloed in de zomer ligt en op dat moment reeds een overschot aan warmte bestaat ten gevolge van CO₂ productie, is de nuttige bijdrage van extra zoninstraling in de warmtehuishouding van de kas op jaarbasis verwaarloosbaar (zie tabel 3).

Ter vergelijking is de potentiële warmtewinst berekend bij de toepassing van een coating die warmte-emissie reduceert (lowE glas: afname U waarde glas 26%) in combinatie met een antireflectie coating. De berekende gasbesparingen en de kostenbesparing over de gehele levensduur, berekend voor een kas van 1,5 ha, staan in tabel 3. Er wordt uitgegaan van een levensduur van de beglazing van 15 jaar³ en een gasprijs van f 0,22 voor grootgebruikers.

³ De norm NEN 3859 eist een minimale levensduur van tuinbouwglas van 15 jaar. In de huidige praktijk is dit echter vaak 25 jaar. [Kool 1998]

Tabel 3: Potentiële energiebesparing bij toepassing van anti-reflectie en/of emissie-reducerende coatings in glastuinbouw

Glas	Type Gewas	Gasgebruik per jaar [m ³ /m ²]	Besparing m ³ /jaar	Besparing over levensduur [f/m ²]
Standaard	Tomaten/komkommers	65,76	-	
Standaard + AR	Tomaten/komkommers	65,35	0,41	f 1,35
Standaard + AR+ Low E	Tomaten/komkommers	51,00	14,76	f 49,-
Standaard	Rozen	55,62	-	
Standaard + AR+ Low E	Rozen	39,68	15,94	f 53,-

Meeropbrengst oogst

Een precieze schatting van meeropbrengst van de oogst als functie van de hoeveelheid extra ingevangen licht is niet te geven, daar de oogstopbrengst afhankelijk is van veel factoren. Er wordt een schatting gedaan met behulp van de vuistregel "1% meer licht levert 1% meer opbrengst" [Bakker *et al*, 1995] [Out 1995]. Uitgaande van de situatie dat alle extra opbrengst afzetbaar is op de markt, kan de meeropbrengst bij 5% meer licht geschat worden met behulp van de bedrijfsresultaten in de tuinbouw.

Uit Boers [1996] valt op te maken dat de gemiddelde opbrengst van glasgroentebedrijven f 62,- per jaar per m² glasoppervlak bedroeg, in de periode 1991 tot en met 1994. Een hogere hoeveelheid licht van 5% zou dus een meeropbrengst kunnen geven van f 3,10 per jaar per m² glas. Met de grove aanname dat deze meeropbrengst aanhoudt over de gehele levensduur van de kas (15 jaar) kan een anti-reflectiecoating f 46,50 per m² opleveren.

Opmerkingen

- **Low E coating:** Er valt op dat coatings met enkel een anti-reflecterende eigenschap een verwaarloosbare energiebesparing bewerkstelligen bij tuinbouwkassen. Verlaging van de emissiecoëfficiënt daarentegen levert een veel grotere energiebesparing op.
- **Gasprijs:** Gezien de te verwachten gasprijsstijgingen voor grootgebruikers kan de besparing van gas in guldens hoger worden.
- **Nut extra gewasopbrengst:** De opbrengst van tuinbouwkassen is sterk afhankelijk van het geteelde gewas en van de (variërende) marktvraag/-prijs van het gewas. Bovenstaande schatting moet dan ook gezien worden als een grof gemiddelde.

Een extra gewasopbrengst per vierkante meter kan ook vertaald worden naar een mogelijke verkleining van kasoppervlak, wat besparing op kan leveren op

bouwmaterialen en op ruimteverwarming. Deze optie is echter niet doorgerekend.

De schatting is gebaseerd op opbrengsten in de glasgroente bedrijven. Het betreft hier voornamelijk producten als tomaten, komkommers en sla. Glassnijbloemenbedrijven zijn niet opgenomen in de schatting, daar niet met zekerheid gesteld kan worden dat 1% meer opbrengst in gewicht ook 1% meer financiële opbrengst levert.

- **Levensduur kassen:** De levensduur van kassen is zoals eerder genoemd momenteel bijna 25 jaar, wat 10 jaar langer is dan de norm in NEN 3859. Er kan echter niet op voorhand vanuit gegaan worden dat een aangebrachte coating een zelfde levensduur heeft. Vijftien jaar lijkt daarom een betere schatting.
- **Terugverdientermijn:** Er kan niet vanuit gegaan worden dat een tuinder een terugverdientijd van zijn investeringen accepteert van 15 jaar. Een periode van 5 tot 10 jaar is een betere schatting. [Kool 1997]. Dit betekent dat een bestedingsruimte voor 5% meer licht f15,- tot f31,- per m² een betere inschatting is. Voor emissiebeperkende coatings is een betere inschatting f16,- tot f32,- per m². Gezien de besproken onzekerheden in de schattingen van de opbrengst wordt uitgegaan van f15,- per m² als beste schatting.
- **Combinatie LowE en AR coatings.** Het is ten tijde van het afronden van dit rapport niet bekend of lowE en anti-reflectie coatings voor transparante afdekkingen gecombineerd kunnen worden. Dit zou echter wel een interessante mogelijkheid kunnen zijn.

Uitgaande van bovenstaande wordt de bestedingsruimte van zowel anti-reflectie coatings in het zichtbaar licht als emissiebeperkende coatings voor infrarood licht op tuinbouwkassen geschat op f15,- per vierkante meter.

2.1.2 Inventarisatie van eisen

De toepassing van anti-reflectiecoatings op glazen afdekking van zonnecollectoren, PV systemen en tuinbouwkassen stelt meer eisen aan de fysische eigenschappen van de coating dan enkel de reflectieeigenschappen. Deze eisen betreffen onder andere de golfteafhankelijkheid, weer- en temperatuurbestendigheid en duurzaamheid. Tabel 4 geeft een overzicht van de eisen per toepassing. Een coating, die geschikt is voor al deze drie toepassingen, zou moeten voldoen aan alle eisen in de tabel.

Tabel 4: Specifieke eisen aan anti-reflectie coatings op glas bij verschillende toepassingen

	Zonnecollectoren	PV (multikr.-Si)	Glastuinbouw
Werkingsgebied golflengte	25 tot 2100 nm **)	300 tot 1100 nm	400 tot 700 nm (fotosynthese) tot 2500 nm (warmte)
Levensduur	15-25 jaar	15-25 jaar	15-25 jaar
Drager materiaal	(Ijzervrij) glas	(Ijzervrij) glas	Glas
Temperatuurbestendigheid	minimum -15/20° maximum +70/80°	min -15/20° max +70/80°	min -15/20° max +35/40°
Esthetische aspecten	Geen	eventueel kleuroptie	geen
Duurzaamheid	• lichte krasbestendigheid • lage gevoeligheid voor vuildepositie • bestand tegen vocht • bestand tegen UV • bestand tegen thermische spanningen	• lichte krasbestendigheid • lage gevoeligheid voor vuildepositie • bestand tegen vocht • bestand tegen UV • eventueel bestand tegen regenafvoer langs gevel • bestand tegen thermische spanningen	• lichte krasbestendigheid • lage gevoeligheid voor vuildepositie • bestand tegen vocht • bestand tegen UV • bestand tegen thermische spanningen
Bestedingsruimte*)	Tot $\pm f 10,-/m^2$	tot $\pm f 30,-/m^2$	tot $\pm f 15,-/m^2$
Eventuele extra eisen	• emissiereductie vanaf 2100 nm • mogelijkheid toepassing op polycarbonaat	• keuze in kleur	• emissiereductie vanaf 2100 nm • bestand tegen gebruikte chemicaliën en witkalk in kassen

*) snelle analyse op grond van huidige rendementen, energieprijzen, prijzen voor PV en zonnecollectoren. Aanname reflectie-onderdrukking tot 3% (i.p.v. 8%). Zie voor berekening § 2.1.1.

**) Anti-reflectie tot 2100 nm is geen sterke eis. Voor alle toepassingen ligt de grootste opbrengst in het gebied van 300 tot 1000 nm.

Opmerkingen

- **Kunststof afdekking:** De gebruikte glassoorten in zonne-energietoepassingen zijn 'floatglas', 'ijzervrij glas' en 'kanaalplaat'. Daarnaast wordt voor goedkope zonnecollectoren ook wel eens acryl of polycarbonaat afdekplaten gebruikt. In de meest ideale situatie zou een coating gevonden moeten worden die toepasbaar is op al deze materialen.

- **Low E eigenschappen:** Bij tuinbouwkassen leidt het beperken van de transmissie in het infrarood gebied tot een energiebesparing (Zie 2.1 en [Out 1995]) en verhogen van de transmissie in het 400-700 nm gebied leidt tot toename van de oogstopbrengst. Een coating die zowel een anti-reflecterende eigenschap heeft tot ongeveer 2100 nm als een emissiebeperkende eigenschap heeft na 2100 nm heeft daarom een sterke voorkeur voor deze toepassing. Voor zonnecollectoren geldt dit ook, zij het in mindere mate. Zonnecollectoren zijn veelal al uitgevoerd met emissiebeperkende coatings op de absorbers, waardoor emissiebeperkende behandeling van de afdekking niet veel extra zal opleveren.
Een extra warmteontwikkeling is echter niet gunstig voor PV systemen omdat het rendement van PV systemen daalt met 0,45% per temperatuurstijging van 1°C.
- **Kleurvariatie:** Er is vanuit de architectuur een vraag naar kleurvariatie voor PV systemen. Voor zonnecollectoren is deze vraag minder, daar zonnecollectoren neutraler van kleur zijn en minder oppervlakte hebben. Mogelijkheid tot kleurvariatie zal een voorkeur hebben.
- **Krasbestendigheid:** Krasbestendigheid betreft de bestendigheid tegen lichte belastingen van bijvoorbeeld hagel en opwaaiende takjes. Daarnaast is krasbestendigheid ook van belang tijdens het assembleren en schoonmaken van de collectoren, panelen en kassen.
- **Thermische spanningen:** De coating dient bestand te zijn tegen de uitzetting van glas bij de genoemde temperatuur intervallen.
- **Vuildepositie:** De vuildepositie bestaat uit roetdeeltjes, SO_x en NO_x. Een coating mag niet degraderen door deze stoffen fysisch of chemisch te binden.

2.1.3 Conclusies

- Het toepassen van antireflectie coatings zou zowel voor zonneboilers als voor PV systemen en tuinbouwkassen een interessante meeropbrengst kunnen opleveren, mits de kosten voldoende laag zijn en de duurzaamheid voldoende is.
- In de berekeningen wordt uitgegaan van een levensduur van coatings van 15 jaar. Dit is een cruciale aanname binnen deze studie. Omdat het de vraag is of deze levensduur ook gegarandeerd kan worden, zal hiermee rekening gehouden moeten worden tijdens verdere bestudering.
- Voor tuinbouwkassen blijkt dat het toepassen van Low E coatings beduidend meer energiebesparing oplevert dan toepassen van AR coatings. Ook al is aangetoond dat de opbrengst van de oogst zal toenemen bij toepassing van AR coatings, wordt er meer gewicht gegeven aan het berekende effect van Low E coatings. De reden hiervoor is dat de schatting van het effect van een AR coating op meer onzekerheden stuit.
Hierbij wordt opgemerkt dat een gecombineerde coating interessant zou kunnen zijn voor de tuinbouw. Of dit mogelijk is heeft echter nog studie nodig.

- Meer dan bij zonne-energiesystemen moeten bij tuinbouwkassen speciale eisen gesteld worden aan de bestendigheid van coatings tegen chemische componenten in omringend milieu.
- Vooruitlopend op de eindconclusies en gezien bovengenoemde overwegingen, kan opgemerkt worden dat het niet aannemelijk lijkt een zelfde coating toe te passen (of te ontwikkelen) voor alle drie toepassingen. Dit hoeft echter niet op voorhand uitgesloten te worden.

2.2 Marktoverzicht glas in tuinbouw en zonne-energiesystemen

Dit hoofdstuk behandelt het huidige productie- en marktvolume is van zonnecollectoren, PV systemen en tuinbouwkassen in termen van glasoppervlak in Nederland. Voorts worden prognoses gegeven van de toekomstige ontwikkeling in deze markten om een indruk te geven van de toekomstperspectieven van mogelijke te coaten glasoppervlakken. In dit overzicht worden enkel gegevens van de Nederlandse markt beschouwd.

2.2.1 Zonnecollectoren

De doelstellingen van de rijksoverheid voor de ontwikkeling van de Nederlandse markt voor zonneboilers zijn vastgelegd in een meerjarenafspraak tussen de overheid en de marktpartijen. De doelstelling van de hoeveelheid geïnstalleerde zonneboilers⁴ van nu tot 2020 wordt gegeven in tabel 5. [Ministerie EZ 1997]. Het totale oppervlak wordt geschat door een gemiddeld collectoroppervlak aan te nemen van 2,5 m².

Tabel 5: Doelstelling aantal geïnstalleerde zonneboilers tot 2020

Jaar	Aantal geïnstalleerde zonneboilers	Totaal collectoroppervlak m ²
Anno 1998	25.000	625.000
2000	80.000	2.000.000
2007	250.000	6.250.000
2010	400.000	10.000.000
2020	1000.000	25.000.000

Opmerkingen

- **Groeiende markt:** De zonneboilermarkt is een groeiende markt, waarmee het toepassen voor AR coatings mogelijk commercieel interessanter wordt.
- **Vervanging:** In bovenstaand overzicht is de vervanging van oude collectoren niet opgenomen. Het is nu niet in te schatten hoeveel de vervanging zal bedragen. Aangenomen kan worden dat de autonome groei tot 2010 veel groter is dan de eventuele vervanging.

⁴ Het betreft hier kleine afgedekte zonnecollectoren voor huishoudens

- **Potentieel:** Verwacht mag worden dat er tot 2010 een collectoroppervlakte van 10 miljoen m² zonnecollectoren in Nederland geïnstalleerd gaat worden. Er wordt ingeschat dat het leeuwendeel uitgevoerd zal worden met glas als afdekking.

2.2.2 PV systemen

Shell Solar heeft voor haar productie van multikristallijne PV systemen de volgende verwachtingen voor het komende decennium, tabel 6.

Tabel 6: Voorspellingen Shell Solar productievolume van 1998 tot 2010

jaar	MWp/jaar	m ² per jaar	MWp cumulatief	m ² cumulatief
1998-1999	10	95.240	25	238.000
2000	20	190.480	44	420.000
2005	50	476.190	227	2.160.000
2010	100	952.400	621	5.910.000

De waarden in de tabel zijn gebaseerd op schattingen van het productievolume van Shell Solar, de verwachte geproduceerde vierkante meters zijn bepaald uitgaande van de Nederlandse situatie en een systeemrendement van 10,5%. De cumulatieve cijfers zijn berekend uit de jaarlijkse productiecijfers en een interpolatie van deze gegevens. Deze productiecijfers zijn inclusief de systemen voor de export.

In april 1997 is er door de overheid en verschillende marktpartijen een convenant getekend waarin afspraken gemaakt worden over het opgestelde PV vermogen in Nederland. Het PV introductieplan zoals beschreven in het convenant ziet er als volgt uit, zie tabel 7. Deze cijfers betreffen alle typen PV systemen opgesteld in Nederland. Het verschil met de gegevens van voorspellingen van Shell Solar wordt veroorzaakt door de afwezigheid van exportgegevens in de cijfers van het convenant.

