



## Schlussbericht

---

# ARdust

Untersuchungen und Entwicklung von Testverfahren zur Qualitäts- und Langzeitstabilitätsprüfung von beschichteten Oberflächen





**Datum:** 12.04.2019

**Ort:** Rapperswil

**Auftraggeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Industrielle Solarenergienutzung  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)  
[energieforschung@bfe.admin.ch](mailto:energieforschung@bfe.admin.ch)

**Auftragnehmer/in:**

SPF Institut für Solartechnik  
Hochschule für Technik Rapperswil  
Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil  
[www.spf.ch](http://www.spf.ch)

**Autor/in:**

Mercedes Rittmann-Frank, SPF Institut für Solartechnik, [mh.rittmann-frank@spf.ch](mailto:mh.rittmann-frank@spf.ch)  
Stefan Brunold, SPF Institut für Solartechnik, [stefan.brunold@spf.ch](mailto:stefan.brunold@spf.ch)  
Florian Ruesch, SPF Institut für Solartechnik, [florian.ruesch@spf.ch](mailto:florian.ruesch@spf.ch)

**BFE-Bereichsleitung:** Stefan Oberholzer, [stefan.oberholzer@bfe.ch](mailto:stefan.oberholzer@bfe.ch)

**BFE-Programmleitung:** Stefan Oberholzer, [stefan.oberholzer@bfe.ch](mailto:stefan.oberholzer@bfe.ch)

**BFE-Vertragsnummer:** SI/501525-01

**Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.**



## Zusammenfassung

Da die Lebensdauer von Solarkollektoren inzwischen auf 20-30 Jahre garantiert wird, sollten auch die Beschichtungen diese Lebensdauer aufweisen und ihre optischen Eigenschaften sowie die schmutzabweisende Wirkung über diese Zeit beibehalten. Durch die Vielfalt der Kompositionen der Beschichtungen mit verschiedenen Substraten sowie deren unterschiedlichen Einsatzgebieten (Kollektoren, PV-Module, Gewächshäuser, Fassaden) und ausgesetzten Umwelteinflüssen, fehlt es an standardisierten Testverfahren zur Qualitäts- und Langzeitbeständigkeitsprüfung. Im ARdust Projekt sollen die Grundlagen für standardisierte Testverfahren zur Qualitäts- und Langzeitbeständigkeit der AR und Anti-Soiling beschichteten Gläser und Kunststoffe erarbeitet werden.

## Résumé

La durée de vie des capteurs solaires étant de nos jours garantie sur 20 à 30 ans, les revêtements antireflet (AR) et anti-salissures doivent également conserver leurs propriétés optiques et leur effet anti-salissures pendant cette période. En raison de la diversité des compositions des revêtements comportant différents substrats, des différents domaines d'application (capteurs, modules PV, serres, façades) ainsi que de la diversité des influences environnementales auxquelles sont exposés les vitrages, il n'existe pas de procédures d'essai standard pour les essais de qualité et de durabilité à long terme. Dans le cadre du projet ARdust, la base des procédures d'essai normalisées pour la qualité et la durabilité à long terme des verres et des plastiques recouverts d'un revêtement antireflec et d'un revêtement anti-salissures sera élaborée.

## Summary

The service life of solar collectors is now guaranteed to be 20-30 years, thus the anti-reflex (AR) and anti-soiling coatings should also retain their optical properties and dirt-repellent effect over this period. Due to the variety of compositions of the coatings with different substrates as well as their different areas of application (collectors, PV modules, greenhouses, facades) and exposition to various environmental influences, there is a lack of standard test procedures for quality and long-term durability testing. In the ARdust project, the basis for standardized test procedures for the quality and long-term durability of AR and anti-soiling coated glasses and plastics will be developed.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Résumé</b> .....	<b>3</b>
<b>Summary</b> .....	<b>3</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>6</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>7</b>
<b>2 Ausgangslage</b> .....	<b>7</b>
2.1 Hintergrund .....	7
2.2 Ziele der Arbeit .....	8
<b>3 Vorgehen und Methode</b> .....	<b>8</b>
3.1 Untersuchung von wetterexponierten Proben (AP1).....	8
3.2 Studie zur Verschmutzung von Oberflächen für den Einsatz in der Solartechnik (AP2) .....	8
3.3 Aufbau eines Abrasionstests (AP3).....	10
3.4 Aufbau eines Messgerätes für die Spekulare Reflexionsmessung (AP4).....	10
<b>4 Resultate</b> .....	<b>10</b>
4.1 Untersuchung von wetterexponierten Proben (AP1).....	10
4.2 Studie zur Verschmutzung von Oberflächen für den Einsatz in der Solartechnik (AP2) .....	15
4.2.1 Verschmutzungsarten.....	15
16	
4.2.2 Verschmutzungsmechanismen .....	18
4.2.3 Komponenten- und Systemeigenschaften .....	20
4.2.4 Reinigungsmethoden (Mitigation) .....	22
4.2.4 Standard Testverfahren.....	25
4.3 Aufbau eines Abrasionstests (AP3).....	28
4.4 Aufbau eines Messgerätes für die Spekulare Reflexionsmessung (AP4).....	30
<b>5 Diskussion der Ergebnisse</b> .....	<b>37</b>
5.1 Untersuchung von wetterexponierten Proben (AP1).....	37
5.1.1 Standortabhängigkeit.....	37
5.1.2 Glas mit AR Beschichtung.....	37
5.1.3 Spektrale Analyse.....	38
5.2 Studie zur Verschmutzung von Oberflächen für den Einsatz in der Solartechnik (AP2) .....	38
5.3 Aufbau eines Abrasionstests (AP3).....	39
5.4 Aufbau eines Messgerätes für die Spekulare Reflexionsmessung (AP4).....	41
<b>6 Schlussfolgerungen und Ausblick</b> .....	<b>42</b>
6.1 Untersuchung von wetterexponierten Proben (AP1).....	42



6.2	Studie zur Verschmutzung von Oberflächen.....	42
6.3	Aufbau eines Abrasionstests (AP3).....	43
6.4	Aufbau eines Messgerätes für die Spekulare Reflexionsmessung (AP4).....	43
7	<b>Referenzen</b> .....	<b>44</b>

## Abkürzungsverzeichnis

AR	Anti-Reflex
BSDF	Bi-Directional Scattering Distribution Function
CSP, CST	Concentrating Solar Power, Thermal
PV	Photovoltaik
ST	Solarthermie
PC	performance criterion
$\alpha_s, \varepsilon$	solarer Absorptionsgrad, thermischer Emissionsgrad
$\rho_h, \rho_s$	hemisphärischer bzw. spekularer (gerichteter) Reflexionsgrad
I	Intensität
$\lambda$	Wellenlänge
$\Theta$	Einfallswinkel
$\varphi$	(halber) Divergenzwinkel, Streuwinkel, Akzeptanzwinkel
M	Abbildungsmaßstab



# 1 Einleitung

Der Wirkungsgrad von Solaranlagen (d.h. Photovoltaik, Solarthermische Kollektoren, konzentrierende Kollektoren, Concentrating Solar Thermal CST / Concentrating Solar Power CSP) beschreibt, wieviel der auftreffenden Sonneneinstrahlung in nutzbarer Energie umgewandelt wird. Für eine Maximierung des Wirkungsgrades müssen insbesondere optische Verluste minimiert werden. Um den optischen Wirkungsgrad, d.h. eine Vergrößerung des Anteils der Sonneneinstrahlung der vom Absorber aufgenommen wird, zu erhöhen, wird der Transmissionsgrad der transparenten Abdeckung vor dem Absorber, der Absorptionsgrad des Absorbers und, bei konzentrierenden Kollektoren, der Reflexionsgrad der Spiegel/Reflektoren durch geeignete Beschichtungen optimiert.

Antireflexbeschichtungen (AR) minimieren hierbei die Reflektion an der Oberfläche von transparenten Materialien und erhöhen damit den Anteil an transmittierter Solarstrahlung. AR beschichtete Gläser und Kunststoffe werden daher neben Ihrer Verwendung in Solarkollektoren unter anderem auch in Gebäuden (Fassaden, Fenster) sowie in Gewächshäusern eingesetzt.

Um eine optimale Leistung der Solarkollektoren zu gewährleisten, die permanent unterschiedlichsten Witterungsbedingungen sowie Umwelt-Chemikalien (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, Salz) und Schmutzpartikeln ausgesetzt sind, sollten diese frei von Verschmutzung gehalten werden. Abhängig von der geographischen Lage und der klimatischen Bedingung ist ein regelmässiges Reinigen der optischen Komponenten notwendig. Beispielsweise müssen bei Solarwärmekraftwerken (CSP/CST) in sonnenreichen, ariden Regionen die Spiegel der konzentrierenden Kollektoren und die Receiver-Rohre regelmässig gereinigt werden, um ihre hohe Effizienz zu gewährleisten. Dies führt zu erhöhten finanziellen Ausgaben sowie einem hohen Wasserverbrauch, was besonders in wasserarmen Regionen problematisch ist. Um innovative Lösungen gegen Verschmutzung, insbesondere für Kollektortechnologien im mittleren- bis höheren Temperaturbereich im CSP, zu finden, wurden in den letzten Jahren mehrere Projekte gefördert, die die weltweite Bedeutung dieser Thematik hervorheben. Beispielsweise geht es im EU Horizon2020 RAISELIFE um die Verlängerung der Lebensdauer von CSP Materialien, u.a. durch Weiterentwicklung von Anti-Reflex Beschichtungen. Horizon2020 WASCOP thematisiert die Reduzierung des Wasserverbrauchs für CSP Anlagen. Dabei spielt die Vorhersage zum erwarteten Verschmutzungsgrad eine wichtige Rolle.

Die Verschmutzung von Solarkollektorflächen hat neben den klimatischen Bedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Sonneneinstrahlung) den grössten Einfluss auf die Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Komponenten und Systemen. Obwohl die Forschung und Entwicklung sich mit der Thematik der Verschmutzung seit Jahrzehnten befasst, müssen noch viele Mechanismen verstanden und Probleme gelöst werden.

## 2 Ausgangslage

### 2.1 Hintergrund

Da die Lebensdauer von Solarkollektoren inzwischen für 20-30 Jahre garantiert wird, sollte auch die dort eingesetzten Beschichtungen diese Lebensdauer aufweisen und ihre optischen Eigenschaften sowie die schmutzabweisende Wirkung über diese Zeit beibehalten. Durch die Vielfalt der Kompositionen der Beschichtungen mit verschiedenen Substraten sowie deren unterschiedlichen Einsatzgebieten (Kollektoren, PV-Module, Gewächshäuser, Fassaden) fehlt es an standardisierten Testverfahren zur Qualitäts- und Langzeitbeständigkeitsprüfung. Dass jedoch ein Bedarf für diese Art von Test besteht, um beispielsweise die Lebensdauer von solaren Anlagen und eine hohe Leistung zu garantieren, wird unter anderem in der Zielsetzung der SolarPACES Task III deutlich.



Für konzentrierende Solaranwendungen (CST, CSP) ist vor allem der „nicht gestreute“ (genau genommen „in einen wohl definierten kleinen Raumwinkel oder Akzeptanzwinkel gestreute“), spekulare Anteil der reflektierten Solarstrahlung die massgebende Messgrösse für die Qualität von Reflektoren. Streulichtmessungen werden mit der am SPF vorhandenen „Imaging Sphere“ mit Leuchtdichtekamera durchgeführt. Für nicht oder nur niedrig-konzentrierende Anwendungen sind diese Messungen aussagekräftig. Für räumlich hochauflösende Messungen der spekularen Reflexion, wie diese für hoch konzentrierende Anwendungen benötigt werden, wird, basierend auf der vorhandenen Infrastruktur, ein neues Messkonzept ausgearbeitet.

## 2.2 Ziele der Arbeit

Ziel dieses Projektes ist es zum einen, sich mit den Folgen von Verschmutzung, Umwelteinflüssen sowie die damit einhergehenden regelmässigen Reinigungsarbeiten auf die beschichteten Oberflächen und auf ihre Lebensdauer und Leistung intensiv zu befassen. Des Weiteren sollen Grundlagen für standardisierte Testverfahren zur Qualitäts- und Langzeitbeständigkeit der AR und Anti-Soiling für beschichteten Gläser und Kunststoffe ausgearbeitet werden. Dafür werden unterschiedliche Proben (mit und ohne Beschichtung), die teilweise jahrelanger Witterung oder beschleunigter Alterung ausgesetzt werden, in umfangreichen Messungen untersucht.

# 3 Vorgehen und Methode

## 3.1 Untersuchung von wetterexponierten Proben (AP1)

Zunächst werden beschichtete Gläser und Kunststoffe untersucht, die, montiert auf sogenannten Mini-Kollektoren [1] auf Freibewitterungsständen des SPF in Rapperswil und in Davos über einen Zeitraum von inzwischen 7 Jahren den Umwelteinflüssen ausgesetzt waren. Die Proben weisen unterschiedliche Beschichtungen auf, wie AR Beschichtung, Anti-soiling Beschichtung oder, im Fall von Kunststoffen, Wetterbeständigkeitsbeschichtung. Diese werden mit jüngeren exponierten Proben und mit den Messungen an identischen, nicht exponierten Proben verglichen. Um die beschichteten Proben auf ihre Qualität und Beständigkeit zu untersuchen, nutzen wir spektrale direkt-hemisphärischen Transmissions- und Reflexionsmessungen. Ergänzend werden Messungen zur Lichtstreuung durchgeführt. Diese dienen zur Charakterisierung der Verschmutzung (z.B. Partikel-grösse) und sind auch insbesondere zur Bestimmung des Einflusses der Verschmutzung von Reflektoren auf die Effizienz von CSP und CST Anlagen massgebend. Die Ergebnisse werden im PVPS Task 16 definierten Arbeitspaket „Ground based methods - spectral and soiling“ präsentiert.