Tabel 7: Ontwikkeling van opgesteld PV vermogen volgens convenant

Jaar	cumulatief vermogen MWp	Aantal m ² uitgaande van 105 Wp/m ²
2000	7,7	73.000
2007	100	950.000
2010	250	2.400.000
2020	1400	13.000.000

Opmerkingen

- **Groeiende markt:** Er wordt een groeiende markt voorzien voor PV systemen, waarmee de toepassing van AR coatings toenemend commercieel interessant wordt.

- **Vervanging:** Net als bij zonnecollectoren zal de vervanging van oude panelen in dit tijdsperspectief niet tot uitdrukking komen in deze cijfers.
- **Potentieel:** Verwacht mag worden dat er, tot 2010, 6 miljoen m² multikristallijne PV systemen geproduceerd gaat worden in Nederland en dat er 2,5 miljoen m² opgesteld gaat worden in Nederland.

2.2.3 Tuinbouwkassen

In Nederland staat er al enkele tientallen jaren ongeveer 10.000 ha (grondoppervlakte) kassen in Nederland. [Boers 1996] [CBS 1994]. Het is nog onduidelijk of de hoeveelheid glaskas zal toenemen in de toekomst of constant zal blijven. Om de huidige oppervlakte te handhaven zal de komende jaren 400 ha glaskas per jaar vervangen moeten worden [Kool 1998]. In de meest optimistische prognose [Bouwman 1998] spreekt van een jaarlijkse bouw van kassen 800 ha. Het potentiële glasoppervlak voor toepassing van anti-reflectiecoatings zal ongeveer gelijk zijn aan de verwachte hoeveelheid nieuwbouwkassen in grondoppervlak.

Opmerkingen

- **Stabiele markt:** De marktvolume voor glastuinbouw wordt gekenmerkt door een stabiele vervangingsvraag. Er worden geen grote veranderingen voorzien in de vraag naar tuinbouwglas.
- **Potentieel:** Uitgaande van een minimale afzet van 400 ha glaskas per jaar zal er jaarlijks 4 miljoen m² kasglas geproduceerd worden waarop anti-reflectiecoatings toegepast kunnen worden. Dit betekent dat tot 2010, minimaal 40 miljoen m² kasglas geproduceerd en opgezet zal worden. Bij een toename van het totale kasareaal zal het productievolume hoger zijn.

2.2.4 Conclusies

- Het marktvolume van tuinbouwglas is in Nederland voorlopig vele malen groter dan het marktvolume beglazingen voor zonne-energiesystemen. De grootste constante potentiële afzet is dus in principe te vinden in de tuinbouw.
- In de zonne-energie markt wordt echter een sterke groei verwacht, waarbij opgemerkt moet worden dat deze groei ook in de rest van Europa voorzien wordt. Dit maakt deze sector interessant voor toepassing van AR coatings.

2.3 Referenties

Bakker J.C., Bot G.P.A, Challa H., Van de Braak N.J., *Greenhouse Climat Control*, Wageningen Pers, 1995.

Boers, drs. A, *Bedrijfsuitkomsten in de tuinbouw*, Boekjaar 1994 en vergelijkingen met voorgaande jaren, LEI-DLO, Den Haag, 1996.

Bouwman ir. G, Pak dr. ir. G, *Een structuur voor glastuinbouw die goed is voor economie en milieu*, ROM Magazine nr 3, Maart 1998.

Centraal Bureau voor de Statistiek, *Glastuinbouw 1992*, 's Gravenhage, 1994.

Kool, ir. H.D.M, TNO Bouw/afdeling Constructies, schriftelijke mededelingen, april/mei 1998.

Out, ir. P.G., Breuer, ing. J.J.G., *Effect van gecoat glas op de lichttransmissie en het energiegebruik van tuinbouwkassen*, IMAG-DLO, Wageningen, maart 1995.

Oversloot, ing H.P., *Reflectieonderdrukkende lagen voor toepassing in collectoren*, TNO Bouw rapport nr B-93-0070, januari 1993.

Ministerie Economische Zaken, *Duurzame Energie in Opmars*, Den Haag, maart 1997.

3 State of the Art Anti-reflectie coatings

3.1 Inleiding anti-reflectie coatings

Het aanbrengen van anti-reflectie coatings op glazen substraten gebeurt al bijna 50 jaar met behulp van PVD opdampklokken en nat-chemische dip-coat installaties. Zo produceert de firma Schott al sinds 1953 nat-chemisch geproduceerde interferentie laag systemen. De toepassingen moeten echter voornamelijk in kleine substraat toepassingen gezocht worden, zoals lenzen en spiegels. Sinds begin jaren 60 zijn er ook anti-reflectie gecoate voorwerpen op de markt. De substraten waren echter nog klein van formaat. Pas begin jaren 70 kwamen er productiefaciliteiten voor het coaten van grotere glazen platen. Een van de eerste anti-reflectie gecoate glasproducten voor buitentoepassingen, het Schott Amiran® is echter pas sinds ongeveer 10 jaar op de markt. Dit product wordt met de sol-gel dip-coat technologie geproduceerd. Nog recenter (1998) is de introductie van anti-reflectie gecoat glas geproduceerd met magnetron sputteren door Euroglas-Trösch onder de handelsnaam LUXAR®. Beide anti-reflectie gecoate glasproducten zijn echter momenteel nog steeds duur, waardoor de toepassing gezocht moet worden in producten met een hoge toegevoegde waarde, zoals veiligheidsglas voor schilderijen en display kasten, etalageruiten etc. De ontwikkelingen in anti-reflectie multilaag designs en productiemethoden om ze op glas en plastic platen aan te brengen ontwikkelen zich zeer snel, en de verwachting is dan ook dat binnen 5-10 jaar anti-reflectie gecoat glas voor standaard architectuurglas gemeengoed zal zijn.

In de volgende hoofdstukken, zal allereerst een overzicht worden gegeven van de werking van anti-reflectiecoatings en van de belangrijkste productietechnieken waarmee die kunnen worden geproduceerd. Vervolgens zullen de paar commercieel verkrijgbare anti-reflectie gecoate glasproducten op grote glasoppervlakken besproken worden en zal een overzicht worden gegeven van de belangrijkste ontwikkelingen t.a.v. anti-reflectie coatings. Tenslotte zullen enige conclusies worden gegeven.

3.2 Werking van anti-reflectie coatings

3.2.1 Inleiding

De optische eigenschappen van dunne coatings op optisch transparante ondergronden is met name voor theoretisch vrij gecompliceerd. In dit rapport is getracht de theorie zo beperkt mogelijk te houden, en met name de wat praktische afgeleide

regels te bespreken. Voor uitgebreide theoretische achtergronden wordt verwezen naar MacLeod [1,2], Frankena et al [3], Petit et al [4], Pulker [5] en Bach et al [6].

Een kleine fractie van straling dat op het interface van twee materialen met verschillende brekingsindices valt wordt gereflecteerd. Voor twee materialen met complexe brekingsindices y_1 en y_2 kan afgeleid worden dat de reflectie van loodrecht invallend licht op een volkomen vlak interface gegeven wordt door vgl. 1.

$$R_{1,2} = \frac{(y_1 - y_2)^2}{(y_1 + y_2)^2} \quad (1)$$

De complexe brekingsindex kan geschreven worden als $y_j = n_j - ik_j$, waarbij het reële deel n de verhouding tussen de snelheid van de straling in vacuüm tot die in het materiaal is, het imaginaire gedeelte k gerelateerd is tot de absorptie in het materiaal en $i = \sqrt{-1}$. De imaginaire index k is gerelateerd tot de absorptie coëfficiënt α volgens vergelijking 2.

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (2)$$

Hierbij is λ de golflengte van de invallende straling. Vullen we $y=n-ik$ in vergelijking 1 in dan krijgen we:

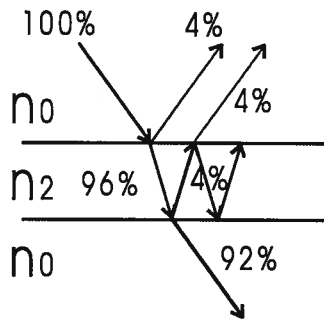
$$R_{1,2} = \frac{(n_1 - n_2)^2 + (k_1 - k_2)^2}{(n_1 + n_2)^2 + (k_1 + k_2)^2} \quad (3)$$

Uit vergelijking 3 volgt o.a. dat de reflectie symmetrisch is, als materialen 1 en 2 omgewisseld worden geeft de vergelijking hetzelfde resultaat. Dit betekend dus ook dat het resultaat onafhankelijk is van de richting waarin de bundel invalt.

Voor transparante materialen, waarin absorptie te verwaarlozen is en k erg klein is, versimpeld vergelijking 3 tot:

$$R_{1,2} = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (4)$$

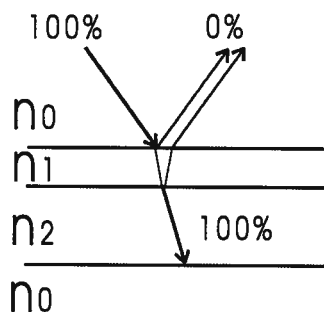
In figuur 1 is het lichtpad door een glasplaat schematisch weergegeven [1]. Licht dat vanuit de lucht ($n_0=1$ en $k_0=0$) op een glasplaat ($n_2 \approx 1.52$ en $k_2 \approx 0$) invalt, wordt gedeeltelijk gereflecteerd aan zowel de voorkant als de achterkant van de glasplaat. Deze reflectie is volgens vergelijking 4 ca. 4% van het licht aan elk grensvlak glas/lucht. In totaal betekent dit dus een verlies aan transmissie van ongeveer 8%.



Figuur 1: Reflectie van licht aan een glasoppervlak [1]

Reflectie kan bijna volledig geëlimineerd worden indien het oppervlak van het substraat zodanig gemodificeerd wordt dat de brekingsindex geleidelijk overgaat van de bulkwaarde van het materiaal naar de waarde van lucht ($n=1$).

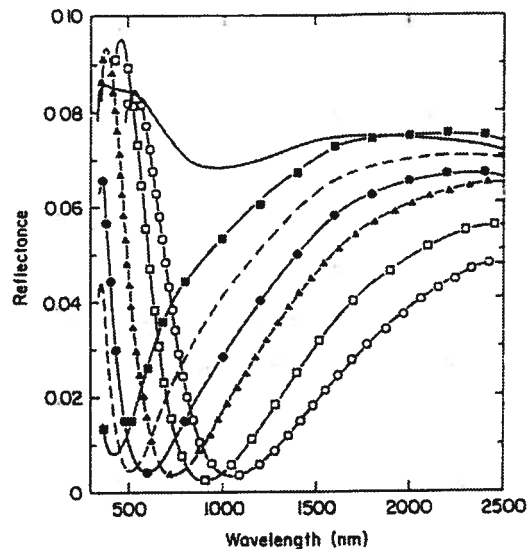
Door het aanbrengen van een geschikte dunne coating (met brekingsindex n_1) kan de reflectie ook verminderd worden. Figuur 2 toont schematisch de werking van zo'n anti-reflectie coating. Het valt te bewijzen [1] dat volledige eliminatie van het gereflecteerde licht wordt verkregen voor de volgende condities: $n_1^2 = n_0 \cdot n_2$ en $n_1 \cdot d_1 = m\lambda/4$, waarbij d_1 de dikte van de coating is, λ de golflengte van het licht en m oneven is ($= 1, 3, \text{etc.}$).



Figuur 2: Anti-reflectie coating op glas. Het gereflecteerde licht wordt nul als de amplitude en fase juist zijn gekozen [1]

Voor de combinatie lucht/glas betekent dit dat de ideale enkellaags anti-reflectie coating een brekingsindex heeft van 1,23 ($=\sqrt{1,52}$), en een dikte bij $\lambda=550$ nm, van 113 nm (of 338 nm, 564 nm etc.). enkellaags anti-reflectie coatings worden ook wel V-type anti-reflectie-coatings genoemd, omdat de reflectie vermindering uitgezet tegen de golflengte van het licht een V-vorm heeft, met een minimale reflectie bij één golflengte (zie figuur 3). Een verandering van de dikte van de coating heeft als gevolg dat het minimum van de V-vorm bij een andere golflengte komt te liggen. Helaas zijn er geen dichte optisch transparante materialen bekend met een brekingsindex van 1,23. Het materiaal dat het dichtst in de buurt komt is MgF_2 met een brekingsindex van 1,38. De optimale brekingsindex van 1,23 is wel te bereiken met

poreuze coatings. Als een laag poreuzer wordt komt er meer lucht in de laag te zitten, waardoor de brekingsindex van het materiaal tussen die van silica en lucht in komt ($n_1^2 = \text{dichtheid} * n_{\text{silica}}^2 + (1-\text{dichtheid}) * n_{\text{lucht}}^2$). Dus door de porositeit van bijvoorbeeld een SiO_2 coating te verhogen kan de brekingsindex gemodificeerd worden. Voor een silica coating met een brekingsindex van 1,52 geeft een 40% dichte coating dan een brekingsindex van 1,23.

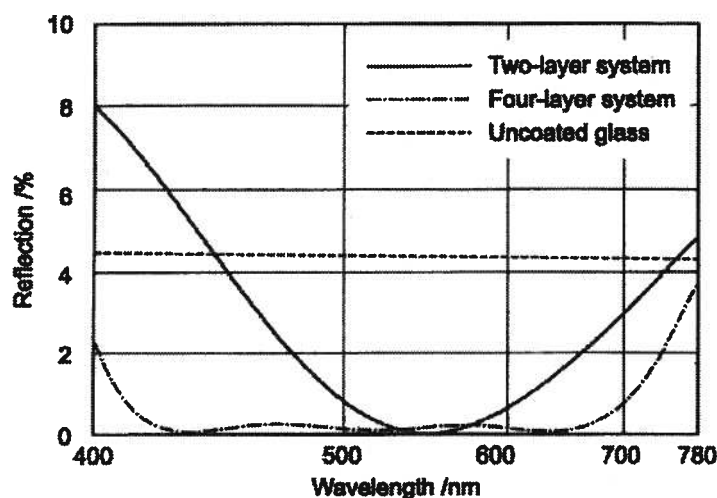


Figuur 3: Reflectie van een enkellaags anti-reflectie coating als functie van de golflengte en de coating dikte; — onbehandeld glas; † 87 nm; † 104 nm; † 143 nm; † 176 nm; † 207 nm [7]

3.2.2 Dubbellaags anti-reflectie coatings

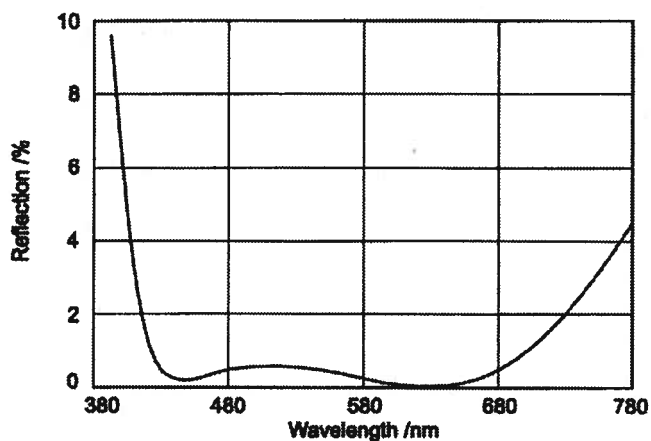
Zoals besproken bestaat er geen ideale dichte enkellaags anorganische anti-reflectie coating met een brekingsindex van 1,23. Met behulp van twee of meer lagen, waarbij de eerste laag een hoge brekingsindex heeft (hoger dan glas) en de tweede laag een relatief lage brekingsindex, is dit probleem op te lossen. Voor vrijwel iedere combinatie van een hoge brekingsindex laag en lage brekingsindex laag, is door afstemming van de laagdiktes de reflectie bij één golflengte tot nul te reduceren. Een dergelijke coating combinatie wordt ook een V-coating genoemd vanwege de vorm van de spectrale verdeling van de reflectie als functie van de golflengte (zie figuur 4). De golflengte waarbij de reflectie nul is, kan worden gevarieerd door de diktes van de twee coatings te variëren.

Bij het gebruik van meer dan 2 lagen wordt het golflengte gebied waarin een lage reflectie wordt bereikt groter (zie figuur 4).



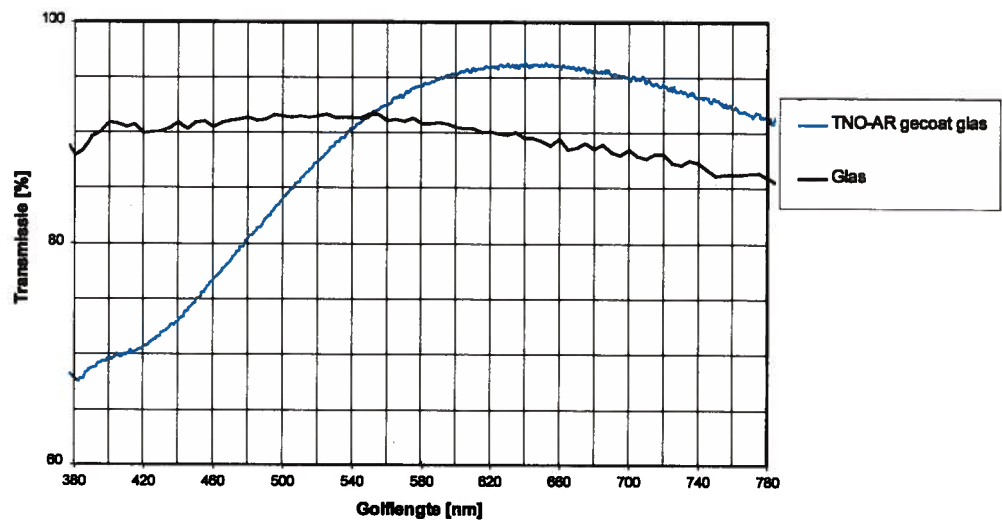
Figuur 4: Spectrale verdeling van de reflectie van een twee-laags en een 4-laags anti-reflectie coating, vergeleken met de reflectie van één kant van een glasplaat [6]

Schott verkoopt anti-reflectie gecoat architectuurglas onder de Amiran® [6]. Daarbij wordt een 3-laags anti-reflectie-systeem gebruikt bestaande uit de volgende lagen: Glas/ $\text{Si}_x\text{Ti}_y\text{O}_2/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ (zie figuur 5 voor de spectrale respons).



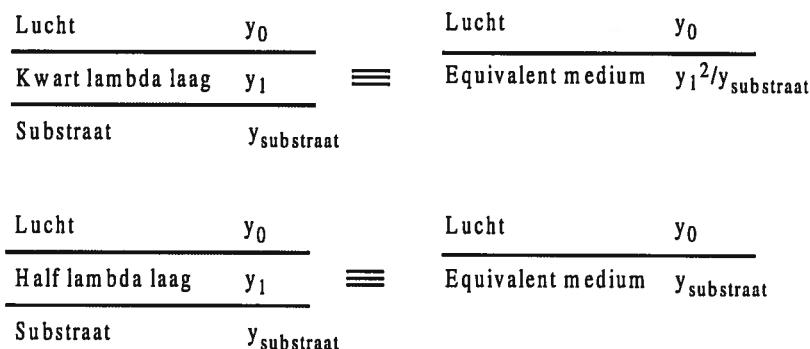
Figuur 5: Spectrale verdeling van de reflectie van Schott® glas[6]

Voor een dubbellaags anti-reflectie systeem wordt in veel gevallen TiO_2 ($n_2 = 2,55$) als eerste laag en SiO_2 ($n_1 = 1,52$) als tweede laag gebruikt. TNO heeft met een dergelijk twee-laags systeem een reflectie van bijna nul bij 1 golflengte en een transmissie-verbetering over een breed golflengte gebied van ca. 3,5% bereikt. In figuur 6 wordt een voorbeeld gegeven van een TNO twee-laags systeem t.b.v. zon-necel toepassingen. De verwachting is dat dit nog verbeterd kan worden door de laagdiktes verder te optimaliseren en nog beter op elkaar af te stemmen.

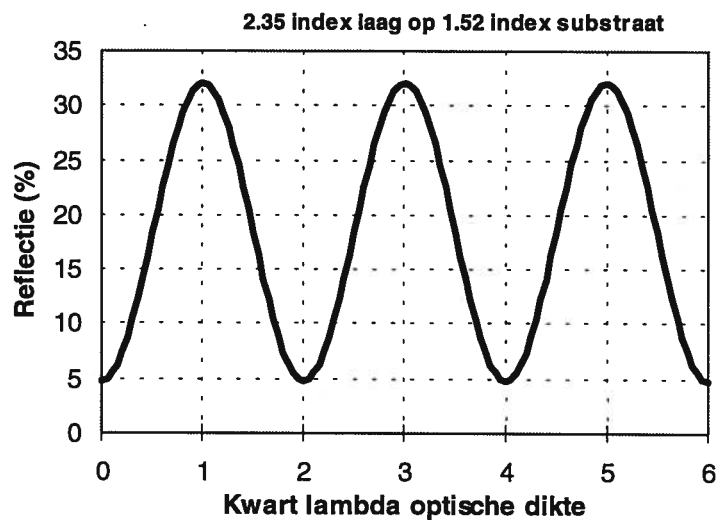


Figuur 6: Transmissieverbetering bereikt bij TNO door toepassing van tweelaags anti-reflectie coating op glas (systeem nog niet volledig geoptimaliseerd)

Naarmate er meer lagen worden toegepast op een substraat zoals bijv. glas wordt het steeds ingewikkelder om theoretisch te berekenen wat het effect van de is op de transmissie en de reflectie van het licht wat op het systeem valt. In de praktijk worden er een aantal hulpmiddelen gebruikt waarmee een goede aanname van het effect van een multilaagcoating kan worden bepaald c.q. berekend. Een van die methodes is het gebruik van zogenaamde kwart lagen voor systemen waarin enkel dielectrische absorptievrije lagen worden gebruikt [3]. Een kwart laag is een laag met een optische dikte, n keer een kwart golflengte. Het kan aangetoond worden dat een systeem substraat/coating met een coating met een dikte een oneven keer een kwart golflengte vervangen kan worden door een equivalent medium met een brekingsindex $(y_{\text{coating}})^2/y_{\text{substraat}}$. Terwijl een even combinatie van kwart lagen een combinatie van half lagen oplevert die een effect hebben alsof ze niet bestaan en een equivalent medium heeft dan ook de brekingsindex van het substraat ($y_{\text{substraat}}$). Dit is in figuur 7 in diagram vorm weergegeven. Voor één enkele laag op een substraat wordt dit inzichtelijk gemaakt in figuur 8.



Figuur 7: Diagram illustratie van de kwart regel [2]



Figuur 8: De reflectie van een enkele laag als een functie van de dikte in kwart golflengtes[2]

Kwart lagen worden vanwege hun eenvoud frequent gebruikt in optische designs [2]. Daarbij wordt een vereenvoudigde notatie gebruikt, hoge index kwart lagen worden gerepresenteerd met H, lage index kwart lagen met L en intermediare kwart lagen met M.

Een design voor een smalle band filter kan bijvoorbeeld zijn:

lucht | HLHLHL HH LHLHLH | glas

Als we rekening houden met het feit dat HH en LL half lagen representeren die de reflectie van het substraat niet veranderen en dus geëlimineerd kunnen worden, dan kunnen we bovenstaand filter vereenvoudigen:

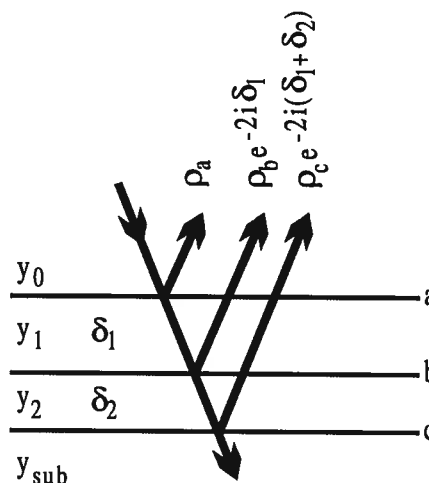
lucht | [H[L[H[L[H[L [HH] L]H]L]H]L]H] | glas

Resultierend in: lucht | glas

Een dergelijk filter heeft een reflectie aan het interface van ca 4%. Het design kan verbeterd worden door er een enkele kwart laag met lage brekingindex als aan toe te voegen, en het design wordt dan:

lucht | L HLHLHL HH LHLHLH | glas

Voor optische designs waarin lagen worden gebruikt met andere laagdiktes of andere golflengtes, waarbij de lagen geen kwart lagen meer zijn, dan gaat bovenstaande methode niet meer op. Met de snelle ontwikkelingen in de snelheid van computers is het tegenwoordig mogelijk om complexe theoretisch door te rekenen op hun optische eigenschappen. Momenteel zijn er diverse software pakketten te koop, waarmee dit zelfs voor leken relatief makkelijk kan. Alhoewel een design makkelijk door te rekenen valt blijft het trial en error om een te ontwerpen, en is er veel vakkennis en instinct nodig om enkel en alleen met de computer een complex design te maken. In optische designs waarin ook niet kwart lagen voorkomen wordt daarom vaak gebruik gemaakt van een andere benadering methode, en wel de zogenaamde vector methode [2]. In deze methode worden een aantal aannames gemaakt zoals de aanname dat er geen absorptie in de lagen optreed en de aanname dat het gedrag van een bepaald kan worden door slechts één reflectie per interface mee te nemen. Deze benadering blijkt voor bijvoorbeeld anti-reflectie lagen verbazingwekkend goede resultaten op te leveren. Ter illustratie van de methode bekijken we de situatie zoals schematisch weergegeven in figuur 9.

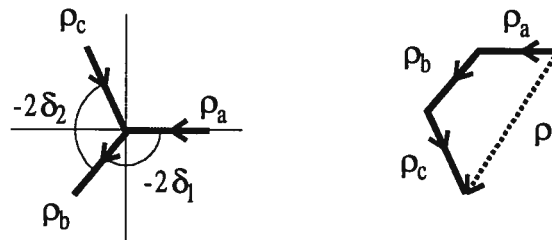


Figuur 9: De eerste fase van de vector methode waarbij de verschillende amplitude reflectie coëfficiënten samen met hun relatieve fases worden weergegeven[2]

We nemen aan dat de invallende lichtbundel een amplitude 1 heeft. Op de verschillende interfaces (a, b en c) krijgen we dan een amplitude reflectie coëfficiënt ρ_a , ρ_b en ρ_c waarbij de amplitude wordt gegeven door: $\rho_a = (y_0 - y_1)^2 / (y_0 + y_1)^2$ enz. (zie vgl. 1). Aan ieder interface treedt ook een faseverandering op. Als we die meenemen dan wordt de totale reflectie:

$$R = \rho_a + \rho_b \exp(-2i\delta_1) + \rho_c \exp(-2i(\delta_1 + \delta_2))$$

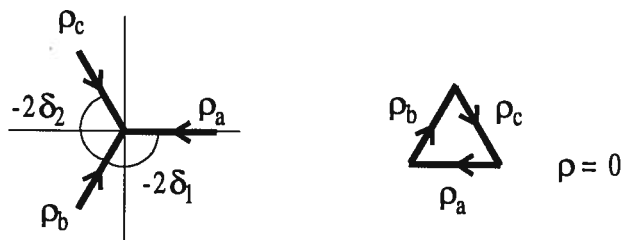
Alle amplitudes en de bijbehorende fases kunnen worden gerepresenteerd als vectoren in een complex vlak en als vector polygonen worden opgeteld. Figuur 8 laat zien hoe voor een willekeurig systeem de resulterende reflectie bepaald kan worden.



Figuur 10: Polaire diagram met schematische weergave van de vector methode

Als voorbeeld van een design [2] nemen we een twee laag anti-reflectie coating op germanium in het infrarood gebied. In het initiële design nemen we twee lagen met afnemende brekingsindex

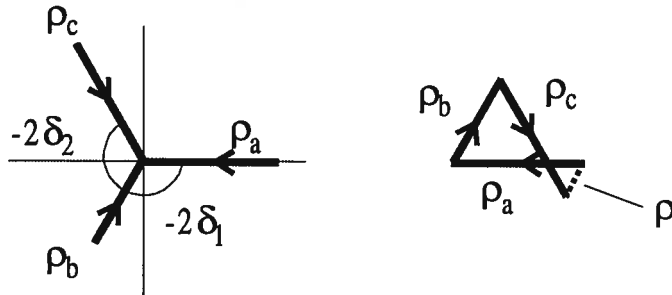
$(y_0 (= \text{lucht}=1) < y_1 < y_2 < y_{\text{sub}} (= \text{germanium}))$ en we zorgen ervoor dat de twee lagen een zodanige brekingsindex hebben dat alle vectoren dezelfde lengte hebben. (Dit geldt voor $y_1/y_0 = y_2/y_1 = y_{\text{sub}}/y_2$ waaruit afgeleidt kan worden dat $y_1^3 = y_0^2 y_{\text{sub}}$ en $y_2^3 = y_0 y_{\text{sub}}^2$. Dan zijn er twee mogelijke oriëntaties waarbij de totale reflectie nul is. Een waarbij de fase dikte δ van de lagen $1/3\pi n d$ is en de tweede met fase dikte $\delta = 2/3\pi n d$. In figuur 11 is de eerste van de twee mogelijkheden schematisch weergegeven.



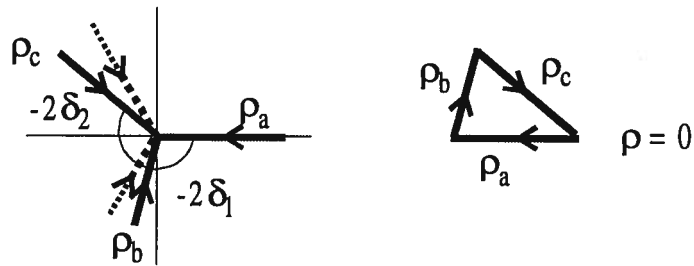
Figuur 11: Een van de mogelijke oriëntaties voor een twee-laags anti-reflectie coating op germanium (hoek is 60°) [2]

Stel nu dat er geen twee lagen worden gevonden met de bovenstaande brekingsindex van $y_1^3 = y_0^2 y_{\text{sub}}$ en $y_2^3 = y_0 y_{\text{sub}}^2$, maar wel twee lagen waarvan de brekingsindex iets dichter bij elkaar zit, maar wel met dezelfde amplitudereflectie op vlakken a en c. Dan zal ρ_b kleiner zijn en ρ_a en ρ_c beide iets groter. Het resultaat is in figuur 12

weergegeven. De totale reflectie aan dit systeem is nu toegenomen. De totale reflectie kan weer teruggebracht worden tot nul door de fase dikte van de lagen zodanig te veranderen dat de hoek kleiner dan 60° wordt, zie figuur 13.