## 3.2 Studie zur Verschmutzung von Oberflächen für den Einsatz in der Solartechnik (AP2)

Für die Studie wird eine Literaturrecherche zur Verschmutzung von Solarkollektoren und -modulen, konzentrierenden Solarsystemen und Messgeräten durchgeführt. In all diesen Systemen werden beschichtete Oberflächen verwendet, die einer Verschmutzung ausgesetzt sind. Das Thema Verschmutzung ist im Bereich der Photovoltaik von besonderem Interesse, wie die Abbildung 3.1 dargestellt. Der grösste Teil der Forschung wurde in südlichen, ariden Gebieten (z.B. MENA-Region) durchgeführt und nur wenige Studien (etwa 10) betrachten mitteleuropäische Regionen. Der Grund für die Häufung von Forschungsarbeiten liegt in dem großen Potenzial der Solarenergie in diesen sonnenreichen Regionen, wo jedoch die Verunreinigung durch Sand und Staub und die damit verbundenen Reinigungsarbeiten und Wasserknappheit einen grossen Einfluss auf die energetische,

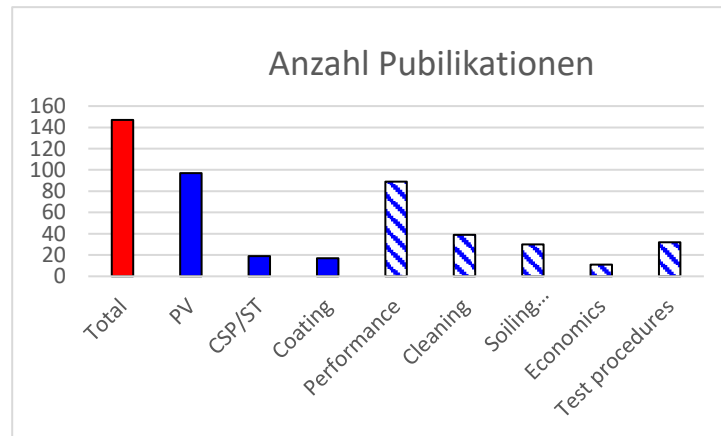


Abbildung 3.1 Anzahl der Publikationen aus [40], die sich mit Verschmutzungen von Solarsystemen 2012-2015 beschäftigen, unterteilt nach Solarsystem und Forschungsbereich.

wirtschaftliche und ökologische Bilanzierung der Solarenergie hat. Dennoch spielt die Solarenergie auch als Energiequelle im mitteleuropäischen Raum eine wichtige Rolle und detaillierte Studien über Verschmutzung in den Industrieländern sind notwendig, um standardisierte Prüfverfahren für verschiedene, standortabhängige Verschmutzungsarten zu entwickeln, um eine bessere Aussage über die Lebensdauer der exponierten, beschichteten Oberflächen treffen zu können.

Die Literaturrecherche zeigt, wie komplex das Phänomen der Verschmutzung ist und von vielen beeinflussbaren (Orientierung, Neigung der Kollektoren usw.) und unbeeinflussbaren (Umwelteinflüsse) Faktoren abhängt. Die Leistungsminderung durch Verschmutzung wird in PV-Modulen mit 4% bis 80% angegeben [2] [3] [4] [5] [6]. Die grosse Verteilung der Angaben spiegelt die hohe Komplexität und Abhängigkeit von mehreren Faktoren des Themas wider. Abbildung 3.2 gibt einen Überblick über die in dieser Studie berücksichtigten Verschmutzungsfaktoren.

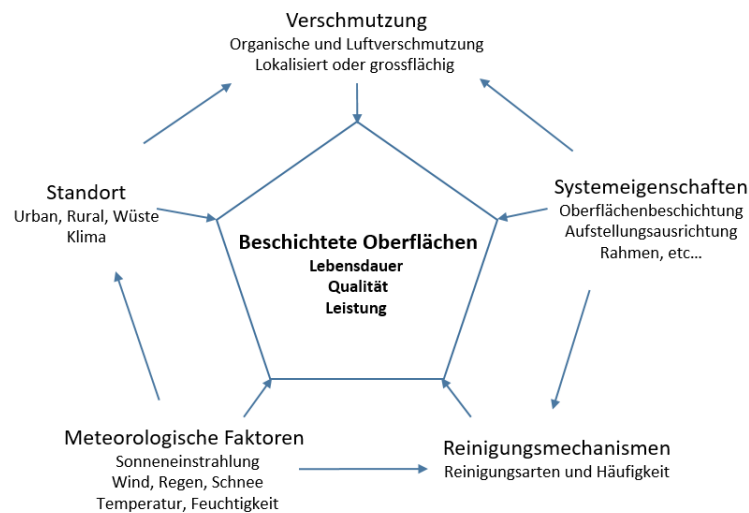


Abbildung 3.1 Übersicht über die unterschiedlichen Faktoren und ihre Abhängigkeiten, die die Lebensdauer von Beschichtungen beeinflussen.



### 3.3 Aufbau eines Abrasionstests (AP3)

Die mechanische Beständigkeit und Haftfestigkeit der Beschichtungen soll mittels eines Abrasionstests nach IEC NP 62862-3-3 geprüft werden. Dabei wird ein definierter Gummi mit einem definierten Druck trocken über die Probe gerieben. Nach einer vorbestimmten Anzahl von Zyklen wird die Probe auf die Änderung ihrer optischen Eigenschaften untersucht. Diese Untersuchungen sollen Aufschluss über die tolerierbare Anzahl von Zyklen (und angewendeten Druck) geben, um mit Hilfe dieses Testverfahrens aussagekräftige Schlüsse über die Qualität und Robustheit der beschichtenden Proben gegenüber Reinigungszyklen ziehen zu können. Hierfür wird ein provisorischer Testaufbau weiterentwickelt, welcher im Rahmen des EU Projektes FRESH NRG aufgebaut wurde.

### 3.4 Aufbau eines Messgerätes für die Spekulare Reflexionsmessung (AP4)

Die am SPF vorhandene Infrastruktur zur Streulichtmessung (BSDF), bestehend aus einer „Imaging Sphere“ mit Leuchtdichtekamera, ist für nahezu spekulare reflektierende Oberflächen nur bedingt einsetzbar, da die räumliche Auflösung, wie diese in den SolarPACES „Official Reflectance Guide-lines“ vorgegeben ist, nicht mit genügend hoher Genauigkeit erreicht wird. Es wird daher, aufbauend auf der vorhandenen Messtechnik, ein neuartiges Messkonzept ausgearbeitet und aufgebaut. Dieses beruht auf dem Ansatz, dass das von der Leuchtdichtekamera erfasste Abbild das Ergebnis einer Faltung der Leuchtdichteverteilung der Lichtquelle mit der (Mess-)Gerätefunktion und der Streufunktion der reflektierenden Probenoberfläche ist. Ist (durch eine Referenzmessung ohne Probe) die Faltung der Leuchtdichteverteilung der Lichtquelle mit der Gerätefunktion bekannt, kann die Streufunktion der Probe durch eine Entfaltung ermittelt werden.

Messungen zur Lichtstreuung an Proben, sowohl in Reflexions- als auch in Transmissionsgeometrie, können Rückschlüsse auf die Art der Verschmutzung zulassen. Darüber hinaus ist der „nicht gestreute“ (genau genommen „in einen wohl definierten kleinen Raumwinkel (Akzeptanzwinkel) gestreute“) spekulare Anteil der reflektierten Solarstrahlung die massgebende Messgrösse für die Qualität von Reflektoren in CSP und CST Anwendungen.

## 4 Resultate

### 4.1 Untersuchung von wetterexponierten Proben (AP1)

Wie schon in einer früher durchgeführten Freibewitterungsstudie [1] zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Standorten. In Rapperswil (urbaner Standort in der Nähe des Bahnhofes) verschmutzen die Proben stärker als am Standort Davos (alpin, rural). Dieser Effekt ist bei den AR-beschichteten Gläsern sehr deutlich und es treten nach sieben Jahren Transmissionseinbussen von 10-15% auf (siehe Abbildung 4.1.1). Auch nach einer Reinigung mit milder Seife bleibt meist eine Transmissionseinbusse bestehen. Diese fällt allerdings mit 1-6% deutlich geringer aus. Die guten Resultate in Davos (folgender Abschnitt) lassen vermuten, dass es sich bei den verbleibenden Transmissionseinbussen um hartnäckige Verschmutzung handelt. Eine regelmässige Reinigung könnte also bei Solaranlagen mit ähnlichen Standorten eine deutliche Effizienzsteigerung bringen und ist aufgrund dieser Resultate im Intervall von wenigen Jahren zu empfehlen. Auch Gläser, deren Schicht als „Anti-soiling“ beschrieben wurde, heben sich hier nicht eindeutig von den anderen Gläsern ab.

Am alpinen Standort Davos sind die Transmissionseinbussen der Gläser hingegen im gereinigten und im ungereinigten Zustand marginal. Bei einigen Proben hat sich die Transmission gegenüber der nicht exponierten Referenz gar leicht verbessert (siehe Abb. 4.1.2). Das gute Abschneiden aller AR beschichteten Gläser in Davos zeigt, dass die eingesetzten Schichten grundsätzlich stabil sind und durch Wettereinflüsse wie Regen/Feuchte, Schnee, Einstrahlung und Temperaturwechsel nur wenig



oder gar nicht degradieren. Die Resultate von Rapperswil zeigen aber eine starke Tendenz zur Verschmutzung.

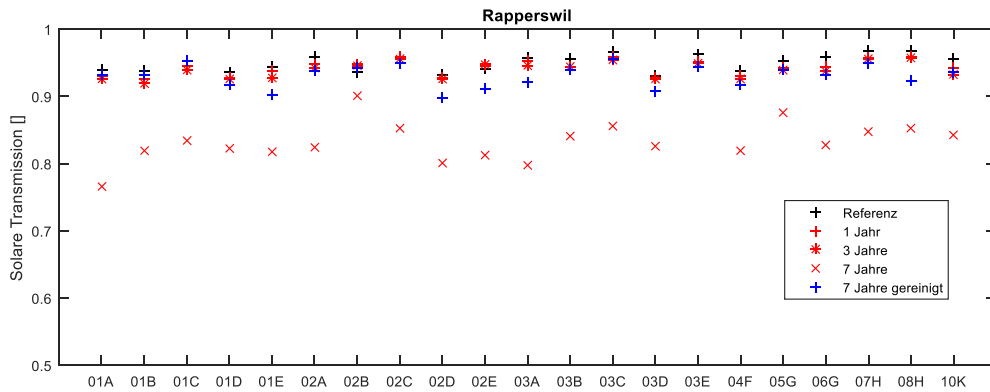


Abbildung 4.1.1 Solare Transmission der in Rapperswil exponierten Gläser.

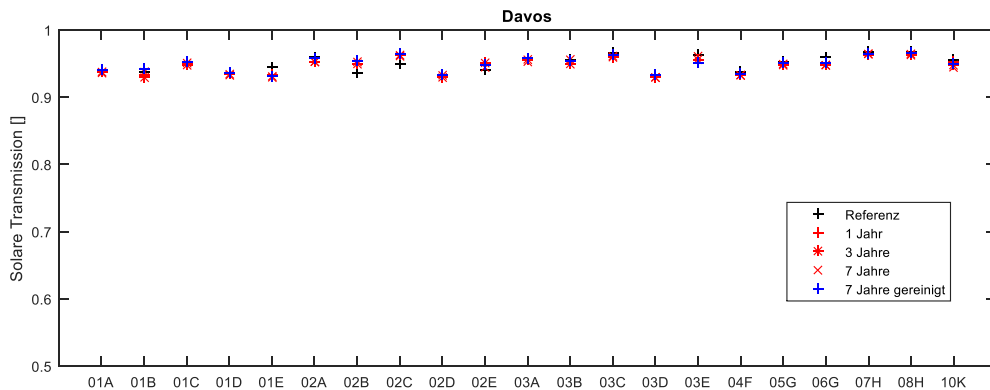


Abbildung 4.1.2 Solare Transmission der in Davos exponierten Gläser

Die Standortabhängigkeit ist bei den untersuchten PC Proben weniger ausgeprägt. Es zeigt sich aber eine Unterschied zwischen den beiden Basismaterialien (siehe Abb.4.1.3). Beim Material 09 besteht nach der Reinigung bei beiden eingesetzten UV-Schutz Schichten (I&J) eine Transmissionseinbusse von einigen Prozent, dies auch am Standort Davos. Das zweite Basismaterial (11) wurde mit drei verschiedenen Schichten untersucht. Bei diesem Material liess sich, unabhängig von Schicht und Standort, die ursprüngliche Transmission durch eine Reinigung wieder annähernd herstellen.

Bei einer spektralen Analyse ist ein deutlicher Transmissionsabfall im kurzwelligen Bereich erkennbar (siehe Abb.4.1.4 für das Glas 01A als Beispiel). Dieser Effekt ist bei allen untersuchten Proben in ähnlicher Form, aber unterschiedlicher Ausprägung, sichtbar und konnte auch schon bei der vorangegangenen Studie beobachtet werden. Analog zu dieser Studie wurde auch hier versucht, zwischen Verschmutzung und Degradation zu unterscheiden. Dabei wird der mit milder Seife entfernbare Anteil als „Verschmutzung“ und die verbleibende Transmissionseinbusse als „Degradation“ klassifiziert. Die „Degradation“ beinhaltet also auch Transmissionseinbussen durch Verschmutzung, welche sich durch Reinigung mit weichem Schwamm und milder Seife nicht entfernen lässt.

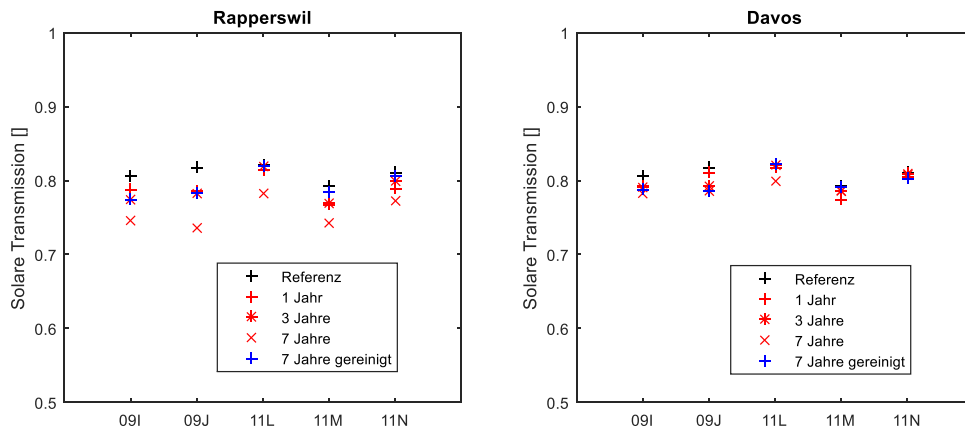


Abbildung 4.1.3 Solare Transmission der in a) Rapperswil und b) Davos exponierten PC Proben

Diese Unterscheidung wird in Abb. 4.1.5 wiederum am Beispiel 01A mittels Differenzspektren dargestellt. Im Falle von „Verschmutzung“ mittels Differenz der spektralen Transmission der Probe vor und nach Reinigung, im Falle von „Degradation“ mittels der Differenz von gereinigter Probe und nicht exponierter Referenz. Dabei kann bei beiden Standorten eine starke Transmissionseinbusse durch „Degradation“ unterhalb von 500 nm ausgemacht werden. Diese geht zumindest in Davos mit einem Transmissionsgewinn (negative Transmissionseinbussen) einher (siehe Abb. 4.1.5).