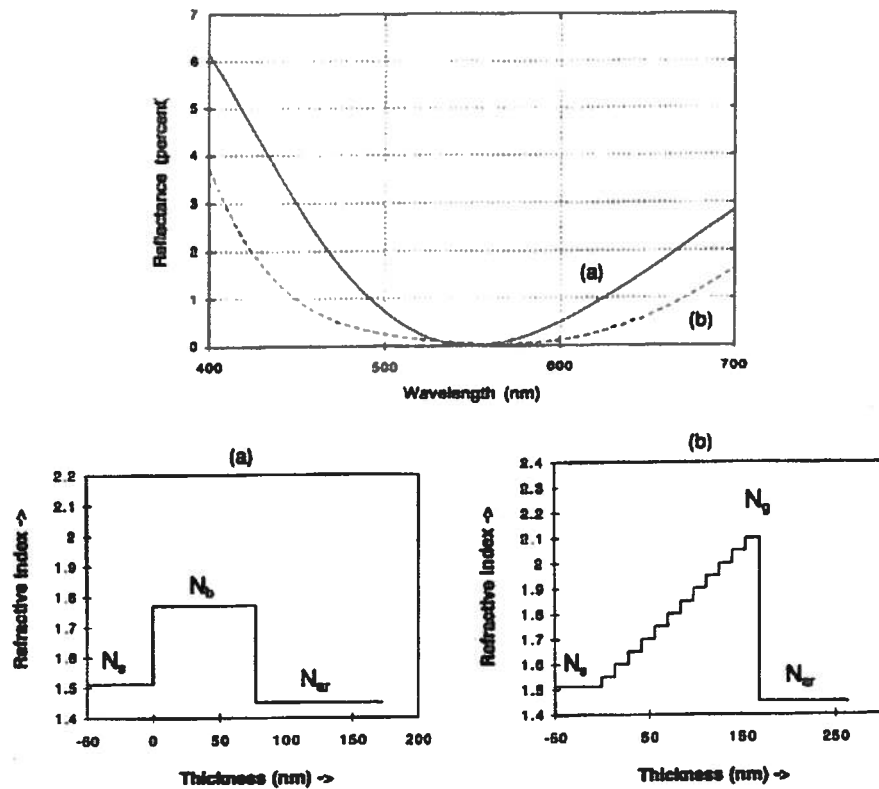
Figuur 12: Het effect bij een hoek van 60° als ρ_a en ρ_c groter worden en ρ_b kleiner is



Figuur 13: De fase hoek is iets verkleind zodat de totale reflectie weer nul is geworden

3.2.3 Gradiënt index anti-reflectie lagen

Bij zogenaamde gradiënt index anti-reflectie lagen worden coatings gebruikt met een variabele samenstelling van de laag, waardoor de brekingsindex niet uniform is maar in de laag geleidelijk veranderd. Met gradiënt index lagen zijn verschillende ontwerpen mogelijk. Figuur 12 geeft een van de vele mogelijkheden weer. Er zijn diverse methoden om gradiënt index lagen te produceren[10]. De vervaardiging van een gradiënt index coating is echter complex en tot nu toe veel te duur voor de productie van goedkope anti-reflectie coatings op grote schaal. Een van de grote voordelen van het design zoals in figuur 14 is weergegeven is de sterk verminderde gevoeligheid voor laagdikte verschillen t.o.v. een design waarin enkel homogene lagen worden toegepast. Dit maakt de grootschalige productie van anti-reflectie coatings op bijvoorbeeld glas veel makkelijker en daarmee in de toekomst goedkoper[11].



Figuur 14: Reflectie versus golflengte voor twee-laags anti-reflectie coatings: a) design met homogene lagen b) design waarin een gradiënt index laag is gebruikt. (s=substraat, b=hoge index basis laag, g=gradient index laag en ar=anti-reflectie laag index toplaag) [11]

3.3 Productietechnieken

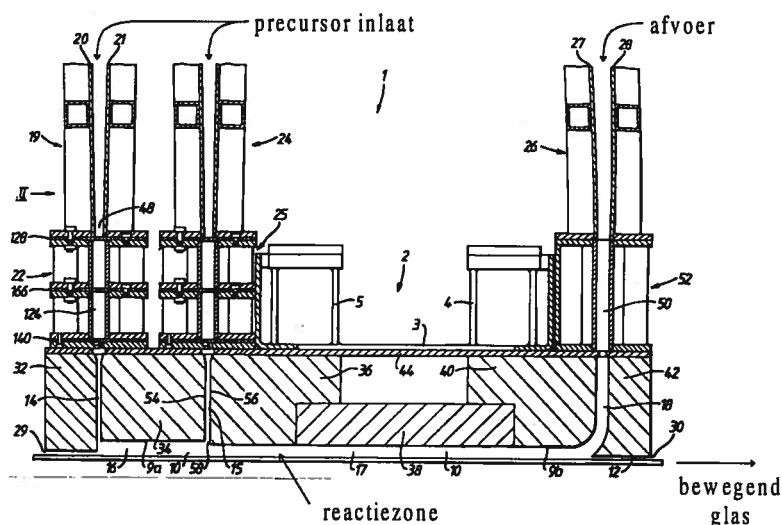
3.3.1 Inleiding

Anti reflectie coatings worden al tientallen jaren toegepast op optisch glas zoals lenzen voor camera's, laser systemen en brillen. Dit zijn over het algemeen vrij kleine glazen voorwerpen, waarop de anti-reflectie coating bijna standaard wordt toegepast. De coatings worden meestal aangebracht m.b.v. PVD technieken zoals opdampen of magnetron sputteren. Alhoewel deze technologie door de investeringskosten vrij kostbaar is, kunnen de kosten van de coatings relatief laag gehouden worden doordat in één batch honderden brillenglazen en/of lenzen gecoat kunnen worden. Desalniettemin variëren de aanbrengkosten per glas toch nog van enige guldens tot enige tientallen guldens. Als we deze aanbrengkosten doortrekken naar grootschaliger toepassingen zoals architectuurglas, zonnecel panelen etc., dan komen we op vierkante meter prijzen die enige ordes van grootte te hoog zijn. Dit is in essentie de reden waarom de toepassing van anti-reflectie coatings op grote glaspla-

ten nog niet op grote schaal en voor een redelijke prijs beschikbaar is. De ontwikkelingen in het coaten van grote oppervlakken voor een acceptabele prijs gaan echter zeer snel en de verwachting is dat anti-reflectie gecoat glas op grotere schaal in de nabije toekomst commercieel binnen bereik zal komen. In dit hoofdstuk worden de belangrijkste productieprocessen, waarmee glas op grotere schaal kan worden gecoat besproken.

3.3.2 Chemical Vapour Deposition (CVD)

Bij deze techniek wordt een coating op chemische wijze vanuit de dampfase gedeponeerd op een heet substraat. Bijvoorbeeld het in anti-reflectie coatings veel gebruikte silica (SiO_2) kan gedeponeerd worden bij atmosferische druk (APCVD) vanuit SiH_4 en O_2 bij temperaturen tussen 200-600°C. In de glasindustrie wordt glas tijdens de vlakglas productie op de zogenaamde 'floatlijn' gecoat terwijl het glas nog heet is (zie figuur 15). Dit proces wordt o.a. toegepast om low-E glas te produceren. Het nadeel van dit relatief goedkope productieproces is dat het financieel alleen interessant is voor productie van grote oppervlakken glas ($>> 1$ miljoen m^2/jaar).



Figuur 15: Schematische doorsnede van een on-line CVD coater zoals die wordt toegepast in de glasindustrie voor het coaten van glas [12]

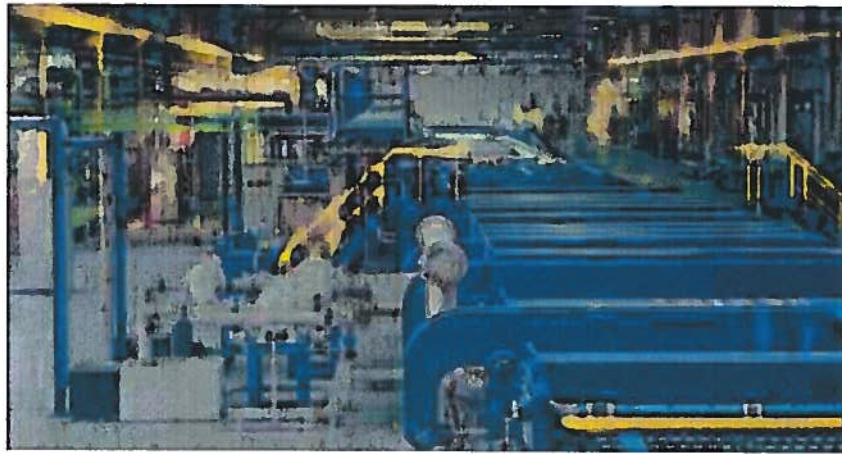
Een alternatieve mogelijkheid die bijvoorbeeld bij de productie van zonnecellen wordt toegepast is APCVD via een off-line installatie, zoals o.a. verkocht wordt door de firma Watkin-Johnsson. Hierbij wordt het glas op een lopende band geplaatst, opgewarmd via ovens, waarna een coating kan worden aangebracht. De bestaande opstellingen kunnen echter alleen kleine glasmaten aan (ca 20-50 cm breed). De apparatuur is relatief duur (investering $> 1\text{Mfl}$), en de maximale productieomvang per jaar is relatief laag.

3.3.3 Physical Vapour Deposition (PVD)

Bij deze techniek worden de coatings op fysische wijze gedeponeerd op een substraat. Daarbij zijn voor grootschalig glas coaten twee specifieke PVD technieken van belang. De eerste is het opdampproces. Hierbij wordt het op te dampen materiaal in een kroesje verwarmd en bij een laag vacuüm verdampt. Het materiaal slaat vervolgens op het koudere substraat neer. Het tweede proces is sputteren. In dit proces worden tussen twee elektrodes bij laag vacuüm een hoge spanning aangebracht. Onder invloed van het hoge elektrisch veld tussen de elektrodes worden geïoniseerde deeltjes versneld naar het target, wat op een van de elektrodes is bevestigd. Daarbij ontstaan zeer hoge snelheden van de deeltjes. Tijdens botsingen met andere (neutrale) gasmoleculen die zich in het vacuüm bevinden ontstaan nog meer geïoniseerde deeltjes die vervolgens onder invloed van het elektrisch veld ook naar de elektrode gaan bewegen. Dit resulteert in een cascade van geïoniseerde deeltjes die met grote snelheid naar de elektrode toe bewegen, en daar met een grote snelheid tegenaan botsen. Tijdens de botsing worden er stukken van de elektrode weggeslagen die vervolgens op substraten weer neerslaan en een coating vormen.

Opdampinstallaties zijn over het algemeen in de glasindustrie batch processen. Alhoewel er enorme installaties beschikbaar zijn waar veel glas in één batch verwerkt kan worden, is het door de relatieve lange productiecycli en de hoge investeringen (alhoewel veel lager dan voor sputtersystemen) een relatief kostbaar proces, waar per productieunit geen grote hoeveelheden glas op jaarbasis gecoat kunnen worden. Er zijn ontwikkelingen gaande om verdamping van het te deponeren materiaal via zogenaamde E-beam verdamping te doen. Daarbij wordt het te verdampen materiaal niet via thermische opwarming bij lage druk verdampt, maar wordt het materiaal verdampt d.m.v. een krachtige elektronenbundel. Dit resulteert in véél hogere verdampingssnelheden. Hierdoor wordt het in principe mogelijk om ook continue verdampingssystemen te bouwen.

Er zijn diverse bedrijven die sputtersystemen bouwen voor het coaten van grote glasplaten (zie figuur 16). Leybold, BOC en Von Ardenne Anlagen zijn hierin de drie grootste. Zij leveren allen systemen waarin het glas batchgewijs via een lopende band systeem semi-continue gecoat kan worden.



Figuur 16: PVD magnetron sputter installatie voor het coaten van vlak glas. (foto: von ardenne anlage type GC321H voor 3.21x6 m² glasplaten)

Dergelijke sputterinstallaties voor het coaten van glas zijn echter zeer duur. Een installatie voor het aanbrengen van een low-E coating op architectuurglas (5-7 laags systeem) kost ca 40 Mfl, de kosten voor gebouw en voorzieningen niet meegerekend. Dergelijke investeringen zijn alleen terug te verdienen bij productievolumes veel groter dan 1 miljoen m². Tot voor kort was de productie van anti-reflectie gecoat glas m.b.v. PVD in grote productievolumina vrijwel onmogelijk en veel te duur, waardoor het commercieel niet interessant was. Een van de oorzaken hiervan is de slechte reproduceerbaarheid en relatief trage depositiesnelheid van oxidische lagen zoals SiO₂ en TiO₂ m.b.v. de DC magnetron sputter systemen zoals die worden toegepast in coaters voor glas. Een coater zou zodanig veel targets nodig hebben dat deze bijna onbetaalbaar is. Firma's zoals Leybold, BOC en Von Ardenne Anlagen hebben de afgelopen jaren echter nieuwe sputtersystemen ontwikkeld, waarmee oxidische materialen met veel grotere snelheid, en met veel hogere laagdiktheid gesputterd kunnen worden. Zo heeft de firma Leybold het zogenaamde TwinMag[®] reactief magnetron systeem ontwikkeld [9]. Leybold beschrijft de toepassing van dit nieuwe systeem voor de depositie van anti-reflectie lagen op glas in een productiemachine. Daarbij wordt voor een 4 laags anti-reflectie systeem een reflectie gevonden van minder dan 0.2% [9]. De anti-reflectie bestaat daarbij uit vier lagen: glas/TiO₂/SiO₂/TiO₂/SiO₂.

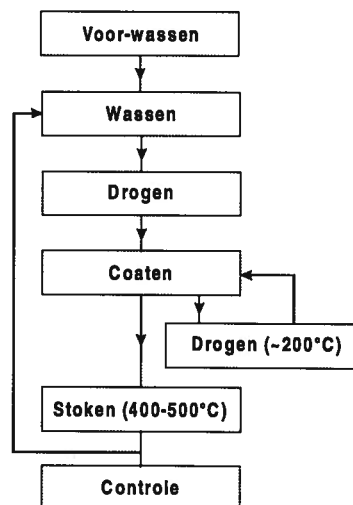
De BOC dochter 'Airco coating technology', beschrijft een 6-laags brede band anti-reflectie, de bestaande uit glas/TiO₂/SiO₂/TiO₂/SiO₂/TiO₂/SiO₂ met laagdiktes respectievelijk 10,4 nm, 3,9 nm, 46,7 nm, 7,6 nm, 46,2 nm en 87,7 nm [15]. Airco maakt hierbij gebruik van speciaal ontwikkelde roterende kathodes C-MAG[®] genaamd. Deze kathodes geven evenals de Leybold TwinMag[®] verhoogde sputtersnelheden en dichtere coatings.

Voor productie van anti-reflectie gecoat architectuurglas voor echt grootschalige toepassingen is het PVD proces ondanks de nieuwe kathodes nog steeds te duur.

Nog verder verbeterde kathodes met nog grotere sputtersnelheden en/of alternatieve anti-reflectie designs moeten in de toekomst de kostprijs verder omlaag brengen.