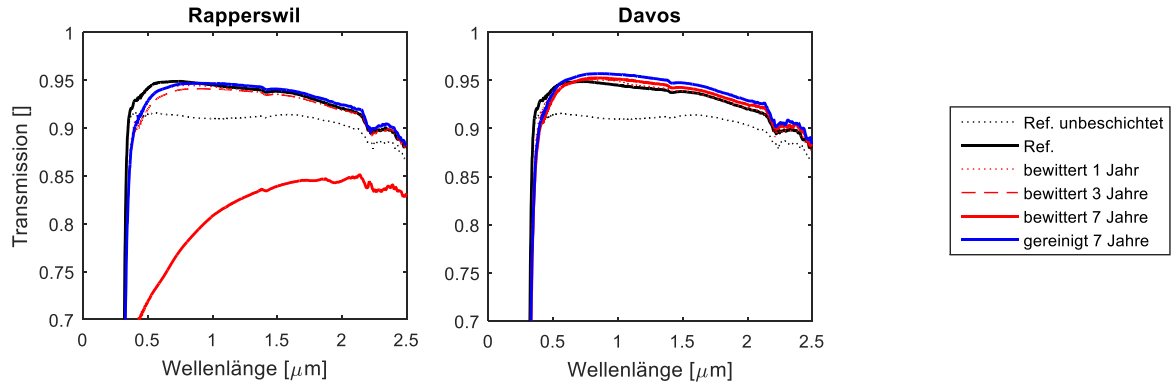


Abbildung 4.1.4 Transmissionsspektren der unterschiedlich exponierten Proben am Beispiel Glas 01A

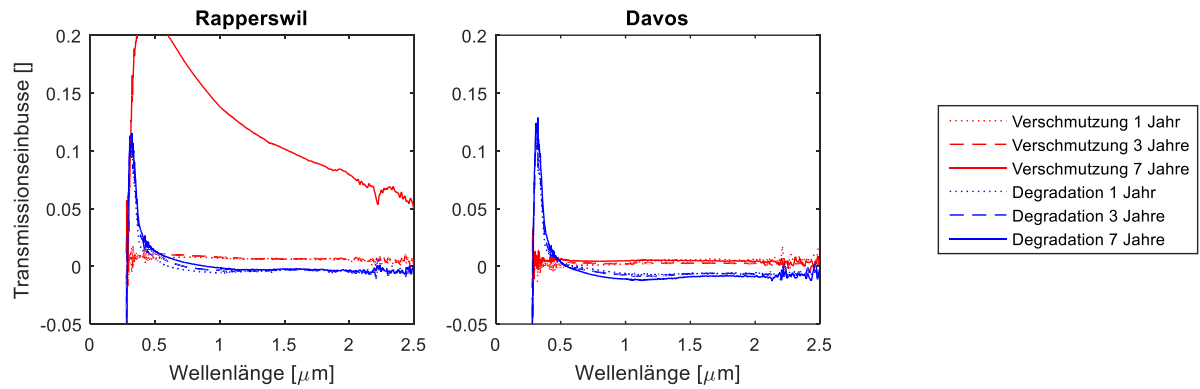


Abbildung 4.1.5 Transmissionseinbusse aufgrund von Verschmutzung und Degradation am Beispiel Glas 01A

Um auszuschliessen, dass es sich bei der Tendenz zum Transmissionsrückgang im kurzwelligen und Transmissionszunahme im langwelligen Bereich um einen Effekt der Messtechnik handelt, wurden einige Referenzproben (während sieben Jahren in einer geschützten Umgebung gelagert) nachgemessen. Dabei ist tendenziell auch eine Transmissionsabnahme im kurzwelligen Bereich auszumachen (siehe Abbildung), der Effekt ist aber deutlich weniger stark als bei den exponierten Proben.

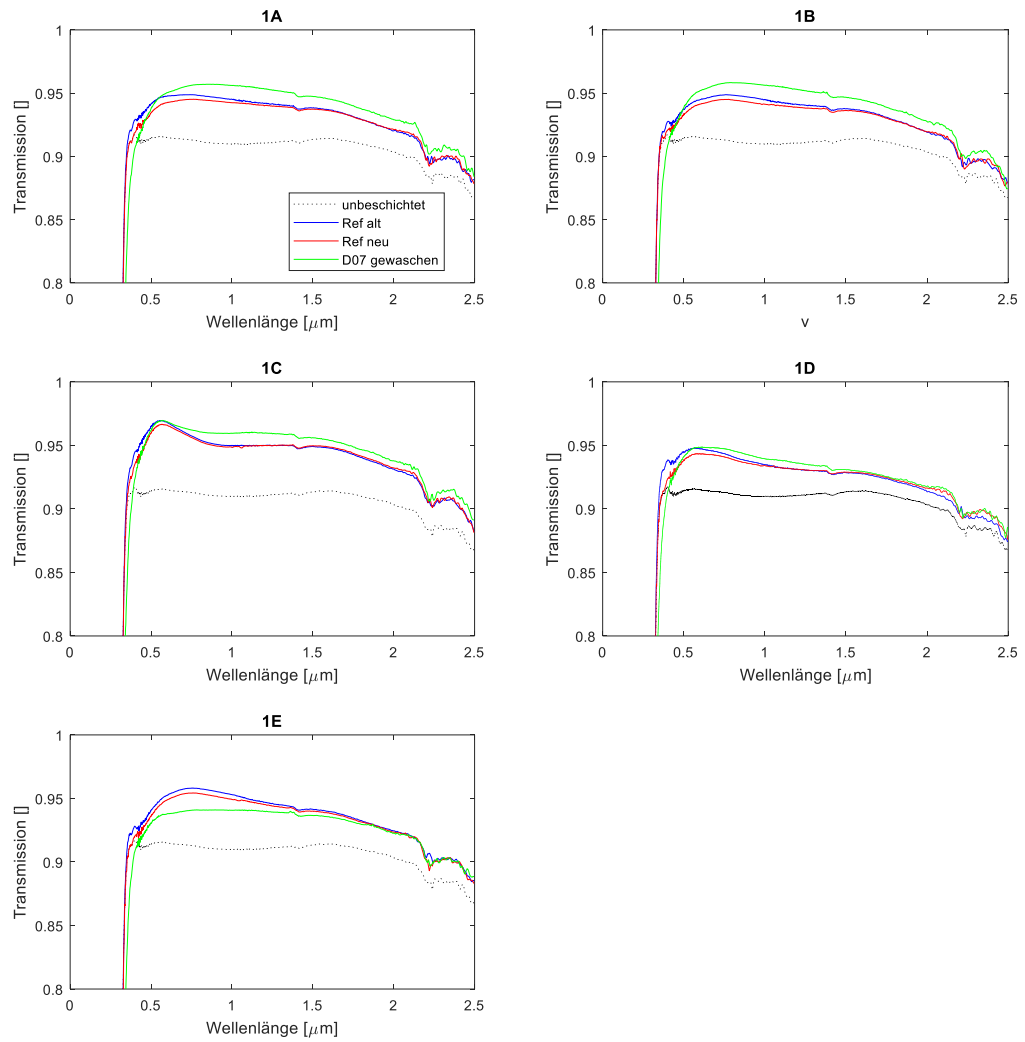


Abbildung 4.1.6 Nachmessung der Referenzspektren nach sieben Jahren im Vergleich zu den in Davos exponierten und gereinigten Proben.



## 4.2 Studie zur Verschmutzung von Oberflächen für den Einsatz in der Solartechnik (AP2)

### 4.2.1 Verschmutzungsarten

Wetterexponierte Oberflächen sind natürlichen und umweltbedingten Verschmutzungen ausgesetzt, die von Ort zu Ort weltweit sehr unterschiedlich sein können. In Wüstenregionen ist Sand die grösste Ursache für Verschmutzung der Komponenten solarer Energiesysteme, während in mitteleuropäischen Regionen Sand eher eine untergeordnete Rolle spielt. In Tabelle 1 wird eine Übersicht über die wichtigsten Verschmutzungsursachen und deren Vorkommnis dargestellt. Die Verschmutzungsarten können auch nach Abschattierungsgrad unterschieden werden [7]. Verschmutzungen durch bspw. Vogelkot, Blätter, u.ä. führen zur starken Abschattung des darunterliegenden PV Moduls oder Kollektors. Leichte Abschattierungen werden durch dünne Schichten Staub, Pollen und Ähnlichem verursacht. Besonders bei PV Modulen können bereits Teilverschattungen zu nennenswerten Verlusten des gesamten Moduls führen<sup>1</sup>.

Tabelle 1 Übersicht der Verschmutzungsarten von beschichteten Oberflächen

Verschmutzungsart	Ursache	Vorkommnis	Abschattung
Feinstaub, Aerosole	Abgase Autos, Dieselverbrennung, Industrie, Bauarbeiten	Urban	leicht, ganzflächig
Feinstaub	Futtermittel, Viehzucht, Landwirtschaft	Rural	leicht, ganzflächig
Moss, Algen, Flechten, Pilze	Ständige Feuchtigkeit, Landwirtschaft	Urban, Rural	stark, punktuell, meist am Rahmen
Pollen, Blütenstaub	Flora	Rural, Urban	leicht, ganzflächig
Blätter, Vogelkot	Flora, Fauna	Rural, Urban	stark, meist punktuell
Wasserablagerungen	Regen, Nebel, Schnee, Reinigung	Rural, Urban	ganzflächig

#### Feinstaub, Aerosole:

Die städtische Luftverschmutzung wird hauptsächlich durch grosse (<50µm) und kleine (<10µm) Kohlenstoffpartikel verursacht. Diese führen hauptsächlich durch Streuung an den Partikeln zu Transmissionsverlusten. Nur 0,2% Abdeckung einer weißen Fläche reichen aus, um die Kontamination mit dem Auge zu erkennen [8]. Je nach Standort unterscheidet sich die Zusammensetzung von den Aerosolen, die auch Erdenelemente enthalten, z.B. Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> usw. Die Aerosole enthalten auch aggressive Substanzen wie SO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub> die zu atmosphärischer Korrosion der Oberfläche führen können [8].

Basierend auf einem Bericht des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL) über die Luftqualität in der Schweiz können lokale Überschreitungen der Emissionsgrenzwerte für Schadstoffe wie Ozon, Partikel und Stickstoffdioxid auftreten, siehe Abbildung 4.2.1. Ozon ist eines der stärksten Oxidationsmittel, das nicht nur gegenüber organischem Gewebe, sondern auch gegenüber anderen Materialien hochaggressiv ist. Ebenso wichtig ist Stickstoffdioxid, das sehr korrosiv ist und Materialien angreifen kann. In Abbildung 4.2.1 a) werden die Tagesmittelwerte des Standorts Sion Flughafen als Beispiel für einen Standort betrachtet, an dem die Grenzwerte für Ozon und Stickstoffdioxid überschritten werden. Die Werte auf dem Jungfrauoch liegen dagegen unter den Emissionsgrenzwerten. Die unterschiedlichen Werte der Luftverschmutzung haben einen grossen

<sup>1</sup> Leichte und starke Abschattung ist ein Begriff aus dem Englischen „soft and hard shading“



Einfluss auf die Lebensdauer und das Reinigungsverhalten die Reinigung der Solarkollektoren, PV-Module u.ä. an diesen Standorten.

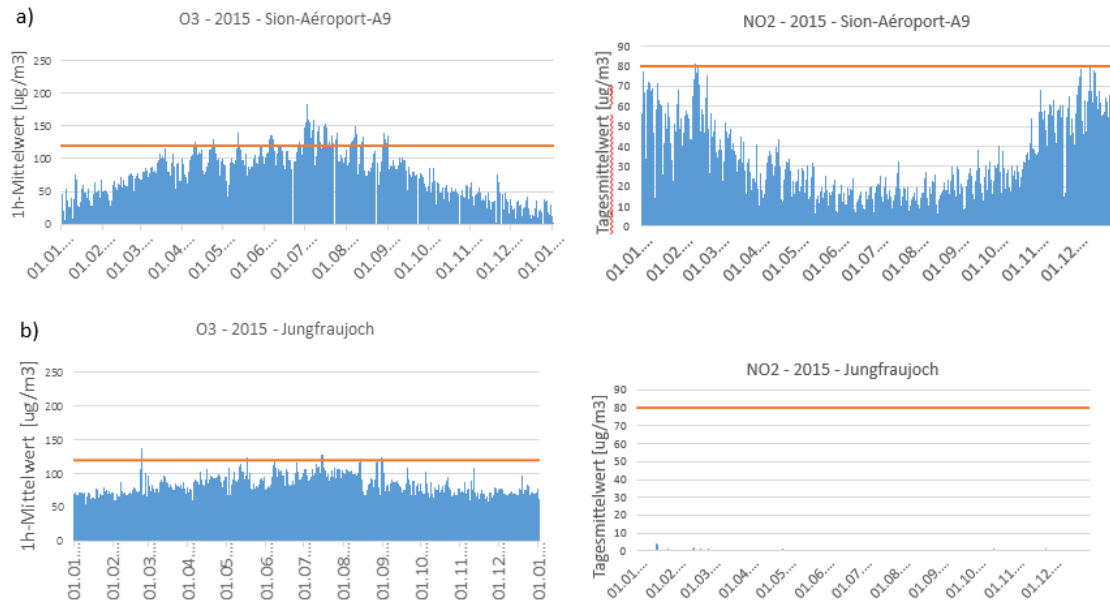


Abbildung 4.2.1 Darstellung des Tagesmittelwerte für Ozon O<sub>3</sub> und Stickstoffdioxid NO<sub>2</sub> an den Standorten a) Sion Flughafen und b) Junfraujoch. Die Daten stammen aus [33]

Auf dem Land besteht der Feinstaub aus Staubpartikeln von Futtermitteln, feinen Sandpartikel, Ernterückstände, organischen Verbindungen (z.B. Fette) und auch Russ (Kohlenstoffpartikel). In der Tierhaltung wird viel Ammoniak freigesetzt, wie z.B. durch Ausdunsten verursacht durch Schweinen, Kühen oder Geflügel. Ammoniak verbindet sich mit dem Staub in der Luft und setzt sich als dicker, fester Film auf den Solarmodulen ab, der den vorbeifliegenden Staub buchstäblich anzieht.