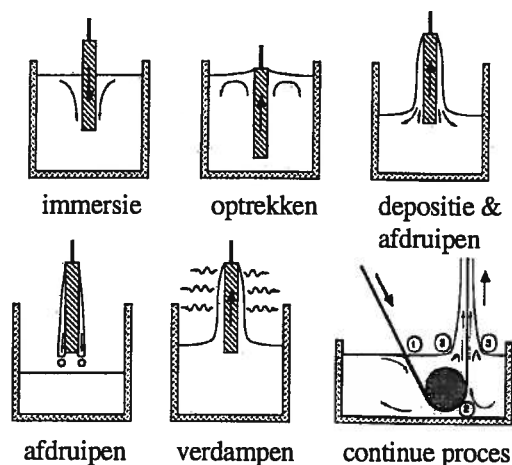
3.3.4 Nat-chemische depositietechnieken (sol-gel)

Hieronder valt een heel scala van depositietechnieken zoals dip-coaten, flow-coaten, spray depositie, screen printing etc. Voor het aanbrengen van anti-reflectie coatings op grotere glaspanelen wordt voornamelijk het dip-coat proces toegepast. Dit is binnen het scala van nat-chemische technieken momenteel de techniek waarmee de meest homogene lagen aangebracht kunnen worden. Alle nat-chemische processen bestaan uit een aantal stappen. De eerste stap is de productie van een zogenaamde stockoplossing bestaande uit een coating oplossing in een oplosmiddel. In de tweede stap wordt een (natte) coating op een substraat aangebracht, wat vaak voorafgaand aan het dippen een schoonmaak behandeling heeft ondergaan. Vervolgens wordt het oplosmiddel verwijderd in een droog-stap ook wel flash-off genoemd en tenslotte wordt de laag gestabiliseerd, gepolymeriseerd of verdicht tot de uiteindelijke coating. Deze laatste stap gebeurt vaak door een stookprocedure bij verhoogde temperatuur. Figuur 17 toont deze stappen voor het productieproces voor[®], een van de producten van de firma Schott in Duitsland.

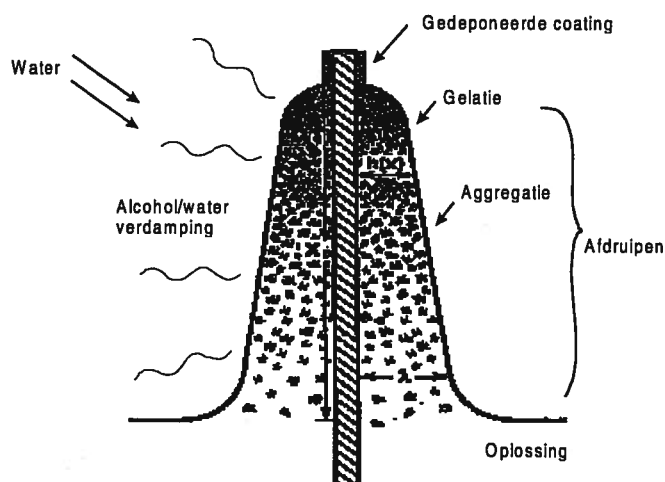


Figuur 17: Productie stappen bij Schott t.b.v. de productie van[®] [6]

In figuur 18 staat de coating depositiestap schematisch weergegeven voor het dip-coat proces. Bij dip-coaten wordt het substraat ondergedompeld in een grote tank gevuld met de sol-gel stock oplossing, vervolgens wordt het substraat met constante snelheid uit de oplossing getrokken. Tijdens het optrekken gebeuren er parallel drie processen (zie figuur 19), de stock oplossing druipt van het substraat af, het oplosmiddel verdampt aan de lucht en op het substraat (vaak onder invloed van reactie met water uit de lucht) vormt zich een coating. De gevormde coating is meestal nog in een zodanige toestand, dat



Figuur 18: Schematische tekening dip-coat proces



Figuur 19: Schematische voorstelling van het sol gel dip coating proces, met de verschillende stadia van coating ontwikkeling die ontstaat door het afdruijen van stock oplossing en de reacties aan lucht

de laag makkelijk opnieuw oplost in het oplosmiddel van de stock-oplossing. Er kan dan ook meestal geen twee keer achter elkaar gedipt worden omdat de laag dan weer oplost. Pas na een stook behandeling, waardoor de coating uithard en een voldoende stabiliteit heeft gekregen kan nogmaals een laag m.b.v. dipcoaten aangebracht worden.

De homogeniteit van de aangebrachte lagen is zeer goed. De dip-coat technologie produceert in vergelijking met alle andere coating processen de meest homogene lagen, vooral op grotere oppervlakken. Schott claimt een brekingsindex variatie voor een TiO_2 coating van $n=2.224 \pm 0.003$ te bereiken over een glasplaat met een oppervlakte van $3.75 \times 3.21 \text{ m}^2$. Tegelijkertijd wordt het glas aan twee zijden gecoat, in tegenstelling tot veel andere coatings technieken waar slechts enkelzijdig gecoat

wordt, en het glas voor een dubbelzijdige anti-reflectie-coating tweemaal gecoat moet worden.

De techniek heeft echter ook een paar belangrijke nadelen. Voor de depositie van coatings moet tussen iedere dip-stap gestookt worden (zie figuur 17), waardoor productie tijdrovend wordt. Verder is voor het coaten van grote oppervlakken een zeer grote dip-tank nodig, waar soms voor een kapitaal aan stockoplossing in zit. Overigens kan ook het stookproces, vooral na het aanbrengen van de laatste coating waarbij voor sol-gel anti-reflectie coatings tot ca 400-500°C gestookt moet worden, gecompliceerd zijn. Bij de firma Schott [6] wordt deze laatste stap uitgevoerd in een speciale oven met 6 compartimenten, waardoor het glas geleidelijk opgewarmd en afgekoeld wordt om breuk van het glas te voorkomen vanwege thermische spanningen.

3.4 Commercieel verkrijgbare anti-reflectie coatings

3.4.1 Inleiding

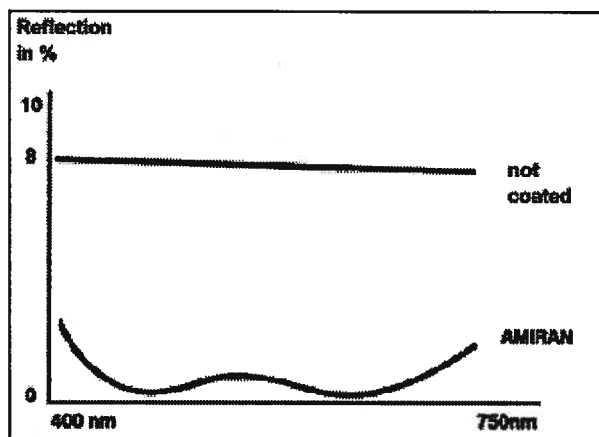
Anti-reflectie gecoate glazen en polymeren producten zijn tegenwoordig vrij standaard verkrijgbaar op producten zoals brillenglazen en lenzen. Anti-reflectie-coatings op grote glasoppervlakken wordt echter nog steeds op relatief kleine schaal toegepast. Er zijn, zeker als we kijken naar Europa slechts enkele bedrijven actief in deze markt. Door nieuwe technologische ontwikkelingen is het aantal aanbieders van anti-reflectie gecoat glas gestaag groeiende. Daarnaast is er een gestage groei van in-huis coaters die op glazen voorwerpen tot ca. 1 m² anti-reflectie coatings aanbrengt. Een voorbeeld hiervan is Philips die d.m.v. de Sol-gel techniek met spin-coaten anti-reflectie coatings op televisie beeldbuizen aanbrengt. Een tweede voorbeeld is het Franse defensie instituut CEA-CEL-V, waar o.a. SDI megajoule lasers ontwikkeld en gebouwd worden en waar de grote lenzen voor die systemen (ca 1 m² groot) anti-reflectie gecoat worden m.b.v. een aantal nat-chemische depositie technieken [18].

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste producenten van anti-reflectie gecoat vlak glas en hun producten besproken. Dit blijken er in Europa voor zover bekend maar een paar te zijn.

3.4.2 Schott

De eerste fabrikant die grote oppervlakken glas in productie van een anti-reflectie laag voorziet is de Duitse firma Schott. De Schott-groep produceert al sinds 1964 anti-reflectie gecoat glas m.b.v. het nat-chemische dip-coat proces [6]. Daarbij wordt een drielaags via een batch proces aangebracht. Deze drie lagen zijn als volgt opgebouwd : direct op het glas komt een gemengde TiO₂:SiO₂ laag, dan een TiO₂ laag met hoge brekingsindex en tenslotte een SiO₂ laag met lage brekingsindex. Hiermee is een zeer lage reflectie te bereiken (zie figuur 20). De combinatie van de

drie lagen met het relatief trage dip-proces en de gecompliceerde opwarm en afkoel-procedures maakt dit product relatief duur. Dubbelzijdig gecoat 6 mm enkelglas kost momenteel ca 80 NLG/m².



Figuur 20: Reflectie van het Schott anti-reflectie gecoate glasproduct® [13]

De Schott groep heeft momenteel 3 anti-reflectie gecoate glasproducten. Het eerste product, verkrijgbaar sinds 1964 wordt verkocht onder de handelsnaam Mirogard® en wordt geproduceerd door Deutsche Spezialglas AG (DESAG). Dit product wat voornamelijk verkocht wordt voor binnentoepassingen, als museum glas voor de bescherming van schilderijen en voor vitrines, kan geproduceerd worden op glas-platen tot 1.22x1.77 m². Het product is op zowel standaard floatglas als op ijzer-arm hoog transparantie glas verkrijgbaar. Het product is echter niet goed geschikt voor buitentoepassingen.

Voor buitentoepassingen heeft Schott sinds 1987 een product met hogere weersbestendigheid op de markt onder de handelsnaam®. Dit product is evenals Mirogard® op diverse soorten glas beschikbaar. De maten die geproduceerd kunnen worden zijn veel groter tot 3.75x3.09 m². De belangrijkste applicatie van® is ontspiegelde etalageruiten, glas voor Tv-studio's, panorama ruiten in restaurants om s' nachts beter naar buiten te kunnen kijken etc. Naast de hoofdreden voor aanschaf van dit product, n.l de ontspiegeling van de ruit, geeft dit product ook een aanzienlijke energiebesparing, doordat er meer licht in de ruimte kan komen door de hogere transmissie van het glas. Schott rekent voor [14] dat bij 10 m² etalageoppervlak een besparing op stroomkosten van ca 600,-- NLG per jaar mogelijk is. De weersbestendigheid van dit product is redelijk. Schott geeft 5 jaar garantie op doorzicht en reflectievermogen. Toch zijn enige kanttekeningen op z'n plaats. de krasbestendigheid is niet zo goed als van ongecoat glas. Reiniging van het product is goed mogelijk zolang niet met schurende bestanddelen gewerkt wordt Verder kan het product wel chemisch aangetast worden. Chemisch verontreinigt regenwater moet vermeden worden. Schott waarschuwt dat® beschermd moet worden tegen regenafvoer vanaf de gevel, omdat pleister-, metselkalk- of beton-uitlogingen, waar de coatings niet tegen bestand zijn, uit de gevel door regenwater over het glas kan stromen.

Recentelijk is er nog een derde product geïntroduceerd onder de handelsnaam Conturan[®]. Dit product is met name geschikt voor computer monitors. Tv's, displays, bedieningspanelen (o.a. ook voor auto's) etc. Applicaties waar poets en krasbestendigheid goed moeten zijn, maar weersbestendigheid is niet belangrijk.

Schott verkoopt van al de drie bovenstaande producten naast ontspiegeld enkelglas, momenteel diverse variëteiten, zoals dubbelglas, veiligheidsglas, isolatieglas, low-E glas etc.

3.4.3 Prinz Optics

Naast Schott zijn er nog kleinere bedrijven die vergelijkbare anti-reflectie coatings als bij het[®] glas kunnen aanbrengen. Het bedrijf Prinz optics in Mainz, Duitsland, is zo'n bedrijf. Het is een met steun van en door oud medewerkers van Schott opgericht bedrijf dat nat-chemisch coatings op glas aanbrengt op bestelling. Dit bedrijf bestrijkt de niche markt waar Schott geen belangstelling in heeft.

3.4.4 Euroglas-Trösch

Recentelijk is, voor zover bekend, een van de eerste anti-reflex gecoate architectuurglas producten, geproduceerd m.b.v. PVD magnetronsputteren, op de markt gekomen. De firma Glas Trösch AG heeft een Leybold coater in bedrijf genomen speciaal voor de productie van anti-reflectie coatings op vlakglas. In deze coater wordt gebruik gemaakt van de nieuwe TwinMag[®] kathodes.

De firma Euroglas (waarvan Glas Trösch AG een dochter is) verkoopt PVD anti-reflectie gecoat glas onder de handelsnaam LUXAR[®]. Dit product is te koop in twee varianten, éénzijdig en tweezijdig ontspiegeld glas met maximale afmetingen 2,80x1,90 m². De toepassingsgebieden waarmee Euroglas adverteert is vrijwel identiek aan dat van Schott, museum toepassingen, vitrines, etalages etc. Alhoewel de verwachting is dat PVD gecoat glas duurzamer is dan sol-gel gecoat glas, zijn de garantie en specificaties voor LUXAR[®] [16] vrijwel identiek aan die van[®], zoals een garantieperiode van 5 jaar, slechts lichte krasbestendigheid, bestand tegen schoonmaakmiddelen, maar niet tegen zuren en sterk alkalische oplosmiddelen. Bij toepassing als etalageglas moet er evenals bij[®] voor gewaakt worden dat er geen regenwater via het glas van het gebouw afstroomt, omdat daardoor de chemisch kan worden aangetast.

3.5 Ontwikkelingen in anti-reflectie coatings

3.5.1 Inleiding

Alhoewel anti-reflectie coatings op glas al meer dan 30 jaar gebruikt worden, is er lange tijd slechts op beperkte schaal onderzoek gedaan naar nieuwe en/of verbeterde anti-reflectie coatings. De laatste tien jaar is daar verandering in gekomen en neemt

het aantal publicaties enorm toe. Er zijn een aantal ontwikkelingen die hier in belangrijke mate aan bijdragen. De eerste ontwikkeling hebben we al besproken in de PVD techniek paragraaf, namelijk de ontwikkeling van nieuwe sputterkathode systemen zoals de TwinMag[®] en de C-MAG[®], waardoor depositie snelheden enorm toenemen (5-10 keer een standaard DC-kathode) en de kosten aanzienlijk gereduceerd worden. De tweede ontwikkeling ligt in de ontwikkeling van nieuwe zogenaamde hybride materialen, dit zijn materialen die een gedeeltelijk anorganisch en een gedeeltelijk organisch karakter hebben. Met deze materialen is met name het coaten van polymere sheets met anti-reflectie coatings eenvoudiger. Tenslotte zijn er de laatste jaren nieuwe procesontwikkelingen in de nat-chemisch coating technologie die volledig nieuwe anti-reflectie laagconcepten mogelijk maken.

In dit hoofdstuk zal een overzicht gegeven worden van de belangrijkste ontwikkelingen, met name die waarvan productieontwikkeling al begonnen is of binnen een aantal jaren verwacht wordt.

3.5.2 Metaalnitrides

Een van de nadelen van de sol-gel techniek is het feit dat vrijwel alleen oxidische of hybride lagen gedeponeerd kunnen worden. Een enkele onderzoeksgroep doet fundamenteel onderzoek naar de depositie van metaalnitrides en/of metalen d.m.v. sol-gel depositie, maar dit is nog ver van product development en productie. PVD is uitermate geschikt voor de depositie van metaalnitrides en metalen, en met de komst van de nieuwe kathodes, waardoor ook een redelijke depositiesnelheid kan worden bereikt, kunnen er nu nieuwe anti-reflectie concepten ontwikkeld worden. Leybold beschrijft de ontwikkeling van nieuwe 3-laags concepten zoals glas/ $M_1N_x/M_2N_x/SiO_2$ waarbij M_1N_x en M_2N_x metaalnitride lagen zijn. De totale dikte van dit lagenpakket is slechts de helft van het conventionele anti-reflectie systeem, waardoor er minder kathodes en targets nodig zijn en derhalve de productiekosten verder gereduceerd kunnen worden [9]. Een nadeel van het gebruik van metaalnitride lagen is de absorptie van licht in deze lagen. Voor veel applicaties, ook architectuurglas, is dit geen belangrijk nadeel. Een bijkomend voordeel van metaalnitrides is dat ze geleidend zijn. De eerste concepten zijn dan ook gebaseerd op een combinatie van anti-reflectie, antistatisch en absorptie eigenschappen voor beeldbuizen voor Tv's. Er zijn al productiesystemen op de markt die beeldbuizen m.b.v. grote sputterlijnen semi-batchgewijs continue coaten. De firma Airco coating technology beschrijft een aantal designs voor Tv en display toepassingen [22]. Zij beschrijven een aantal designs waarbij door de keuze van het metaaloxide multilaag systemen verkregen worden met een transmissie variërend van ca. 85% tot ongeveer 30%, met in alle gevallen een reflectie onder de 0.25% in het zichtbaar licht gebied.

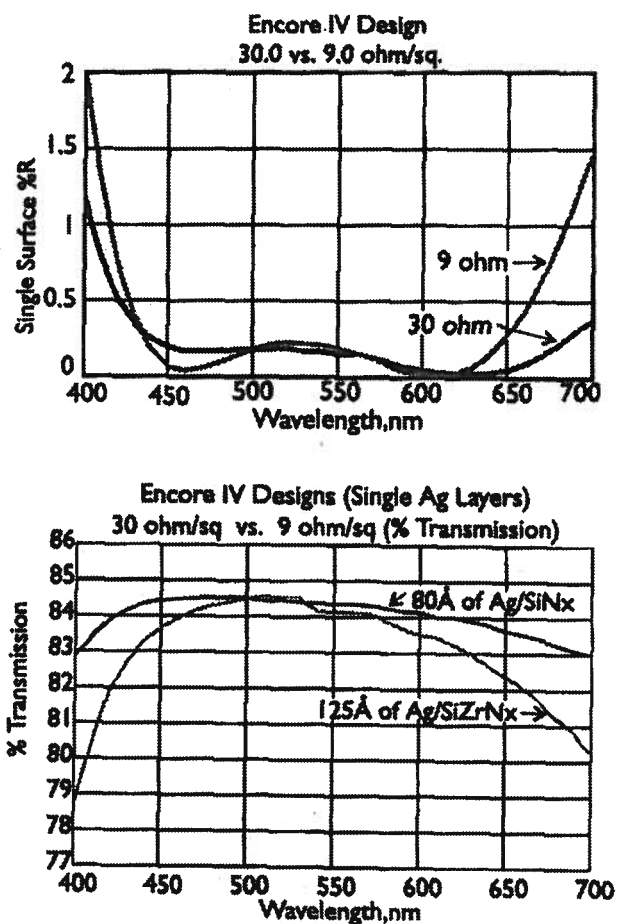
Figuur 21 toont de resultaten voor een tweetal designs waarin o.a. zilver is gebruikt [22]:

design 1, met een transmissie van ca 80% en een vierkantsweerstand van $30\Omega/\square$:

lucht	SiO ₂	SiN _x	NiCrN _x	Ag	NiCrN _x	SiN _x	glas
	57 nm	20 nm	1,6 nm	8 nm	1,2 nm	30 nm	

design 2, met een transmissie van ca 80% en een vierkantsweerstand van $9\Omega/\square$:

lucht	SiO ₂	SiZrN _x	NiCrN _x	Ag	NiCrN _x	SiZrN _x	glas
	54 nm	20 nm	1,2 nm	12,5 nm	1,2 nm	25,6 nm	



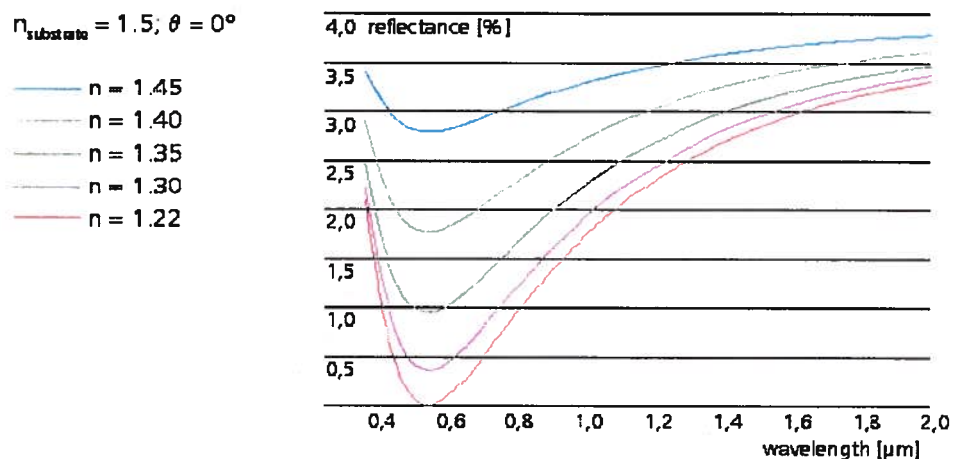
Figuur 21: Reflectie en transmissie van de twee in de tekst beschreven designs [22]

Het ligt in de lijn der verwachting dat bovenstaande concepten in de toekomst ook in vlakglas toepassingen toegepast zullen worden.

3.5.3 Poreus silica

In het hoofdstuk over de werking van anti-reflectie coatings is beschreven dat een enkellaags anti-reflectie coating (zie figuur 2) op glas een goede anti-reflectie werking kan geven als de brekingsindex van het materiaal van de coating 1,23 is. Dit is te bereiken door silica te gebruiken met een dichtheid van ca 40%. Zo'n poreuze enkellaags silica anti-reflectie coating kan geproduceerd worden vanuit colloïdale suspensies die nano-schaal (20 nm) bolvormige deeltjes van amorf silica bevatten. Omdat de nano-deeltjes niet volledig aansluitend kunnen groeperen op het oppervlak, resulteert een poreuze coating. Met een ideale stapeling van nanodeeltjes kan een dichtheid van max. 76% worden verkregen. Omdat de stapeling nooit ideaal is, resulteren deze coatings in lagen met nog lagere dichtheid (hogere porositeit), zie figuur 22.

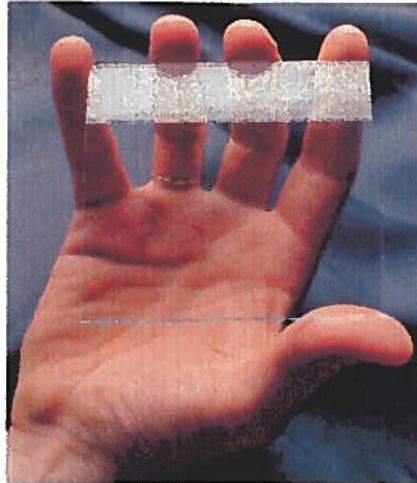
Diverse instituten doen onderzoek naar de nat-chemisch depositie van poreuze silica coatings [7, 17, 23, 24]. Figuur 3 laat resultaten zien die al in 1984 gepubliceerd zijn door Cathro et al[7]. Een van de belangrijkste redenen waarom dit type enkellaags anti-reflectie coatings nog niet in productie is komt door de slechte adhesie tussen de silica deeltjes onderling en tussen de deeltjes en het substraat. De slijtvastheid is daardoor over het algemeen slecht. De adhesie tussen de silica-deeltjes onderling en het substraat kan verbeterd worden door toevoeging van organische en/of anorganische binders. Een instituut in Frankrijk (CEA-CEL-V) beschrijft dat ze een verbetering in sterkte van de coating hebben weten te bereiken door behandeling van de coating m.b.v. ammoniak [19]. De coating is echter nog steeds niet zéér kras bestendig. Deze zelfde groep beschrijft verbeterde krasbestendigheid door applicatie van een dunne extra coating, die optisch weinig interferentie geeft maar die door zijn dichtere structuur een



Figuur 22: Anti-reflectie resultaten gebruik makend van $\frac{1}{4} \lambda$ enkellaags poreuze coatings met verschillende dichtheden [17]; bron: <http://www.ise.fhg.de/Projects/OFO/porous.html>

betere krasbestendigheid heeft. Lagen waar aan gedacht wordt zijn o.a. siliconen lagen, dichte silica lagen of dichte TiO_2 lagen. Deze groep beschrijft dat de mechanische stabiliteit toeneemt, naar niet voldoende voor langdurige toepassing in de

buitenlucht. De belangrijkste ontwikkelingen met de toepassing van poreuze enkellaags anti-reflectie coatings komt van het Fraunhofer Institute für Silicatforschung (FhG-ISE) in Würzburg. Zij produceren op lab-schaal poreuze enkellaags anti-reflectie coatings op glas op 1 m² schaal. De coatings zien er perfect uit, zeer homogeen en hebben goede anti-reflectie-eigenschappen (zie figuur 23).



Figuur 23: Glas met een poreuze sol-gel anti-reflectie coating (beneden helft) en zonder (boven helft) [17]; bron foto: <http://www.ise.fhg.de/Projects/OFO/>

Het instituut beweert lagen te produceren met goede krasbestendigheid. De wetenschappelijk wereld staat hier echter nogal sceptisch tegenover, en bij een bezoek van TNO aan dit instituut bestond de indruk uit het bestuderen van enige proefplaatjes dat de krasbestendigheid te wensen over laat. Desalniettemin blijkt uit praktijkproeven met proefstukken in de buitenlucht gedurende ca 12 maanden door het FhG-ISE dat de samples over deze periode amper veroudering laten zien en de transmissie na een jaar nog vrijwel identiek is aan de startsituatie. Het FhG-ISE is een samenwerkingsverband aangegaan met de grote glasfabrikant Pilkington in Duitsland, die bezig is om het proces op te schalen. De verwachting is dus dat dit materiaal binnen enige jaren op de markt zal komen. Of dit product dan op de markt zal komen voor buitentoepassingen blijft de vraag!!!

3.5.4 Hybride materialen

Duurzame anorganische materialen die worden toegepast in anti-reflectie coatings moeten in het algemeen bij vrij hoge temperatuur (400-500°C) gestookt worden. Voor coatings op glas is dit, afgezien van de productiekosten, geen probleem, voor alternatieve transparante vlakken zoals polymeren sheets van PMMA, Polycarbonaat etc. is dit wel degelijk een probleem. Gedreven vanuit de brillenglazen industrie, waar men op steeds toenemender schaal plastic lenzen verkoopt, wordt er veel

onderzoek gedaan naar zogenaamde hybride materialen. Dit zijn materialen die een gedeeltelijk anorganisch en gedeeltelijk organisch-polymeer karakter hebben. Deze materialen kunnen door hun gedeeltelijk polymeer karakter bij veel lagere temperaturen gestookt worden. Ook zijn alternatieve behandeling routes mogelijk zoals o.a. UV-polymerisatie of E-beam curing. De mechanische sterkte van een hybride structuur is i.h.a. lager dan die van een volledig anorganisch systeem. Echter o.a. met silica nanodeeltjes gefunctionaliseerde hybride coatings zijn harde coatings op polycarbonaat gerealiseerd. Testen bij TNO met zogenaamde taber-abraser testen, waarbij een wielje over de coating beweegt, en waarbij optisch gemeten wordt hoe groot de verruwing van het oppervlak is, is gebleken dat hardheden zo goed als glas te realiseren zijn. Een zeer belangrijke extra eigenschap van het gebruik van hybride coatings is het gemak waarmee extra functionaliteiten aan de hybride coating kunnen worden toegevoegd, zoals bijvoorbeeld een hydrofoob anti-vervuilend oppervlak etc.

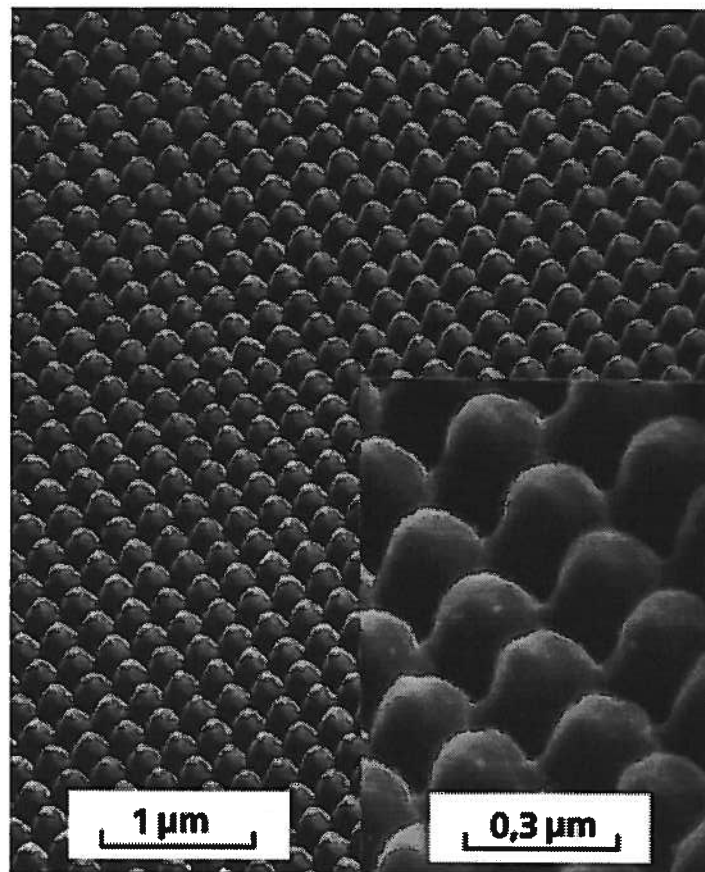
Diverse instituten en bedrijven doen onderzoek naar hybride materialen voor anti-reflectie toepassingen. Een van de voorbeelden hierbij is het al eerder beschreven onderzoek bij CEA-Cel-V [18, 19, 20, 21] waar men ook onderzoek doet naar de toepassing van hybride systemen t.b.v. het coaten van lenzen voor hoog vermogens laser toepassingen. Zij beschrijven anti-reflectie-hybride lagen met een reductie in reflectie van ca 7,5% met een zeer goede krasbestendigheid. De prijs voor de stockoplossingen zijn echter vooralsnog hoog. Dit wordt veroorzaakt door de ingewikkelde synthese routes voor de stockoplossingen. Toepassing blijft voorlopig bij de lenzen voor hoog-vermogens lasers waar prijs geen grote rol speelt en voor toepassing op plastic brillenglazen. CEA-CEL-V heeft hun technologie in licentie gegeven bij een fabrikant van brillenglazen die het product onder de handelsnaam KELAR™ als eerste commerciële anti-reflectie product gemaakt met de sol-gel techniek op de lenzen markt verkoopt[21].

Ook het Institut für Neue Materialien in Saarbrücken doet uitgebreid onderzoek, naar anorganische maar met name ook hybride anti-reflectie coatings. Zij beschrijven een krasbestendige anti-reflectie coating op plastics (PC, PMMA) vanuit UV-polymeriseerbare gefunctionaliseerde TiO_2 en SiO_2 nanodeeltjes hybride systemen die bij maximaal 80° en onder invloed van UV-licht gepolymeriseerd worden. Zij beschrijven mechanisch en chemisch stabiele systemen met een zeer lage reflectie. Echter de synthese van de hybride stock-oplossing is zeer complex, waardoor het systeem voorlopig behoorlijk duur is, en alleen interessant voor producten waar de kostprijs relatief hoog mag zijn, zoals het geval is voor plastic brillenglazen.