### Sand, Staub

Sand (150 bis 850µm) in ariden Gegenden ist einer der grössten Verursacher von Alterung und Schäden in Solarsystemen. Sandstürme können die Oberfläche von PV Modulen, Solarkollektoren und Spiegel beschädigen. Staub (<150µm) hingegen hat eine weniger abrasive Wirkung jedoch verringert dieser die Leistung der Solarsysteme und muss durch regelmässige Reinigungsvorgänge beseitigt werden. In mitteleuropäischen Regionen spielt diese Verschmutzungsart eher eine untergeordnete Rolle und wird in dieser Studie nicht im Detail betrachtet.



Abbildung 4.2.2 Pilzwachstum auf der Oberfläche von PV Modulen [34]

### **Moos, Algen, Pilze**

Das Wachstum von Moos, Algen, Flechten und Pilzen wird durch feuchte und warme Umgebungsbedingungen begünstigt und kann die Solarkollektoren und Module beschädigen. Das Pflanzenwachstum kann zu Rahmenschäden, Delamination, Glaskorrosion und Undichtigkeiten führen [9].

### **Pollen, Blütenstaub**

Pollen sind saisonale Verschmutzungen, die oft eine klebrige Oberfläche hinterlassen, die zum einen mehr Verschmutzungspartikel anzieht und sich zum anderen nicht durch Regen reinigen lässt. Durch die ganzflächige Verschmutzung wird die Transmission reduziert.

### **Blätter, Vogelkot**

Verschmutzung durch Blätter und Laub führen zwar zur starken Verschattung des Moduls oder Kollektors, werden aber durch Wind wieder entfernt und sind somit nur ein kurzfristiges Problem. Vogelkot hingegen ist etwas hartnäckiger und kann nur manchmal vollständig vom Regen entfernt werden, betrifft aber meist nur kleine, lokale Flächen, wie in Abbildung gezeigt.

### **Wasserablagerung**



Abbildung 4.2.3 PV Module durch Vogelkot verschmutzt. Quelle [35]

Obwohl Regen-, Schnee-, Taubildungs- und Reinigungsprozesse in den meisten Fällen Schmutz von den Oberflächen von Sonnenkollektoren und Modulen entfernen, können sie in einigen Fällen



Ablagerungen hinterlassen, die eine starke Verschmutzung der Oberflächen begünstigen. Es wurde festgestellt, dass leichter Regen feinen Staub aus der Atmosphäre auswaschen und auf der Oberfläche zurücklässt. Schnee reinigt auch nur eine Oberfläche, wenn sie sich ansammelt und als Paket von der Oberfläche gleitet. Wenn er jedoch schmilzt, hinterlässt er die Schmutzpartikel, die vom Schnee gelöst und auf die Oberfläche getragen wurden. Taubildung wirkt ebenfalls eher verschmutzend, da die Wassertropfen die Schmutzpartikel benetzen und diese dann während der Verdunstung an die Oberfläche kleben. Es kann sich dadurch eine feste Verkrustung bilden, auf der sich immer mehr Schmutzpartikel ablagern können [10].

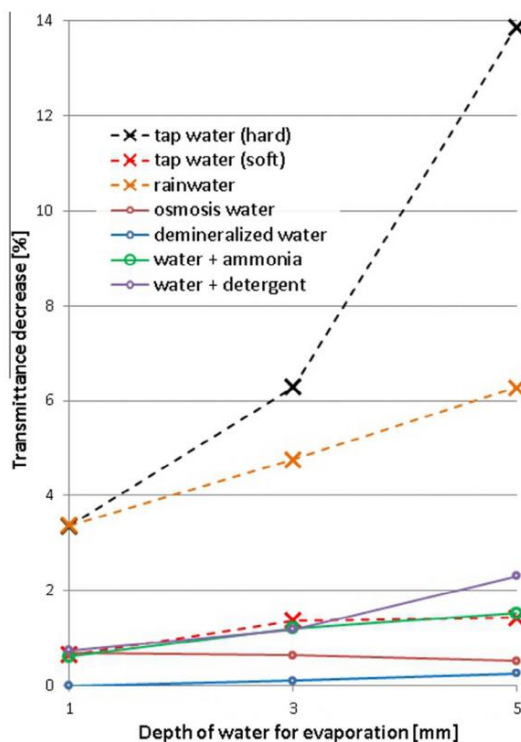


Abbildung 4.2.4 Abnahme der Transmission durch Wasserablagerung nach Verdunsten [16]

Auch bei der gezielten Reinigung von Oberflächen können, statt Schmutzpartikel zu entfernen, Ablagerungen und Verschmutzungen der Oberflächen durch ungeeignete Reinigungsmittel und Reinigungswasser auftreten. Die Ablagerungen nach der Reinigung resultieren aus der chemischen Zusammensetzung der Flüssigkeit und ihrer direkten Wirkung auf die Glasoberfläche. Während der Reinigung neigen einige Tropfen der Reinigungsflüssigkeit dazu, am Solarglas und dessen Beschichtung zu haften, was dazu führen kann, dass der Staub sich setzt und am Glas haftet. Abhängig von der Dicke dieser Beschichtung nimmt die Transmission durch das Glas ab. Das Wasser sollte so kalkarm wie möglich sein, damit es keine Kalkablagerungen hinterlässt, die die Transmission (oder Reflexion bei Spiegeln) Sonne beeinträchtigen, wie in Abbildung 4.2.4 für verschiedene Wasserproben dargestellt.

#### 4.2.2 Verschmutzungsmechanismen

Die Art und Weise, wie die Schmutzpartikel auf der Oberfläche haften, hängt von der Art der Beschaffenheit der Oberfläche und den Eigenschaften (Grösse, Form, Komponenten) der Schmutzpartikel ab. Schmutzpartikel werden durch folgende Mechanismen gesammelt:

- Schwerkraft wirkt hauptsächlich auf grössere Partikel  $>10\mu$



- Adhäsion durch elektrostatische Anziehung. Geladene Teilchen können sich auf gegenpolig geladenen Oberflächen festsetzen oder mit anderen Schmutzpartikeln zu grösseren Partikeln wachsen und sich auf die Oberflächen festsetzen. Durch Van der Waals Kräfte können auch in ungeladenen Partikel Dipole induziert werden.
- Erhöhung der Oberflächenenergie (und dadurch erhöhte Anziehung für Schmutzpartikel) durch Wetter Exposition (UV-Strahlung, Regen). Z.B. durchläuft eine wetterexponierte Silikonschicht (soft silicone elastomers) die UV und Regen ausgesetzt ist, durch die Strahlung eine langsame Photo-oxidation, die die Oberfläche polarer macht [11].
- Zementation: Während der Kondensation kommt es zu Prozessen, die die Partikeladhäsion deutlich erhöhen. Die Zementation kommt zur Stande durch Auflösung (bspw. in Tautropfen) und anschließende Abscheidung (precipitation) von Schmutzpartikel auf einer Oberfläche. Wie stark die Zementation ist hängt von der Zusammensetzung der Schmutzpartikel ab, der Verdampfungsrate, der Partikelgrößenverteilung und der Oberflächenenergie (Hydrophobie) des Glases ab [10].
- Manche Partikel haben grössere Bindungsenergie als andere (organisch < inorganisch bei gleicher Grösse)

Zusammenfassend kann man die Ablagerung von Schmutz grundsätzlich auf zwei Arten klassifizieren: physikalisch und chemisch gebundene Schmutzpartikel.

Physikalisch gebundene Partikel sind durch physikalische Wechselwirkungen und Verkanten an Unebenheiten oder Mikrorissen an den Oberflächen lose gebundene Teilchen. Diese Teilchen können vom Wind oder Regen, oder künstlich erzeugten Quellen mit moderaten Energiekräften, wie fließendes Wasser aus einem Schlauch, verdrängt werden.

Chemisch gebundene Partikel hingegen gehen starke Wechselwirkungen mit der Oberfläche ein. Die Entfernung dieser Partikel erfordert in der Regel die Verwendung von Hochdruckwasser, manuelles Schrubben oder die Anwendung von aggressiven Lösungsmitteln, Tensiden oder Seifen. Chemisch gebundene Partikel können teilweise fest in der Oberfläche integriert werden, z.B. bei Korrosion durch SO<sub>x</sub> und langfristige Schäden verursachen.

Die Verschmutzung einer Oberfläche besteht meistens aus der Kombination von physikalisch und chemisch gebundenen Partikeln, die zu drei Verschmutzungsschichten führen können, wie in Abbildung dargestellt [12]. Es ist jedoch zu beachten, dass dies ein vereinfachtes Model ist, da der Verschmutzungsprozess durchaus komplizierter ist und eine eindeutige Schichtzuweisung teilweise nicht möglich ist.

Schicht A ist mit der Oberfläche direkt im Kontakt und kann nicht durch Regen, normal Reinigung usw. entfernt werden (bspw. Korrosion). Der Schmutz kann hier nur durch Abrasion oder aggressive Substanzen entfernt werden.

Schicht B kann nur mechanisch gereinigt werden, aber nicht durch Wind oder Regen (z.B. Pollenschicht, Vogelkot).



Schicht C besteht aus lose gebundenen Schmutzpartikeln und kann durch Wind und Regen gereinigt werden

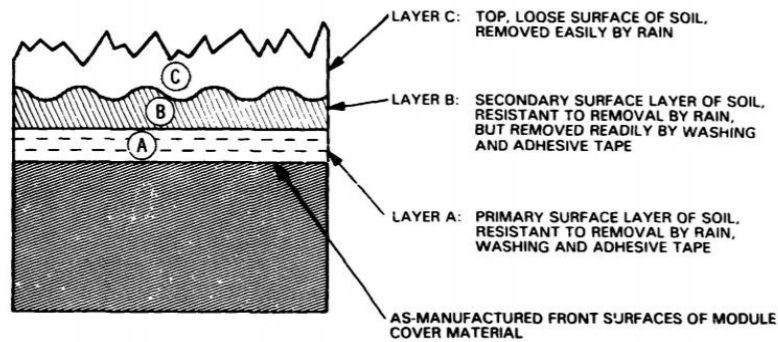


Figure 1. The Three Soiling Layers

Abbildung 4.2.5 Darstellung der unterschiedlichen Verschmutzungsschichten nach Cuddihy [12]

Es ist nicht notwendig, dass eine verschmutzte Oberfläche aus allen drei Schichten besteht, Kombinationen zwischen A, C und B, C sowie C alleine sind möglich

#### 4.2.3 Komponenten- und Systemeigenschaften

Dieser Abschnitt befasst sich mit den Komponenten- und Installationseigenschaften von Solarsystemen (PV Module, Solarkollektoren, CSP oder CPV oder Messinstrumente), die den Verschmutzungsgrad und die eventuell dadurch bedingte Alterung ihrer Komponenten beeinflussen.

#### Beschichtete Oberflächen

Um Leistungsverluste durch Verschmutzung zu minimieren und die natürliche Reinigung durch Wind, Regen und Schnee zu unterstützen, können Oberflächen mit Anti-soiling-Schichten beschichtet werden. In Abbildung 4.2.6 werden Transmissionsmessungen von Proben mit und ohne Beschichtung dargestellt. Aus den Grafiken wird deutlich, wie die Beschichtung den natürlichen Reinigungsprozess durch Regen oder Nebel fördert im Vergleich zu der nicht beschichteten Probe, bei der die Verschmutzung trotz Nebel und Regen nicht vollständig beseitigt wird (orange Linie). Neben einer hohen Transmission und Verschmutzungsresistenz muss die Beschichtung auch mechanisch robust sein, d.h.

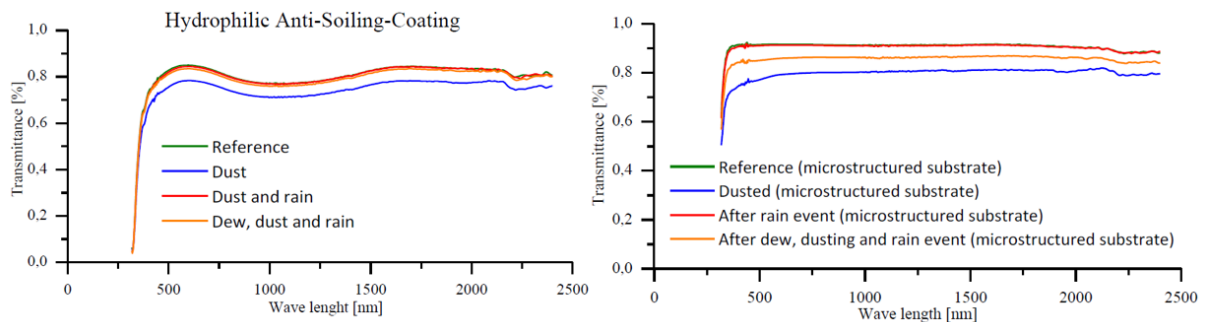


Abbildung 4.2.6 Transmissionsmessungen von Proben mit (links) und ohne (rechts) anti-soiling Beschichtung [14]



abrasionsresistent und hart/stark genug um den Aufprall von Objekten, wie Hagel, Sand, Blätter, Äste und ähnliches auszuhalten [13].