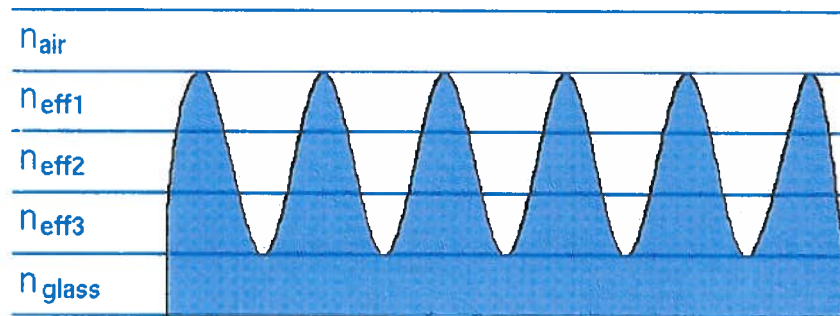
De verwachting is dat naarmate de hybride coating technologie zich verder ontwikkeld en de kostprijs voor de stock-oplossingen lager wordt, door goedkopere routes of bulk productie, dat hybride anti-reflectie coatings zeker ook voor grootschalige vlakglas toepassingen zullen worden gebruikt.

3.5.5 Periodische microstructuren

Een aantal Fraunhofer instituten in Duitsland waaronder het FhG-ISE, onderzoekt een aantal nieuwe sub-micron structuren waarmee anti-reflectie lagen te produceren zijn. Een daarvan zijn de periodische microstructuren, door FhG ook wel mot-oog ('moth-eye') structuren genoemd (zie figuur 24). Figuur 25 toont schematisch het principe achter deze structuren. In tegenstelling tot de poreuze enkellaags anti-reflectie coatings waar een refractie index van 1,23 bereikt wordt door lucht homogeen te vermengen door de hele laag heen, wordt dit hier verkregen door de speciale vorm. Het materiaal wat gebruikt wordt blijft dicht, waardoor mogelijk een grotere stabiliteit verkregen wordt.



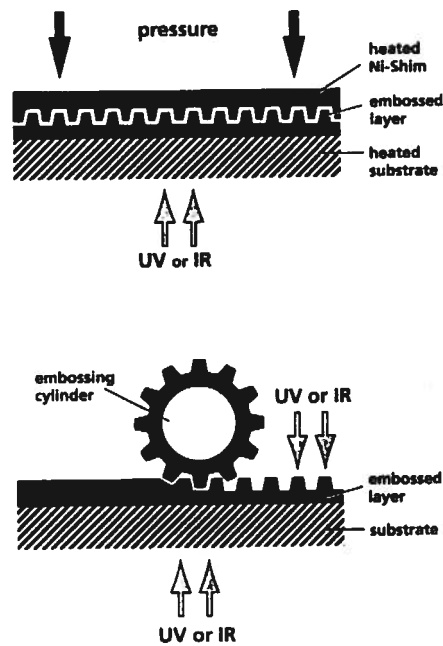
Figuur 24: Periodische microstructuren gefabriceerd m.b.v. nat-chemische depositie inOrmocer® [17]; bron foto: <http://www.ise.fhg.de/Projects/OFO/>



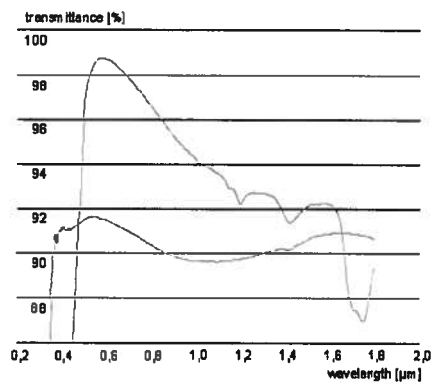
Figuur 25: Periodische microstructuren ook wel mot-oog ('Moth-eye') structuren genoemd [17]; bron: <http://www.ise.fhg.de/Projects/OFO/periodic.html>.

De techniek waarmee deze structuren vervaardigd wordt is de zogenaamde stempel ('embossing') methode, waarbij een stempelplaat of stempelrol de periodische structuur aanbrengt in een nat-chemisch aangebrachte coating die nog niet gestookt is en daardoor nog flexibel is (zie figuur 26). Overigens gebruikt het FhG-ISE hiervoor een door hetzelfde instituut ontwikkeld hybride materiaal genaamd Ormocer®. Een voordeel van deze methode is dat in principe een heel scala van materialen gebruikt kan worden, waardoor het mogelijk is, zonder afbreuk te doen aan de anti-reflectie werking om extra functionaliteit mee te geven zoals vuilafstotende, antistatische of hydrofiele eigenschappen. Figuur 27 en 28 laten optische resultaten zien van glas en PMMA platen voorzien van mot-oog structuren.

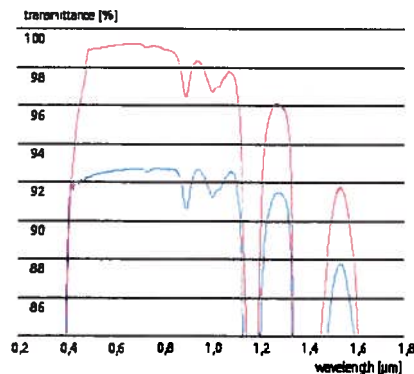
Voorlopig lijkt deze techniek nog veel te duur voor grootschalige vlakglas toepassingen. Reductie in de synthese kosten voor de stock-oplossingen de kosten voor productie van de stempels zijn nodig om het op grotere schaal toepasbaar te maken. Daarnaast zijn nog geen praktijk gegevens bekend over mechanische en chemische stabiliteit van deze structuren.



Figuur 26: Schematische weergave van de stempel methode ('embossing') [17]



Figuur 27: Transmissie door laag ijzer houdend glas, met en zonder mot-oog structuur anti-reflectie laag gemaakt d.m.v. de stempeltechniek [17];
bron: <http://www.ise.fhg.de/Projects/OFO/periodic.html>.

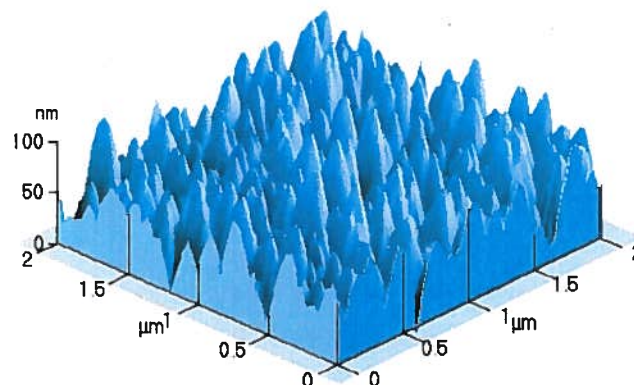


Figuur 28: Transmissie door PMMA plaat, met en zonder mot-oog structuur anti-reflectie laag gemaakt door de stempeltechniek [17]; bron: <http://www.ise.fhg.de/Projects/OFO/periodic.html>.

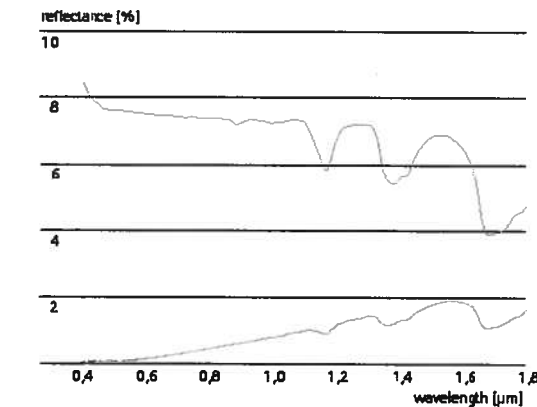
3.5.6 Stochastische microstructuren

Het nadeel van mot-oog structuren is dat dit alleen toepasbaar is voor een coating die later op het substraat wordt aangebracht. Het zou veel goedkoper zijn als deze microstructuur tijdens het productieproces van het substraat kan worden aangebracht. Daarvoor zijn echter stempels nodig die de hoge productie temperatuur (voor glas 500-700°C) kunnen weerstaan en die speciale lage adhesie eigenschappen nodig hebben om plakken te voorkomen. Met behulp van PVD processen brengt het FhG harde keramische coatings aan op staal. Deze coatings kunnen op zodanige wijze gedeponereerd worden dat de microkristallijne vorm een stochastisch gevormd oppervlak geeft (zie figuur 29). Substraten met een stochastisch oppervlak geproduceerd met deze stempels kunnen ook leiden tot zeer lage reflecties. Figuur 30 laat een van de eerste resultaten zien voor de productie van PMMA plaat met een stochastisch oppervlak.

Ook deze techniek staat nog maar in de kinderschoenen, en nog veel onderzoek is nodig om productie van grootschalige vlakglas toepassingen m.b.v. deze techniek kostenefficiënt mogelijk te maken.



Figuur 29: Stochastische microstructuur [17]; bron: http://www.ise.fhg.de/Projects/OFO/st_astic.html.



Figuur 30: Reflectie van PMMA plaat, met en zonder stochastische micro-structuur gemaakt door stempelen op het plaat oppervlak tijdens productie[17]; bron http://www.ise.fhg.de/Projects/OFO/st_astic.html.

3.6 Conclusies state-of-the-art anti-reflectie coatings

Alhoewel anti-reflectie coatings op kleinere glas en polymeer substraten zoals lenzen, spiegels en brillenglazen tegenwoordig standaard verkrijgbaar zijn, is dit zeker niet het geval voor grote glasplaat toepassingen zoals architectuur glas, zonnecel covers, displays etc. Er zijn (in Europa) slechts een paar producenten in deze markt. Voor buitentoepassingen zijn er voor zover bekend slechts twee producten, het Schott product Amiran® wat sinds ca. 10 jaar te koop is, en het Euroglas product LUXAR® wat recentelijk is geïntroduceerd. Alhoewel de prijs dalende is zijn beide producten nog steeds duur (enkelglas Amiran® kost ca 80,-- NLG/m²). Ontwikkelingen in zowel de coatingtechnologie, de materiaalontwikkeling en nieuwe anti-reflectie designs zullen er naar alle waarschijnlijkheid toe leiden dat meer anti-reflectie gecoate vlakglas en polymere plaat producten op de markt zullen verschijnen, en dat de kostprijs zal dalen. De verwachting is dat binnen 5-10 jaar anti-reflectie gecoate architectuurglas standaard zal zijn.

De belangrijkste trends in de ontwikkeling van goedkope anti-reflectie gecoate glazen en polymere plaat producten zijn:

- Het aanbrengen van gradiënt index coatings met behulp van de CVD techniek, waardoor eindelijk ook anti-reflectie coatings met een van de goedkoopste depositietechnieken voor coatings op glas kunnen worden geproduceerd. Door het gebruik van gradiënt index lagen is de laagdikte niet kritisch meer, wat een belangrijk probleem van het CVD proces is.
- De ontwikkeling van nieuwe kathode systemen voor het PVD magnetron sputter proces. Hierdoor is recentelijk het eerste PVD gecoate anti-reflectieglas (LUXAR®) op de markt kunnen komen. Verdergaande verbetering van de kathode systemen kan de kostprijs aanzienlijk verlagen.

Daarnaast zijn er nu ook nieuwe multi-laag concepten met andere materialen, zoals bijvoorbeeld metaal-nitrides mogelijk.

- De ontwikkeling van nieuwe enkellaag anti-reflectie coatings zoals de:
- Nat-chemisch aangebrachte poreuze silica lagen
- Periodische en stochastische anti-reflectie coatings c.q. substraat oppervlakken.
- Ontwikkeling van hybride materialen, waardoor anti-reflectie coatings op polymeer platen mogelijk worden en waardoor extra functionaliteiten aangebracht kunnen worden zoals bijvoorbeeld een anti-vervuilend oppervlak.

3.7 Referenties

- [1] H. A. MacLeod, 'Thin Film Optical Filters', A. Hilger, London, 1969 (1986 2e ed.), ISBN 0-85274-784-5
- [2] H.A. MacLeod, 'Understanding thin film coatings', Short course SC8b, Int. Congr. Opt. Science & Eng., Maart (1990), Den Haag, Nederland.
- [3] H.J. Frankena, C.J. van der Laan en A.A.M. Maas, 'Interferentie en dunne lagen', collegedictaat (C33c, TU-Delft).
- [4] C.J. Brinker en G.W. Sherer, 'sol-gel chemistry; The physics and chemistry of sol-gel processing.', Academic Press, San Diego (1990).
- [5] H.K. Pulker, 'Coatings on glass', Elsevier (1984), ISBN 0-444-42360-5
- [6] H. Bach and D. Krause (ed.), 'Thin films on glass', Springer-Verlag (1997), ISBN 3-540-5897-4
- [7] K. Cathro, D. Constable en T. Solaga, 'Silica low-reflection coatings for collector covers, by a dip-coating process', Solar Energy, 32 (1984) pp. 573-579.
- [8] U. Heister, J. Krempel-Hesse, J. Szczyrbowski, G. Bräuer, 'New Developments in the Field of MF-sputtering with TwinMag® to obtain higher productivity for large area coatings', Leybold systems GmbH communication.
- [9] D. Beisenherz, G. Bräuer, J. Szczyrbowski en G. Teschner, 'New production methods for anti-reflex film systems', Glass processing Days, 13-15 sept. 1997, pp. 309-311.
- [10] D.T. Moore, 'Gradient-index optics: a review', Appl. Optics, 19 (1980) pp. 1035-1038.
- [11] G.A. Neuman, 'Anti-reflective coatings by APCVD using graded index layers', J. Non-Cryst. Solids, 218 (1997) pp. 92-99.
- [12] US Patent 5,022,905, B.T. Grundy, E. Hargreaves en P.J. Whitfield, 'Method and apparatus for coating glass' (1991).
- [13] Product folder, 'AMIRAN - Het ontspiegelde etalageglas', Schott Nederland B.V.
- [14] Productdatablad, 'beglazing, glas, ontspiegeld', PDB Nr. 1580/02 (1996), Schott Nederland B.V.

- [15] S.C. Schultz, 'In-line DC sputter production of broad band anti-reflection coatings', Soc. Vac. Coaters, 35th Ann. Techn. Conf. Proc. (1992), pp. 152-157.
- [16] Product folders, 'LUXAR® - Interferenz optisch entspiegeltes Glas', EU-ROGLAS-Vertriebs-GmbH, en 'LUXAR®', Glas Trösch AG.
- [17] D. Sporn, V. Wittwer, W. Döll en K. Rose, 'Optically functional surfaces: increased transmittance in the visible and solar range', Fraunhofer ISC, jaar-rapport (1996).
- [18] H.G. Floch, P.F. Belleville, J-J. Priotton, P.M. Pegon, C.S. Dijonneau en J. Guérain, 'Sol-gel optical coatings for lasers, I', Am. Ceram. Soc. Bull., 74, 10 (1995) pp. 60-63.
- [19] H.G. Floch, P.F. Belleville, J-J. Priotton, P.M. Pegon, C.S. Dijonneau en J. Guérain, 'Sol-gel optical coatings for lasers, II', Am. Ceram. Soc. Bull., 74, 11 (1995).
- [20] H.G. Floch, P.F. Belleville, J-J. Priotton, P.M. Pegon, C.S. Dijonneau en J. Guérain, 'Sol-gel optical coatings for lasers, III', Am. Ceram. Soc. Bull., 74, 12 (1995) pp.48-54.
- [21] H.G. Floch en P.F. Belleville, 'Sol-gel laser coatings at CEA Limeil-Valenton', SPIE (1997) pp. 275-283.
- [22] J. Wolfe, 'Anti-static anti-reflection coatings using various metal layers', Soc. Vac. Coaters, 38th Ann. Techn. Conf. Proc. (1995) pp. 272-275.
- [23] L.C. Klein en M. Rozumek, 'Anti-reflective (AR) coatings using colloidal silica', preprint.

4 Slotconclusies en aanbevelingen

- Het toepassen van anti-reflectie coatings kan een duidelijke energetische meeropbrengst per vierkante meter opleveren bij zonne-energiesystemen. Vijf procent meer licht levert vier procent meer energieopbrengst bij kleine zonneboilers en vijf procent meer energieopbrengst bij PV systemen. Bij tuinbouwkassen (groenteteelt) kan er een toename van de oogstopbrengst verwacht worden van 5% bij 5% lichttoename, maar gezien de onzekerheden in de analyse is hier enige terughoudendheid op zijn plaats. Het toepassen van een low E coating bij tuinbouwglas kan echter wel een duidelijke gasbesparing opleveren.
- Gezien bovenstaande conclusie, de strengere eisen aan coatings voor tuinbouwglas (grootte oppervlak en bestendigheid tegen chemicaliën) en de huidige stand van de coating techniek is het momenteel niet zeker of er een geschikte coating ontwikkeld kan worden die geschikt is voor alle drie toepassingen.
- De grootste hindernissen voor het toepassen van anti-reflectie coatings op buitenglas zijn momenteel de kosten en de duurzaamheid. De commercieel verkrijgbare anti-reflectie coatings zijn nog een factor acht te duur. De te lichte bestendigheid tegen het buitenmilieu wordt als probleem gezien alsook de onduidelijkheid betreffende de levensduur. Kostenreductie en onderzoek aan levensduur wordt daarom als belangrijk gezien.
- Ontwikkelingen in zowel de coatingtechnologie, de materiaalontwikkeling en nieuwe anti-reflectie designs zullen er naar alle waarschijnlijkheid toe leiden dat meer anti-reflectie gecoate vlakglas en polymere plaat producten op de markt zullen verschijnen, en dat de kostprijs zal dalen. De verwachting is dat binnen 5-10 jaar anti-reflectie gecoat architectuurglas standaard zal zijn.
- Gezien de marktsituatie van tuinbouw en zonne-energietechnieken in Nederland en Europa liggen er, ook gezien de glasvraag uit de architectuurhoek, goede kansen in het marktpotentieel voor het ontwikkelen van geschikte anti-reflectie coatings. De ontwikkeling van zo'n geschikte, commercieel verkrijgbare coatings is echter sterk afhankelijk van hoe de vraag vanuit tuinbouwers en producenten van zonne-energiesystemen zich ontwikkelt en van de interesse van coaters voor deze markten.

5 Naschrift

Ten tijde van de afronding van dit rapport is een nieuw soort anti-reflectie coating op de markt verschenen van het bedrijf SunArc in Denemarken, speciaal voor glazen afdekkingen van zonnecollectoren. De coating vermindert de reflectie van 8% tot 3% en is vervaardigd met behulp van een ets-procedure, welke niet behandeld is in dit rapport. Op de volgende bladzijden worden de productspecificaties gegeven.



drs. A. Veenstra
Auteur



ing. G.A.H. van Amerongen
Afdelingshoofd Duurzame Energie en
de Gebouwde Omgeving

Delft, 21 juli 1999
VAA009.NOV (enk)

SunArc antireflection surface

The optical efficiency of solar collectors depends on the transmission of the cover glass and the absorption of the absorber surface.

Increasing the transmittance is a very efficient way of improving solar collectors since an increase of 1 % in the transmittance, yields an increase of approximately 2 % in the annual solar system performance.

SunArc AR-surface produced by an etching process of the glass shown excellent optical properties and increase the solar transmittance by 5 %.

The surface consist of a porous silica skeleton as part of the glass by etching which is about 1000 Å in thickness.

The surface has a very good proven stability confirmed in tests by independent laboratories. Samples have been exposed to outdoor environmental weathering for seven years and have maintained the optical properties with non or very little signs of physical or chemical degradation. Since the ***SunArc AR-surface*** is a part of the glass by it self, it has very good mechanical properties. Other type of AR-coatings who deposit materials on the glass surface by some deposition process i.e. dip-coating, gives a low adhesion between the glass and the film, which partly can be improved by high temperature treatment but then at the cost of poorer optical performance.

The ***SunArc AR-surface*** can be applied on tempered or not tempered glass and no heat-treatment is required either before or after the etching

The SunArc production is designed with the latest up-dated technology in order to obtain minimal handling, high quality and consistent properties.

Maximum production capacity is at present 600.000 m² per year but can with minor implements be increased to 1,000,000 m² per year.

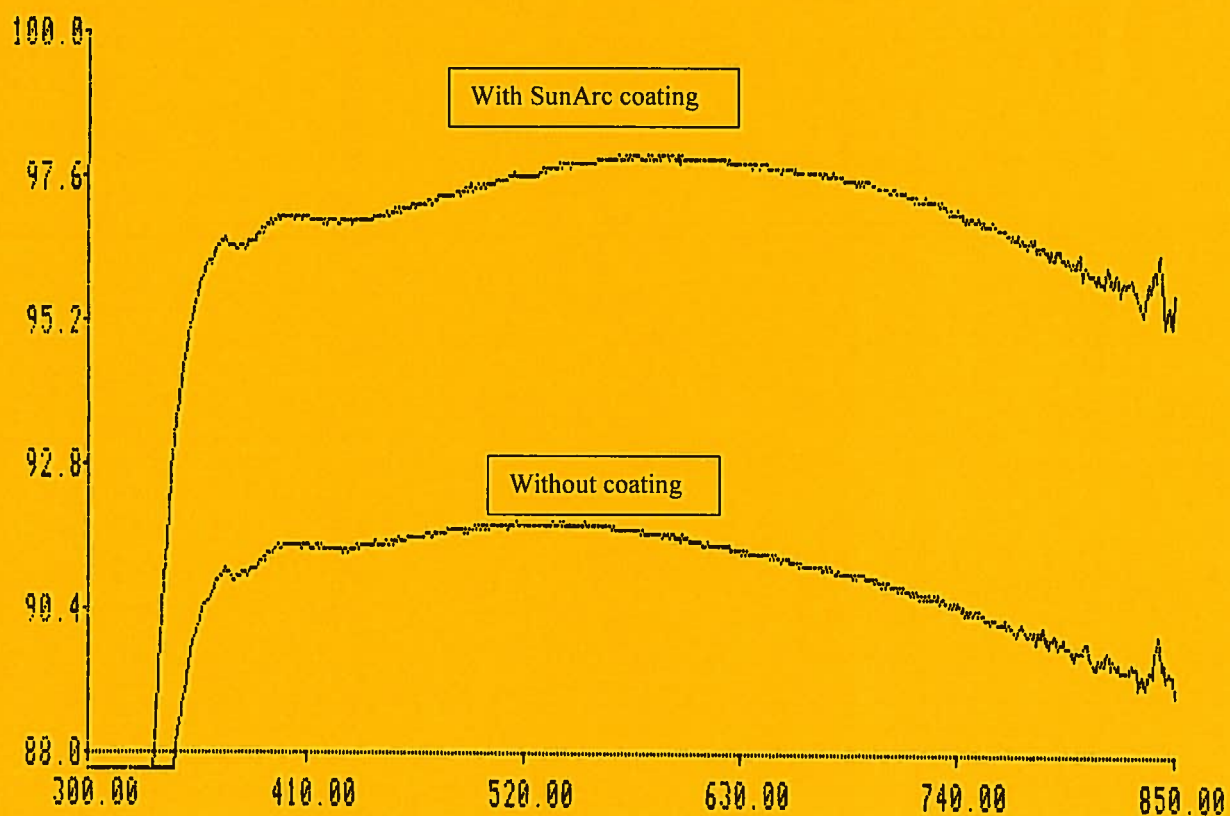
The chemical systems are in a closed loop and no waste, harmful to the environment, arrives outside the etching line. The only thing leaving SunArc's waste treatment system is clean water re-used in the production again and harmless calcium and silicon minerals, normally occurring widely in the earth's crust.

Sunarc A/S
Grønlandsvej 14
DK-4681 Herfølge
Denmark

Phone +45 56 21 30 00
Fax +45 56 21 33 00

SAINT - GOBAIN DIAMANT, 4 MM

PERKIN-ELMER LAMBDA 15 UV/VIS SPECTROPHOTOMETER



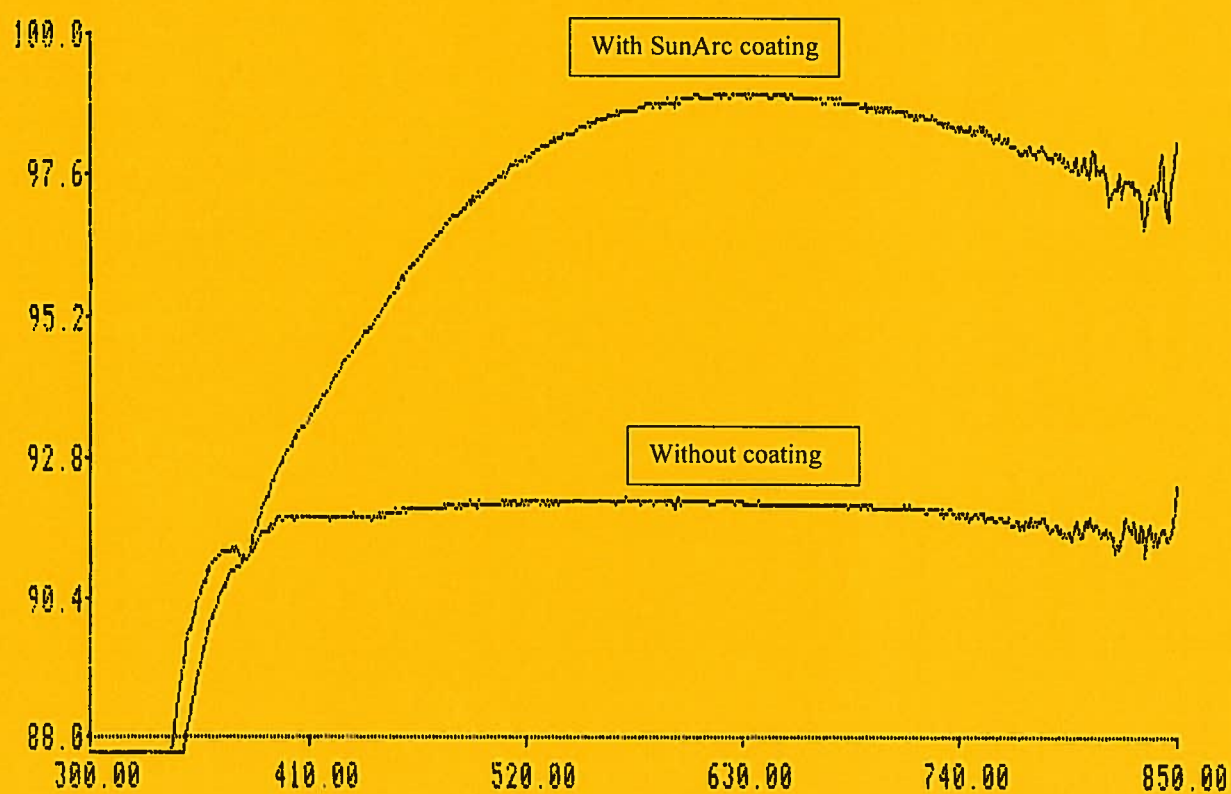
Sunarc A/S
Grønlandsvej 14
DK-4681 Herfølge
Denmark

Phone +45 56 21 30 00

Fax +45 56 21 33 00

GLASS TUBE FOR EVACUATED COLLECTOR

PERKIN-ELMER LAMBDA 15 UV/VIS SPECTROPHOTOMETER



Sunarc A/S
Grønlandsvej 14
DK-4681 Herfølge
Denmark

Phone +45 56 21 30 00
Fax +45 56 21 33 00



Transmittance Test Report

SunArc Antireflection Surface

Performed at

Technical University of Denmark

Department of Building and Energy

Sunarc A/S
Grønlandsvej 14
DK-4681 Herfølge
Denmark

Phone +45 56 21 30 00
Fax +45 56 21 33 00



The spectral transmittances of two glass samples have been measured over the spectral range of 300-2500 nm in a double beam UV-VIS-NIR spectrophotometer. The measurements have been performed without the use of an integrating sphere in this way assuming that only negligible scattering/diffusion of the transmitted light takes place. Prior to each measurement the samples have been cleaned in demineralized water and alcohol.

Both samples are made from the same 3.85 mm thick low iron glass substrate but one sample has a Sunarc anti reflection surface.

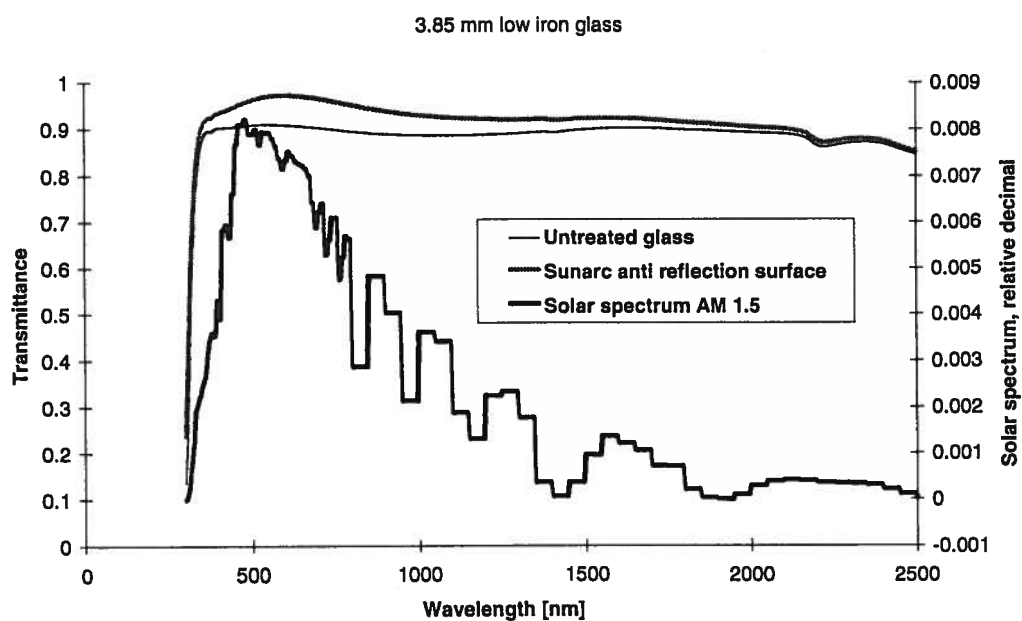
From the measured spectral transmittances the integrated direct solar transmittances over the wavelength range of 300-2500 nm of the two samples have been calculated using the solar spectrum in ISO 9845 Air Mass 1.5 Global and using a wavelength step of 5 nm. Furthermore the transmittances in the wavelength range of 300-1150 nm have been calculated. The resulting transmittances are shown below:

Wavelength range	Untreated glass	Sunarc anti reflection surface
300-2500	89.7	94.4
300-1150	89.8	95.1
[nm]	[%]	[%]

19. FEBRUAR 1999

JNR. 1000

In the two figures below the spectral transmittances of the two samples have been showed. In the first figure is included the relative spectral distribution of the solar spectrum.



IBE
DEPARTMENT OF
BUILDINGS AND ENERGY

19. FEBRUAR 1999

JNR. 1000