Die Anti-soiling Schicht basiert entweder auf hydrophoben oder hydrophilen Eigenschaften, die jeweils wasserabweisend oder wasseranziehend sind. Hydrophobe Beschichtungen haben eine geringe Oberflächenenergie und einen Kontaktwinkel über  $120^\circ$  zwischen den Oberflächen und Wasser, was für eine gute Reinigungswirkung geeignet ist. Materialien für hydrophobe Beschichtungen sind hauptsächlich Fluorpolymere.

Hydrophile Beschichtungen haben hohe Oberflächenenergien, die zu einem Wasserfilm führen mit niedrigen Kontaktwinkeln ( $<10^\circ$ ) zwischen Oberfläche und Wasser. Der Partikeltransport von der Oberfläche ist unter bestimmten Oberflächenneigungen gewährleistet. Materialien für solche Beschichtungen sind Siliziumoxide ( $\text{SiO}_x$ ) und Titanoxide ( $\text{TiO}_x$ ). Diese Materialien haben zusätzlich eine photokatalytische Funktionalität, die in der Lage ist, organische Materie unter Sonneneinstrahlung direkt zu zersetzen [14]

AR Schichten haben keinen direkten Einfluss auf die Verschmutzungsgrad der Oberflächen.

### Aufstellwinkel und Ausrichtung von Solarmodulen und Kollektoren

Der Aufstellwinkel eines Solarpanels hat eine Auswirkung auf den Verschmutzungsgrad. Bedingt durch die Schwerkraft wird eine horizontale Fläche mehr Staub ansammeln als eine geneigte [15]. Der optimale Neigungswinkel liegt bei etwa  $35^\circ$  in Belgien [16]. Abbildung 4.2.7 zeigt deutlich die Abnahme in Transmission in Abhängigkeit vom Neigungswinkel und Verschmutzung. Hierfür wurden Glasproben bei verschiedenen Neigungswinkeln Verschmutzung und Regen über mehrere Tage

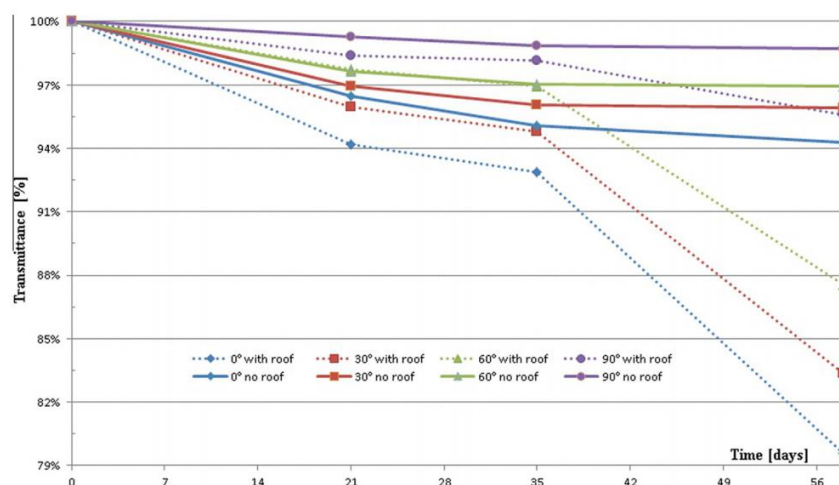


Abbildung 4.2.7 Transmissionsabnahme durch Verschmutzung in Abhängigkeit des Neigungswinkels eines PV Moduls. Grafik aus [16]

exponiert. Die gestrichelten Linien repräsentieren Glasproben die vom Regen durch ein Dach geschützt wurden und nur der Verschmutzung ausgesetzt waren. Der Einfluss von Niederschlägen auf den Transmissionsgrad ist sehr deutlich beim Vergleich der Proben mit und ohne Dach. Die Verschmutzung setzt sich fort, wenn die Glasproben nicht durch den Regen gereinigt werden kann, was zu einer anhaltenden Verringerung der Transmission führt. Die auffällige Verringerung der Transmission zwischen 35 und 58 Tagen wird durch die hohe Konzentration von Pollen (ca.  $60\mu\text{m}$  gross) in der Luft verursacht.

Die Ansammlung von Schmutz oder Staub ist auch abhängig von den vorherrschenden Windbewegungen. Im Allgemeinen fördert ein langsames Windmuster die Staubablagerung während ein Hochgeschwindigkeits-Windregime die Fläche reinigen würde. Somit kann die Geometrie der



Solarsysteme in Bezug auf die Richtung der Windbewegungen die Staubansammlung entweder erhöhen oder verringern [17]. Die Verbreitung von Staub und Schmutz durch die Windbewegungen und Geometrie der Solaranlage hängt von der Eigenschaft vom Staub ab (Gewicht, Grösse, Art) und kann je nach Standort unterschiedlich sein.

#### **Aussenrahmen von Solarmodulen und Kollektoren**

Der Rahmen eines Moduls oder Kollektors hat einen grossen Einfluss auf die Verteilung von Staub (oder anderen Partikeln) auf dem PV-Modul oder Kollektor. Meistens finden an den Kanten des Rahmens stärkere Turbulenzen als in der Mitte des Moduls statt. Des Weiteren wird die Oberseite des Moduls durch den Regen eher gereinigt als die Unterseite, da dort das Regenwasser (oder Reinigungswasser) sich am Rahmen ansammeln kann. Wieviel Wasser sich hier ansammelt ist wiederum vom Neigungswinkel abhängig.

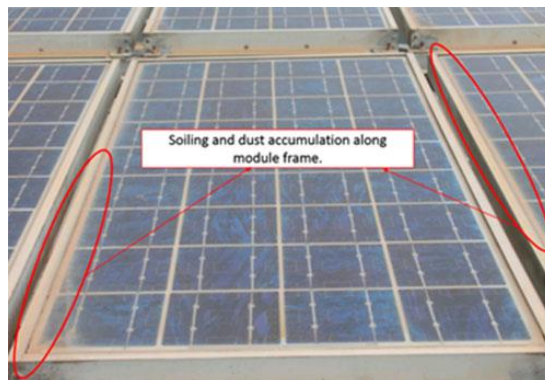


Abbildung 2 Schmutzansammlung am Rahmen der PV Module aus Quelle [36]

#### **4.2.4 Reinigungsmethoden (Mitigation)**

Durch die Reinigung der Oberflächen soll der ursprüngliche Zustand und damit die Leistungsfähigkeit der Systeme wiederhergestellt werden. Ungeeignete Reinigungsmethoden können jedoch auch Oberflächen und Beschichtungen beschädigen. Um eine langfristige Funktionsfähigkeit des Systems zu gewährleisten, ist es daher wichtig, für die auftretenden Verschmutzungen die richtige Reinigungsmethode anzuwenden. Es gibt zwei Ansätze zur Vermeidung von Verschmutzungen

- präventiver Ansatz, wie z.B. durch Anti-soiling/selbstreinigende Beschichtung und die optimale Auslegung der Anlage.
- regenerierende Reinigung der Systeme. Kann in manueller, mechanischer oder natürlicher Reinigungsart unterteilt werden



## Präventiver Ansatz

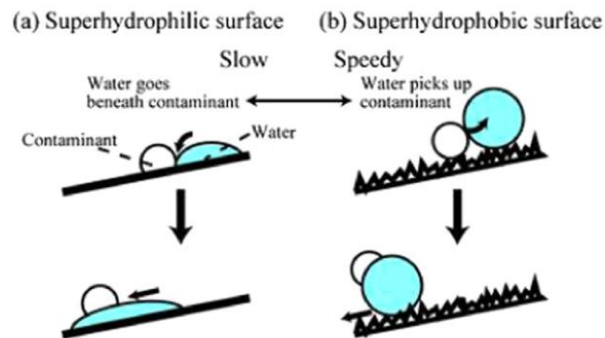


Abbildung 4.2.9 Abtransport von Schmutzpartikeln durch einer hydrophobischen vs hydrophilen Oberflächenbeschichtung [37]

*Anti-soiling Schichten* verändern die Oberfläche damit Schmutzpartikel weniger oder gar nicht mehr (noch Theorie) gebunden werden können. Diese Schichten können durch ihre hydrophobisch oder hydrophilen Eigenschaften das Haften von Schmutzpartikel verringern und erhöhen den Reinigungseffekt wie in Abbildung gezeigt wird. Diese Schichten bestehen meistens aus Polyethylen, Polyvinylchlorid (PVC) oder Acryl [18]. Allerdings sind viele Schichten noch Forschungsgegenstand und noch nicht abrasionsbeständig, von kurzer Lebensdauer oder erhöhen sogar die Verschmutzung, da sie die Oberflächenenergie verringern.

*Electrodynamische Screen* sind Oberflächenanpassungen, die durch elektrostatische Abstoßung geladene Schmutzpartikel abweisen. Diese Methode braucht kein Wasser zur Reinigung, weshalb sie besonders in ariden Gegenden besonders attraktiv ist. Allerdings ist diese Methode noch in der Forschungsphase und nicht für alle Art von Verschmutzung anwendbar.

### Regenerierender Reinigungsansatz

Mit *natürlichen Reinigungsarten* sind Wind, Regen und Schnee gemeint. Dabei ist nur Regen wirklich effektiv um lose (physikalisch gebundene) Verschmutzung zu lösen. Jedoch enthält Regenwasser manchmal, je nach Standort und Umweltbelastung, gelöste Stoffe, die beim Trocknen einen sichtbaren Film hinterlassen können. Bei Schnee wird die Oberfläche nur sauber, wenn eine schwere Ladung Schnee von dieser abrutschen. Beim Tauen vom Schnee bleiben eher mehr Rückstände zurück. Die Vermutung ist, dass die Reinigung durch eine Kombination von abrasiver Wirkung durch das runter rutschen und dem Vorhandensein von geschmolzenem Schnee (Wasser) an der Oberfläche erreicht wird.

Wind ist auch nur teilweise als Reinigungsmittel effektiv. Die Windeinwirkung kann Partikel von mehr als etwa 50% von den Oberflächen entfernen, ist aber für kleinere Partikel unwirksam ( $<50 \mu\text{m}$ ) [10].



Tabelle 2 Übersicht über verschiedene mechanische Reinigungsarten [38]

System	Manuell		Halbautomatisch					Auto- matisch	Träger- fahrzeug	
			mit Hochdruck	mit wassergetriebenen, rotierenden Bürsten			mit elektrisch angetriebenen, rotierenden Bürsten			
Bei- spiel	Gerät	Wischer/Bürste (starr)	Hochdruckreiner mit Flachstrahl oder Rotordüse	PVSpin	Sola-Tecs C700	Sola-Tecs W800	iSolar800 (iSolar400)	Rotaqleen Vario	Solarmopp	FWG 700
	Hersteller	–	Grundsätzlich nicht empfohlen	Schleifer GmbH	Cleantecs GmbH	Alfred Kärcher GmbH & Co. KG	Karlhans Lehmann KG	Agro-service GmbH	Mulag Fahrzeugwerk Heinz Wössner GmbH & Co. KG	
	Flächenleistung [m²/h]	20–50		100–200	150–300	150–300	100–300	50–100	150	3.500–5.000
	Arbeitsbreite [mm]	250–600		1.100	350–900	800 / 1.000	800 (400)	500 / 1.000	600–1.200	3.200 / 5.000
	Drehzahl [1/min]	–		150	700	350	200–300	160	k.A.	100
	Wassereinsatz [l/h]	10 (Wischer) – 100 (Bürste)		600–1.500	420–600	420–600	700–1.300	150–300	k.A.	k.A.
	Gewicht [kg]	bis 1 kg		25	2,5–4	17 / 20	6,5	5 / 10	36	320 / 415
	Bürstenart	Starr		Scheibe	Walze	Walze	Scheibe	Walze	Walze	Walze
	Borstenmaterial	Wischer Bürste	Mikro- faser Nylon, Kunst- haar, Ross- haar	Poly- amid	Poly- amid	Poly- amid	Poly- amid	Polyamid	Polyamid	k.A.
	Max. Länge Teleskopstange [m]	20		Ab- lassen vom First	15	–	14	14	–	6,3 (hori- zontal) 7 (vertikal)

Die *manuelle Reinigung* ist die häufigste und effizienteste Art der Reinigung, insbesondere zur Entfernung von hartnäckigem Schmutz. Der Nachteil dieser Reinigungsmethode sind die hohen Personalkosten neben den Kosten für Reinigungsgeräte, Reinigungsmittel und Wasser, insbesondere bei großen Anlagen. Neben den Kosten sind auch andere Aspekte wie Gesundheit und Sicherheit zu berücksichtigen.

Es gibt eine Vielzahl von *mechanischen Reinigungssysteme* die für unterschiedliche Solaranlagen und Standorten entwickelt wurden. Diese könne automatisch oder halbautomatisch die Oberflächen mit Bürsten und/oder Wischer die Oberflächen meistens mit Reinigungswasser reinigen. Eine Übersicht wird beispielsweise in Tabelle 2 dargestellt.



#### 4.2.4 Standard Testverfahren

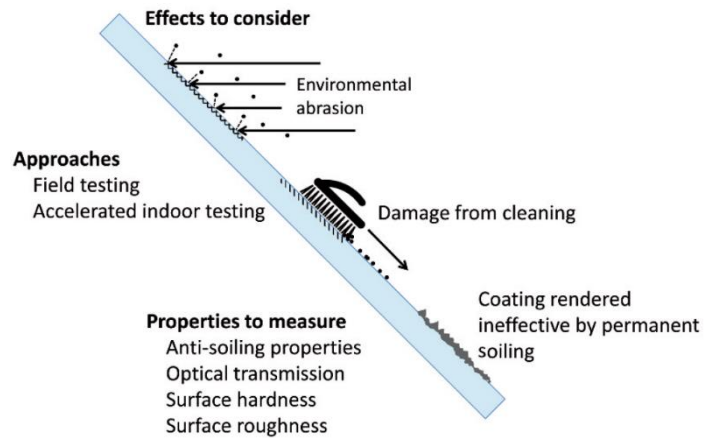


Abbildung 4.2.10 Darstellung der diversen Einflüsse, die auf eine Oberfläche wirken [39]

Aufbauend auf der Studie zur Verschmutzung von beschichteten Oberflächen soll ein standardisiertes Testverfahren für beschichtete Solarkomponenten vorgeschlagen werden. Diese Aufgabe erweist sich jedoch als herausfordernd, da die Studie die hohe Komplexität des Verschmutzungsthemas aufweist, wie in Abbildung 4.2.10 dargestellt. Insbesondere wird es schwierig werden **ein** Testverfahren zu entwickeln, das für unterschiedliche beschichtete Komponenten, Verschmutzungsarten und Reinigungsmechanismen gilt. Im Folgenden wird eine Übersicht über vorhandenen Testverfahren von beschichteten Oberflächen gegeben. Es existieren eine Vielzahl von Normen zu Testverfahren von optischen Schichten und Oberflächen, wie in Tabelle 3 aufgelistet. Jedoch fehlt ein einheitliches Testverfahren, das die Degradation von beschichtete Oberflächen von solaren Systemen unter Berücksichtigung der Temperaturdegradation, Einwirkung von Kondenswasser, Luftfeuchtigkeit, Korrosion **und Verschmutzung** betrachtet.

Tabelle 3 Übersicht über verschiedenen Normen für Testverfahren von beschichteten Oberflächen

Standard	Inhalt	Problematik
ISO 22975-3:2014 „Solar energy-Collector components and materials- Part3: Absorber surface durability“	Basierend auf IEA Task 10 & Task 27. Optischen Eigenschaften, wie Absorption und der Wärmeemissionsgrad getestet [19]	Einfluss von unterschiedlichen Verschmutzungsarten werden nicht berücksichtigt
DIN EN 60068-2-68 LC2 1996	Testverfahren zur Bestimmung der Wirkung von Staub und Sand auf elektrische Produkte [18]	Gilt für diverse elektrische Apparate und Anpassung für Solarthermie und PV Module nötig. Gilt nur für Degradierung durch Sand und Staub
ISO 4624 ASTM D4541	Test zur Adhäsion von Schichten auf Oberflächen. Ein auf einer beschichteten Oberfläche aufgeklebter Stempel wird mittels	Fehlt die Untersuchung der Abrasion durch Reiben der beschichteten Oberfläche.



	einer Zugprüfmaschine kontrolliert entfernt [20]	
ASTM D968-05 "Standard Test Methods for Abrasion Resistance of Organic Coatings by Falling Abrasive"	Testverfahren zur Beständigkeit von Beschichtung gegen abrasive Mittel, Sand oder Siliziumkarbid, die auf eine ebene Oberfläche fallen (Sand trickling and sandblasting methods).	Sand trickling ist eine extreme Methode und spiegelt realistische Konditionen nicht wider. Sand blasting kann die natürliche Abrasion durch den Sand bei starkem Wind besser nachahmen. Es fehlen Daten zu realen Sandstürmen [21]
DIN 52348:1985 "Testing of glass and plastics; abrasion test; sand trickling method"	Testverfahren um Alterungserscheinungen auf Glas durch Sand zu reproduzieren.	Der mit dieser Methode Alterungsgrad scheint willkürlich zu sein und reproduziert das natürliche Altern des Glas nicht [22]
ISO 6270-2CH	Prüfverfahren für die Reflektoroberfläche. Prüfung der thermischen Stabilität und Beständigkeit gegen Kondenswasser und Korrosion [23]	Verschmutzung nicht berücksichtigt
ISO 9211-4 "Optics and photonics-Optical coatings-Part4: Specific test methods"	Test zur Untersuchung von Beständigkeit von optischen Beschichtungen. Diese Tests werden ergänzend zu anderen Alterungstests durchgeführt. Evaluation basiert auf ISO 14997 oder individuell festgelegt. Angaben zur Durchführung von Adhäsions-, Abrasionstest und Kreuzschlupftest. [24]	Keine genaue Angaben zu Akzeptanzkriterien für beschichteten Solarkomponenten
IEC 62862-3-3 „Solar thermal electric plants- Part 3-3: Systems and components- General requirement and test methods for solar receivers“	Testverfahren für Solarkomponenten. Angabe von Spezifikationen zur Durchführung von Abrasionstest	100 Zyklen Abrasion, jedoch Akzeptanzkriterien nicht definiert
ISO 14997:2017 "Optics and photonics-Test methods for surface imperfections of optical elements"	Die Norm legt die physikalischen Prinzipien und praktischen Mittel für die Anwendung von Methoden zur Messung von Oberflächenschäden fest.	Keine genaue Angaben zu Akzeptanzkriterien für beschichteten Solarkomponenten
EN 1096-1 "Glass in building –Coated glass – Part 1: Definitions and classification"	Beschreibung von Kategorien für beschichtetes Glas in Gebäuden. [25]	Gilt nicht für Spiegelflächen mit Silberschicht. Keine Testverfahren beschrieben
EN 1096-2 "Glass in building –Coated glass – Part 2:	Die Norm legt Anforderungen und ein Testverfahren in Bezug auf die Beständigkeit gegen	Die Annahmekriterien und Verfahren müssen auf



Requirements and test methods for class C and D <sup>2</sup>	Sonneneinstrahlung für beschichtetes Glas für den Einsatz in Gebäuden fest.	Solaresysteme und Spiegel angepasst werden
--	---	--

Da für optische Bewertung von Solarglas keine geeigneten Normen bestehen, hat das SPF ein eigenes Zertifizierungsschema entwickelt. Gläser werden aufgrund optischer Messungen in Leistungsklassen eingeteilt. Jedoch werden Einflüsse durch Verschmutzungen nicht berücksichtigt und sind nicht Teil der Zertifizierung<sup>2</sup> [26].

In der IEA Solar Heating and Cooling Program Task 27 *Performance of Solar Facade Components* wurde eine Empfehlung zu einem Qualitätstestverfahren hinsichtlich der Beständigkeit von Absorberoberflächen entwickelt [20]. Hierbei geht es aber nicht um Verschmutzung im eigentlichen Sinne, sondern um Degradation durch den Einfluss von Temperatur, Hydrolyse und atmosphärischer Korrosion. Der Test beschränkt sich dementsprechend auf die Simulation von drei Arten von Absorberoberflächendegradationsprozessen: a) Hochtemperaturdegradation, b) Degradation durch die Einwirkung von Kondenswasser auf die Absorberoberfläche und c) Degradation durch hohe Luftfeuchtigkeit in Luft mit einer geringen Konzentration an Schwefeldioxid als Luftschadstoff. Weitere Verschmutzungsarten und die dadurch verursachte Alterung werden nicht betrachtet.

Um die Wirkung von Verschmutzungen und Reinigung auf beschichtete Oberflächen zu reproduzieren werden Abrasionstest an den Oberflächen durchgeführt. Jedoch werden in den verschiedenen Testverfahren unterschiedliche Materialien angewendet die auf der Fläche hin- und her bewegt werden. In EN 1096-2 wird beispielsweise ein Filzlappen benutzt, der über 500 Hübe auf der Fläche gerieben wird. Dabei entspricht ein Hub eine Hin- und Herbewegung. Hierfür bewegt ein Metalfinger mit einem Durchmesser von 15 mm bis 20 mm in einer Frequenz von etwa 60 Hübe/min mit einer Hublänge von etwa 120 mm. Die Hubbewegungen werden parallel ausgeführt. Der Abriebfilz muss eine Dichte von 0.52 g/cm<sup>2</sup> haben. Die Transmissionsmessung wird anschliessend bei 550nm bis 900nm (gestreute und direkte Lichtanteile) durchgeführt und darf nicht mehr als 5% von der Referenzmessung abweichen.

In ISO 9211-4 wird ein schwaches und ein starkes Abrasionstestverfahren beschrieben, in denen ein Baumwoll-Käsestoff bzw. ein Radiergummi eingesetzt wird um über die Oberfläche zu reiben. Im schwachen Abrasionstest werden 50 bis 100 Zyklen mit 5 N Auflagekraft durchgeführt. Im starken Abrasionstest werden 20 bis 40 Zyklen mit einer Auflagekraft von 10 N durchgeführt. Ein Zyklus beschreibt eine lineare Hin- und Herbewegung. Die Zyklusgeschwindigkeit wird zwischen 30 bis 90 Zyklen/Minute angegeben. Es werden keine genauen Akzeptanzkriterien angegeben.

Bei dem in der IEC NP 62862-3-3 beschriebenen Prüfverfahren handelt es sich um eine beschleunigte Alterungsprüfung und dient zur Simulation des mechanischen Verschleisses des Glases im Solarfeld durch Reinigung, Sandstürme oder andere mechanische Einwirkungen auf die Glasoberfläche über die gesamte Lebensdauer des Bauteils. Dieser Test basiert weitgehend auf ISO 9211-4. Diese Prüfung besteht darin, die Oberfläche des trockenen Glases mit einem Schleifgummi zu reiben.

Für ein standardisiertes Testverfahren muss überlegt werden was eine angemessene Zyklusanzahl wäre um die Abrasion durch Verschmutzung (Standort- und Systemabhängig) und Reinigungsverfahren zu reproduzieren.

---

<sup>2</sup> Der Wert, der zum Ausdrücken der Änderung der optischen Leistung der Absorberoberfläche verwendet wird, definiert als Funktion des Leistungskriteriums (Performance criterion function PC)

$$PC = -\Delta\alpha_s + 0.5\Delta\varepsilon$$

mit  $\alpha_s$ : Solarabsorptionsgrad und  $\varepsilon$  Wärmeemissionsgrad.



### 4.3 Aufbau eines Abrasionstests (AP3)

Bei dem in der IEC NP 62862-3-3 beschriebenen Prüfverfahren handelt es sich um eine beschleunigte Alterungsprüfung und dient zur Simulation des mechanischen Verschleisses des Glases im Solarfeld durch Reinigung, Sandstürme oder andere mechanische Einwirkungen auf die Glasoberfläche über die gesamte Lebensdauer des Bauteils. Dieser Test basiert weitgehend auf ISO 9211-4.

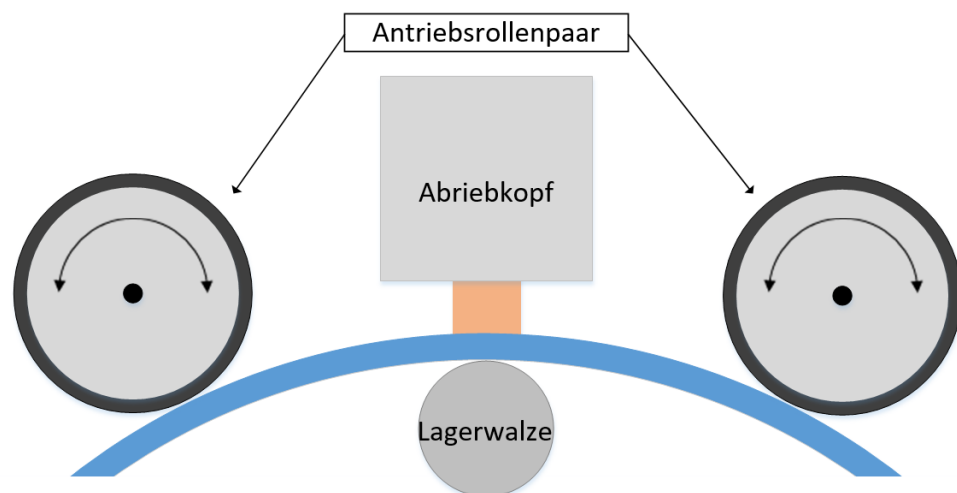
Diese Prüfung besteht darin, die Oberfläche des trockenen Glases mit einem Schleifgummi zu reiben. Die Art des Schleifgummis, die auf die Glasoberfläche aufgebrachte Last und die Anzahl der Längsreibungszyklen kann zu einer Verschlechterung und Ablösung der Antireflexschicht führen.

Ein Abriebkopf bewegt sich mit geringem Druck auf der Glasoberfläche in gerader Linie vor und zurück. Das Abriebkopfmaterial besteht aus Schleifmittel in einer Gummimatrix. Ein Längsreibungszyklus ist definiert als eine einmalige hin und her Bewegung des Abriebkopfes. Die Bewegung des Abriebkopfes erzeugt geschliffene Streifen auf der Glasoberfläche, in deren Bereich die solare Transmission der Glasoberfläche beeinflusst wird. Für einen Prüfzyklus werden mehrere Längsreibungszyklen auf der Glasoberfläche nebeneinandergelegt, so dass eine Prüffläche von mindestens 45 mm x 40 mm entsteht.

Die Bewertung der solaren Transmission des behandelten Materials erfolgt durch Vergleichsmessung der Transmission auf der mit einer bestimmten Anzahl von Zyklen behandelten Prüffläche mit dem Ausgangswert.

Abbildung 4.3.1 zeigt das Prinzip der Prüfapparatur im Schnitt, Abbildung 4.3.2 zeigt eine Seitenansicht derselben. Das zu prüfende Glas liegt auf einer frei drehbaren Lagerwalze. Zwei auf dem Glas aufliegende Antriebsrollenpaare für den Vorschub können dieses in Querrichtung zur Bewegung des Abriebkopfes verschieben. Diese Geometrie bietet den Vorteil, weitestgehend unabhängig vom Durchmesser des Prüflings zu sein - selbst plane Gläser können damit geprüft werden. Da der Vorschub über die Prüfoberfläche eingebracht wird, ist dieser zudem von der Glasdicke unabhängig.

Abb. 4.3.1: Prinzip des Abrasionstesters im Schnitt



Da die Breite des geschliffenen Streifens nicht nur vom Durchmesser des Schleifgummis abhängt, sondern auch vom Aussendurchmesser des Glasrohres, ist der nach jedem Längsreibungszyklus zu fahrende Vorschub frei programmierbar. Der Abriebkopf ist am Ende eines horizontalen Balkens angebracht, welcher mittels eines Elektromotors über eine Hublänge von 45 mm vor und zurück bewegt wird. Der Abriebkopf ist so dimensioniert, dass der Schleifgummi mit einem Gewicht von 350 g auf dem Prüfling aufliegt. Bei einem Schleifgummidurchmesser von 6 mm werden für einen Prüfzyklus sieben



geschliffenen Streifen (Längsreibungszyklen) nebeneinandergelegt. Dadurch ergibt sich eine Prüflflächenbreite von mindestens 42 mm.

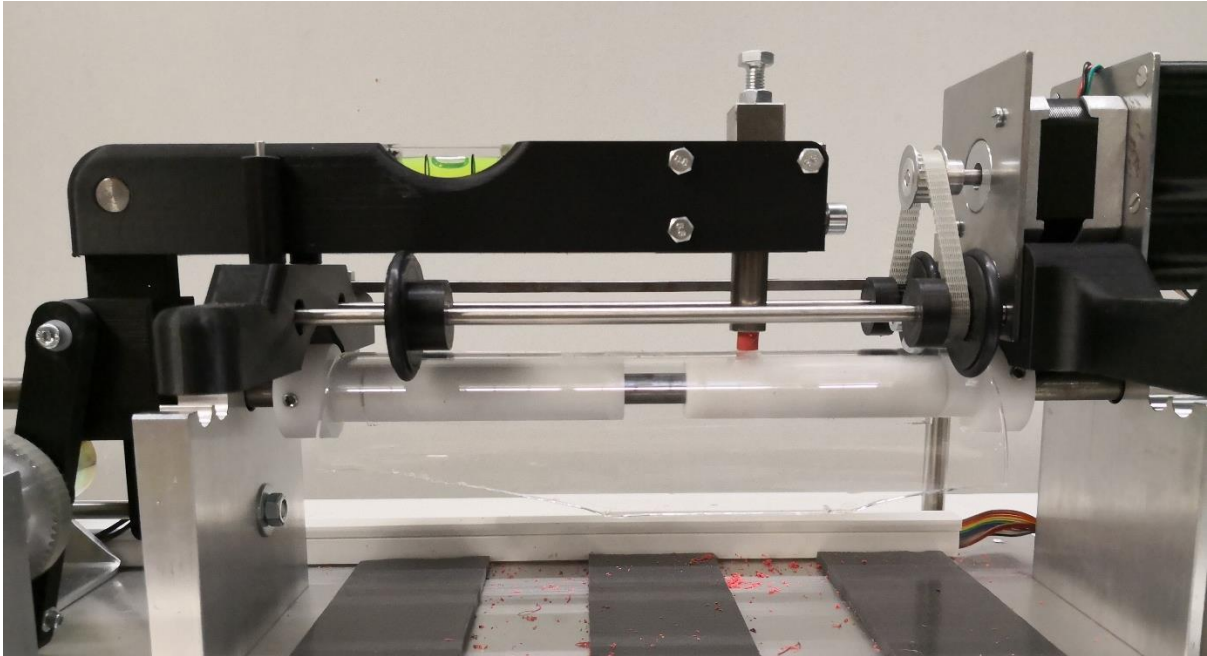
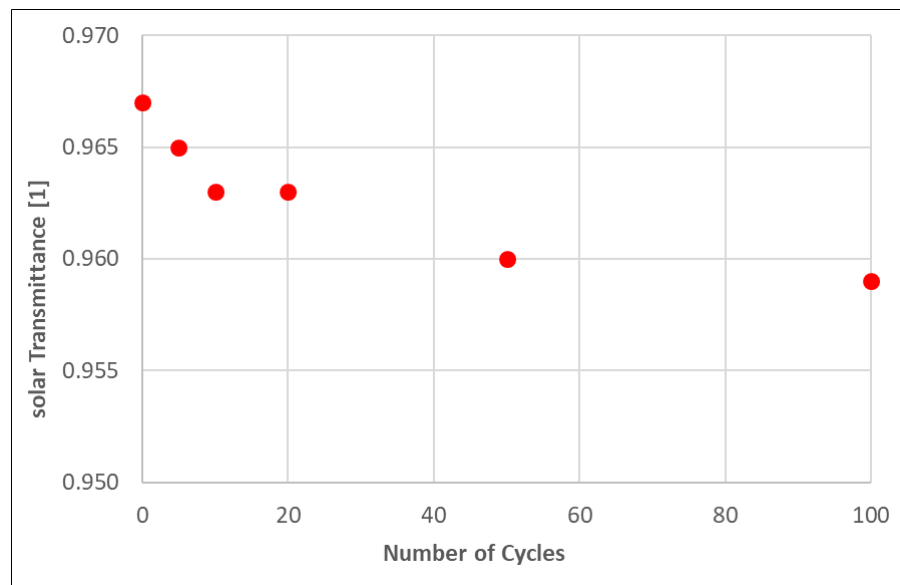


Abb. 4.3.2: Seitenansicht des Abrasionstesters mit Prüfling (Glasrohr)

Vor der Prüfung wird der Schleifgummi während mindestens fünf Längsreibezyklen über eine zuvor Sandgestrahlte Fläche des Prüflings gerieben. Dadurch sollen Partikel, die möglicherweise aus vorgehenden Prüfungen noch am Gummi haften, entfernt werden. Zudem soll damit die Krümmung der Oberfläche des Schleifgummis an die Krümmung des Prüflings angepasst werden.

Abb. 4.3.3: Abnahme der solaren Transmittanz im Verlauf der Abrasionsprüfung





Als Prüfling stand ein AR beschichtetes Glasrohr (Borosilikat) von 70 mm Durchmesser zur Verfügung. Um direkt-hemphärische Transmissionsmessungen daran vornehmen zu können, wurde dieses in Längsrichtung halbiert. Im Ausgangszustand wurde für dieses Rohr ein solarer Transmissionsgrad (bezogen auf AM1.5, ISO9845) von 96.7% gemessen. Anschliessend wurden, dem Normentwurf entsprechend, Transmissionsmessungen nach 5, 10, 20, 50 und 100 Prüfzyklen durchgeführt. Aufgrund der Abnutzung der Schicht nimmt die solare Transmission mit wachsender Anzahl Zyklen stetig ab (siehe Abb. 4.3.3) um am Ende der Prüfung von Ausgangs 96.7% auf 95.9% nach 100 Zyklen abgefallen zu sein.

#### 4.4 Aufbau eines Messgerätes für die Spekulare Reflexionsmessung (AP4)

Die gerichtete (oder spekulare) Reflexion  $\rho_s(\lambda, \Theta_i, \varphi)$  ist eine Funktion der Wellenlänge  $\lambda$ , des Winkels  $\Theta_i$  zwischen der Flächennormalen und des darauf einfallenden Lichtes sowie des (halben) Akzeptanzwinkels  $\varphi$ , welcher durch die Apertur des Detektors gegeben ist (siehe Abb. 4.4.1).

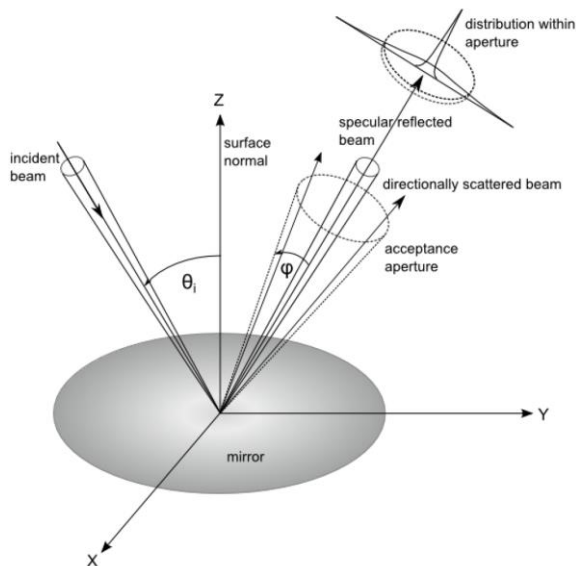


Abb. 4.4.1: Gerichtete (oder spekulare) Reflexion  $\rho_s(\lambda, \Theta_i, \varphi)$   
(Abbildung aus: [27])

Für eine ideale Messung (Abb. 4.4.2, links) müsste die Lichtquelle aus einem perfekt kollimierten Lichtstrahl ohne Ausdehnung (Durchmesser) bestehen. Dann gilt, für eine Detektorapertur mit Radius  $R$  im Abstand  $b$  zur Spiegelfläche, die Beziehung  $\tan(\varphi) = R/b$  und

$$\rho_s(\lambda, \Theta_i, \varphi) = I_o(\lambda) / I_s(\lambda, \Theta_i, \varphi),$$

wenn  $I_o(\lambda)$  die Strahlungsleistung des einfallenden Lichtstrahls und  $I_s(\lambda, \Theta_i, \varphi)$  die Strahlungsleistung des reflektierten Lichts innerhalb des (halben) Akzeptanzwinkels  $\varphi$  ist. Für ausgedehnte Lichtquellen kann selbst bei perfekter Kollimation kein eindeutiger Akzeptanzwinkel mehr definiert werden (Abb. 4.4.2, rechts).

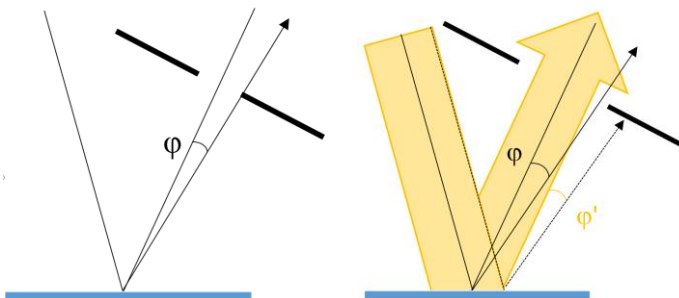


Abb. 4.4.2: (Links) Idealer Aufbau mit Lichtstrahl ohne Ausdehnung: Ab einem Winkel  $\tan(\varphi) > R/b$  trifft ein gestreuter Lichtstrahl auf die Blende. (Rechts) Realer Aufbau mit ausgedehntem Lichtstrahl: Ein unter dem Winkel  $\varphi$  gestreuter Lichtstrahl kann auf die Blende treffen oder diese passieren, je nach dem aus welchem Bereich des Lichtstrahls er stammt.

In der Praxis soll das Messergebnis für  $\rho_s$  nicht nur einen einzelnen Punkt, sondern einen grösseren Bereich der Spiegeloberfläche repräsentieren. Daher ist eine Ausdehnung des auf die Probe treffenden Lichtstrahls gewünscht, was jedoch mit der oben beschriebenen Methode (d.h. Messung des reflektierten Lichts mittels Detektorapertur) zwangsläufig zu Fehlern führt. Deshalb wird in diesem Aufbau das reflektierte Licht mittels einer Leuchtdichtekamera gemessen. Gegenüber konventionellen Digitalkameras verfügt eine LD-Kamera über einen sehr grossen dynamischen Bereich (die hier eingesetzte Kamera von über  $1:10^6$ ). Den Aufbau der Messapparatur zeigt Abbildung 4.4.3.

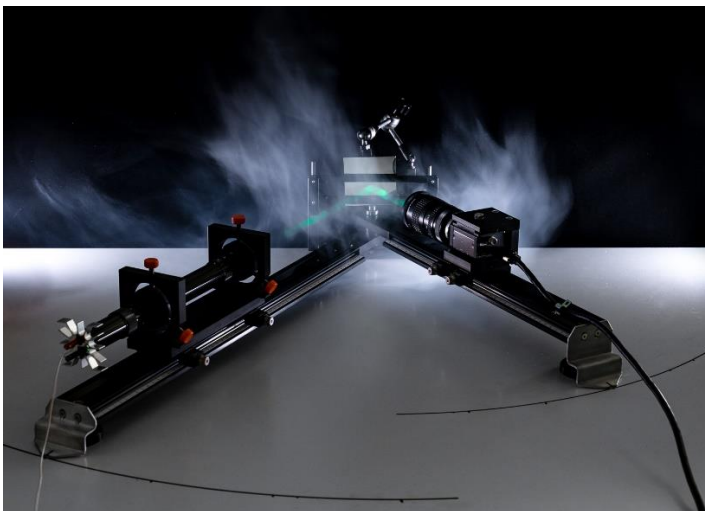


Abb. 4.4.3: Messapparatur zur Bestimmung der spekularen Reflexion  $\rho_s(\lambda, \Theta_i, \varphi)$  spiegelnder Oberflächen. Die Lichtquelle (links) und LD-Kamera (rechts) können jeweils um die Probe (Spiegel im Zentrum) im Bereich von  $\pm 8^\circ$  bis  $\pm 90^\circ$  (gemessen zur Probenormalen) geschwenkt werden. Die Stellung Lichtquelle  $-90^\circ$  und LD-Kamera  $+90^\circ$  ermöglicht die Messung der Strahlungsleistung  $I_0(\lambda)$  der Lichtquelle. Der kollimierte Lichtstrahl ist mittels Rauch sichtbar gemacht worden.

Ist die Optik der LD-Kamera auf " $\infty$ " gestellt, werden alle zueinander parallelen Lichtstrahlen auf ein und dasselbe Pixel des CCD-Chips der Kamera projiziert (Abb. 4.4.4). Das heisst, jedem Pixel auf dem Chip kann die Einfallrichtung (bzgl. der optischen Achse der Kamera) eindeutig zugeordnet werden. Dadurch entspricht das elektrische Signal jedes Pixels der Strahlungsleistung aus einem bestimmten Winkel (genau genommen aus einem Winkelbereich, dessen Ausdehnung durch die Optik und die Pixelgrösse bestimmt wird). Das Pixel im Zentrum des Chips repräsentiert die Strahlungsleistung welche parallel zur optischen Achse auf die Kamera trifft. Sämtliche Strahlung, welche innerhalb eines durch die Akzeptanzapertur vorgegebenen Winkelbereichs  $\varphi$  (s. Abb. 4.4.1) auf die Öffnung des Kameraobjektivs trifft, liegt dann innerhalb einer Kreisfläche auf dem CCD-Chip.

Das Zoom-Objektiv der LD-Kamera wird mit der Entfernungseinstellung " $\infty$ " und Brennweite 75 mm betrieben. Dieses projiziert das einfallende Licht auf einen CCD-Chip mit  $2'448 \times 2'048$  Pixel. Die Abbildungstreue wurde mit Nachtaufnahmen des Sternenhimmels überprüft. Dazu wurden die Abstände von 63 Sternen zueinander mit der LD-Kamera im Sternbild "Ursa Major" vermessen. Aus diesen



Messungen erhält man den Abbildungsmaßstab  $M$  als eine Korrelation zwischen der Einfallswinkeldifferenz der Sterne zum zugeordneten Pixelabstand auf dem CCD-Chip von  $M = (0.04602 \pm 0.00014)$  mrad/px bei einem maximalen (halben) Akzeptanzwinkel von ca.  $(56 \times 47)$  mrad.

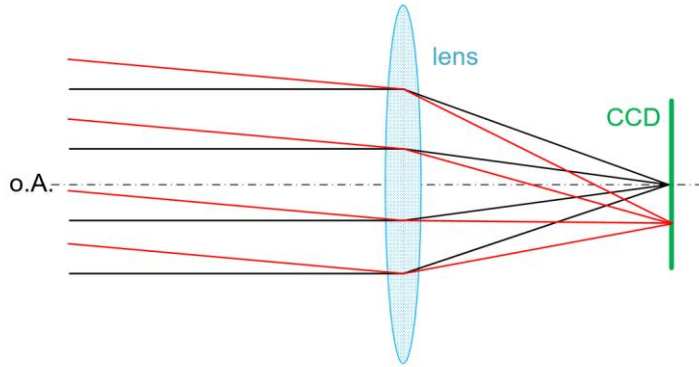


Abb. 4.4.4: In Fokussierung " $\infty$ " treffen alle parallelen Strahlen auf dasselbe Pixel des CCD-Chips. Achsparallele Strahlen treffen auf das Pixel im Zentrum des Arrays.

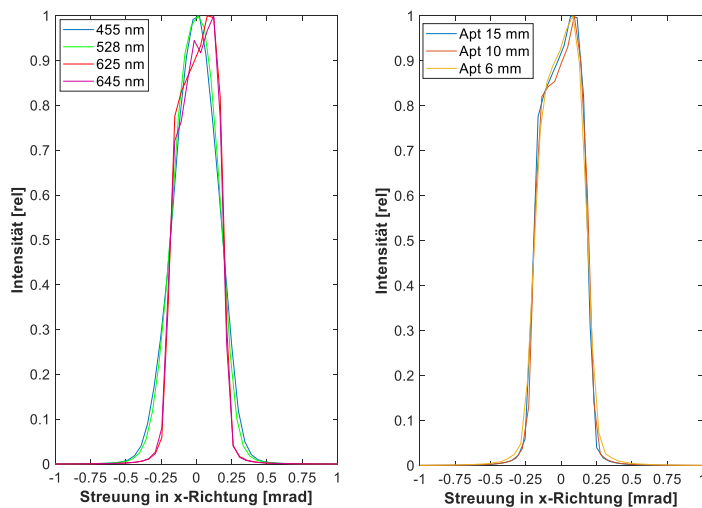
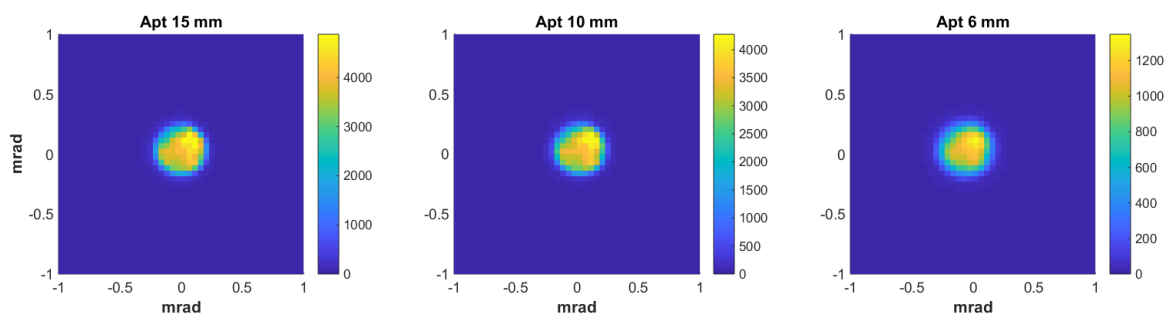


Abb. 4.4.5 Strahldivergenz der Lichtquelle für LED unterschiedlicher Wellenlänge und für unterschiedliche Strahldurchmesser (links). Der Divergenzwinkel ist in allen Fällen  $< 0.2$  mrad (HWHM). (Zum Vergleich: die Strahldivergenz der Sonne liegt bei ca.  $4.2$  mrad). CCD-Bild der Lichtquelle für unterschiedliche Strahldurchmesser (unten).



Die Lichtquelle besteht aus einer LED, welche über einen Kondensator auf eine Lochblende mit Diffusor abgebildet wird, woraus wiederum über einen Achromat ein kollimierter Lichtstrahl mit einer rechnerischen Divergenz von  $0.19$  mrad (halber Winkel) erzeugt wird. Durch den problemlosen Wechsel der LED ist es möglich, in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen zu messen. Der Durchmesser des Lichtstrahls kann mittels Irisblende zwischen  $1.2$  mm und  $15$  mm eingestellt werden (Abb. 4.4.5).

In den letzten Jahren sind mehrere Publikationen erschienen, die ebenfalls Messungen des gerichteten Reflexionsgrades von Spiegeln mittels bildgebender Detektoren wie LD-Kameras oder CCD-Zeilen



beschreiben [28] [29] [30]. Diese Methoden verwenden den Ansatz, dass sich die gemessene Streulichtverteilung mathematisch als eine Faltung der zu ermittelnden Streufunktion (Streueindikatrix) des Spiegels mit der Gerätesignatur beschreiben lässt. Dabei beschreibt die Gerätesignatur im Wesentlichen die Divergenz der verwendeten Lichtquelle. Mittels diskreter Dekonvolution kann dann die diskrete Streufunktion des Spiegels ermittelt werden [28]. Bei wenig Streuung und somit kleiner Differenz zwischen Gerätesignatur und Spiegelmessung, führt das numerische Verfahren oft zu Artefakten in der Streueindikatrix, welche sich in hochfrequenten Schwingungen äusseren. Es gibt eine Vielzahl von Methoden der Numerischen Dekonvolution von 2D Arrays, aus der Bildbearbeitungstechnik. Da diese aber nicht eindeutig sind, und das Resultat somit vom angewendeten Dekonvolutionsverfahren und dessen Parametern abhängt, sind diese nur bedingt für die präzise Charakterisierung von Spiegeln anwendbar.

Andere Autoren verwenden denselben Faltungs-Ansatz, geben aber als Streufunktion eine analytische Funktion vor, wie etwa eine Gaussverteilung oder die Superposition zweier Gaussverteilungen optional mit zusätzlicher Exponentialfunktion [28] [29] [31] [32]. Das Ergebnis der Entfaltung ist dann aber keine diskrete Streueindikatrix der Oberfläche, sondern ein Fit der vorgegebenen analytischen Funktion an dieselben.

Der Zweck dieses Faltungs-Ansatzes besteht darin, den Einfluss der Divergenz einer nicht idealen Lichtquelle aus den Messdaten zu eliminieren. In den SolarPACES Reflectance Guidelines [27] wird vorgeschlagen, den spekularen Reflexionsgrad oder TIS von Reflektoren für unterschiedliche (halbe) Akzeptanzwinkel  $\varphi = 3.5, 7.5, 12.5$  und  $23$  mrad anzugeben ( $12.5$  mrad typischerweise für CPC). Die Divergenzen der in [30] [29] [28] verwendeten Lichtquellen liegen mit ca.  $5$  mrad in derselben Grössenordnung, was die Dekonvolution zu einer Notwendigkeit macht. Im Gegensatz dazu ist die Divergenz der im Rahmen dieses Projektes entwickelten Lichtquelle mehr als eine Grössenordnung kleiner als der kleinste anzugebende Akzeptanzwinkel. Daher wird hier auf eine Dekonvolution verzichtet und das mit der LD-Kamera gemessene Bild direkt als Streueindikatrix der gemessenen Oberfläche interpretiert.

In Abb. 4.4.6 ist das Ergebnis der Reflexionsmessung unter  $-8^\circ$  Einfallswinkel an einem rückseitig mit Silber beschichtetem Glasspiegel dargestellt. Auf den ersten Blick scheint das CCD-Bild dem erwarteten Strahlverlauf eines planparallelen 2<sup>nd</sup> Surface Spiegels zu entsprechen - mit einer (schwachen) Reflexion der 1. Ordnung an der Glasoberfläche, gefolgt von der lateral versetzten Hauptreflexion (2. Ordnung) an der rückseitigen Spiegelfläche usw.. Da bei einem planparallelen Spiegel aber alle Reflexionen (unabhängig von deren Ordnung bzw. deren lateralem Versatz) parallel zueinander verlaufen, sollte das CCD-Bild, aufgrund der " $\infty$ " Einstellung der LD-Kamera, nur ein einzelnes Intensitätsmaximum aufweisen. Dies ist hier offensichtlich nicht der Fall, woraus folgt, dass die beiden Oberflächen nicht parallel zueinander sind, sondern um einen Winkel  $\delta$  von der Parallelität abweichen, was wiederum durch eine Welligkeit des Glases verursacht sein kann.

Diese Vermutung wird dadurch bestätigt, dass sich die vier gut sichtbaren Maxima durch horizontales Verschieben der Probe aufeinander zubewegen und nach  $25$  mm Versatz in einem einzelnen Maximum vereint sind. Da Abb. 4.4.6 den grössten Abstand der Maxima zeigt, ist an dieser Stelle des Spiegels mit der grössten Winkelabweichung  $\delta$  zu rechnen. Basierend auf Snell's Gesetz können, unter der Annahme eines Parallelitätsfehlers von  $\delta = 0.027$  mrad, die Richtungen der ersten vier Reflexionsordnungen in guter Übereinstimmung mit der Messung bestätigt werden (siehe Punkte "Fit" in Abb. 4.4.6 rechts).

Nehmen wir ferner an, dass die Dickenschwankung einen sinusförmigen Verlauf hat, mit der maximalen Steigung von  $\delta = 0.027$  mrad bei  $x = 0$  und einer  $\frac{1}{4}$  Periode (mit  $\delta = 0$ ) von  $25$  mm, so folgt für die Sinusfunktion unmittelbar eine Amplitude von  $0.007$  mm, was der halben Dickenschwankung des Spiegels entspricht. Dies ist in guter Übereinstimmung mit der gemessenen Dicke des Spiegels, welche über die ca.  $4 \times 6$  cm<sup>2</sup> grosse Probe verteilt zwischen  $1.050$  mm und  $1.065$  mm schwankt. Es ist jedoch anzumerken, dass die Dickenmessung nicht sehr genau ist, da diese zum einen mit einem Mikrometer



erfolgte und die Messung zum anderen mögliche Dickenschwankungen des rückseitigen Schutzlackes miteinschliessen.

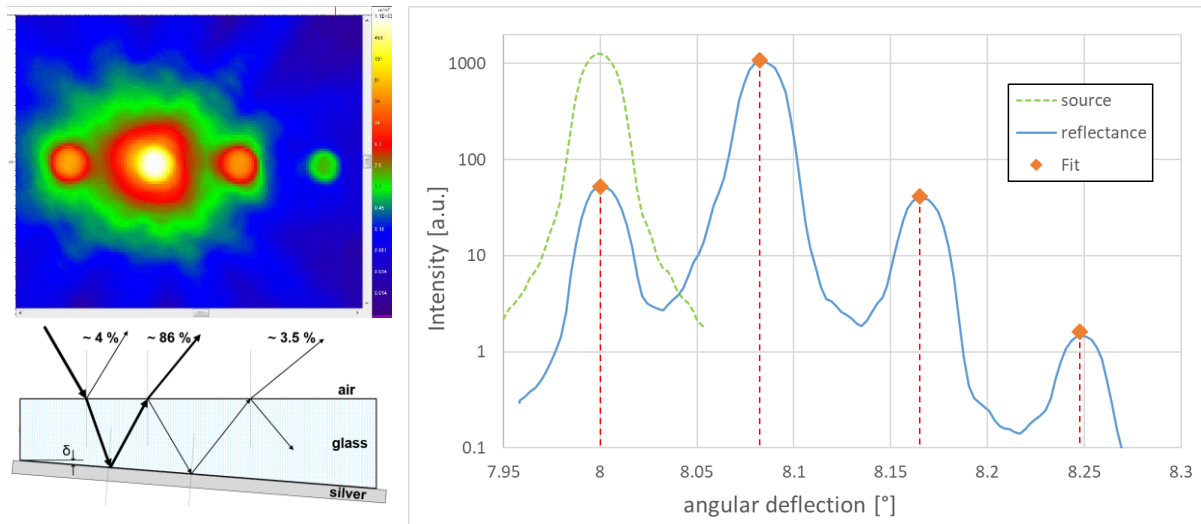


Abb. 4.4.6: CCD-Bild (links oben) des von einem Glasspiegel (2<sup>nd</sup> Surface) unter -8° Einfallswinkel reflektierten Lichts und dessen winkelabhängige Intensitätsverteilung entlang der horizontalen x-Achse (Quellensignal "source" an der 0°-Achse gespiegelt) (rechts). Schematischer Strahlverlauf mit Mehrfachreflexionen am Glasspiegel (links unten).

Um die gemessenen Intensitäten der vier Reflexionsordnungen zu überprüfen, wird der Spiegel mittels Bouguer's Gesetz und den Fresnel Gleichungen modelliert und die optischen Konstanten mittels RLS-Fit bestimmt. Zielgrösse für den Fit sind die Verhältnisse der vier Reflexionsmaxima zueinander, sowie der Gesamtreflexionsgrad des Spiegels mit  $\rho_s = \rho_n = 93.5\%$ . Letzterer wird über eine spektrale direkt-hemisphärische Reflexionsmessung ermittelt, unter der Annahme, dass der Spiegel keinen nennenswerten Diffusanteil aufweist. Sämtliche optischen Grössen beziehen sich auf die spektrale Intensitätsverteilung der (grünen) Lichtquelle. Das in Abb. 4.4.6 dargestellte Ergebnis des Fits führt für das Glas (1 mm Dicke) zu einem Brechungsindex  $n = 1.51$  und einem Extinktionskoeffizienten  $K = 4.07/m$ , beides typische Werte für eisenarmes Glas. Für die Silberschicht ergibt sich ein Reflexionsgrad von  $\rho = 94.2\%$ .

Abbildung 4.4.7 zeigt die Streulichtverteilung eines Aluminiumspiegels, wie dieser häufig z.B. in CPC Kollektoren eingesetzt wird. Der Spiegel ist unter einem Einfallswinkel von 8° mit einer roten Lichtquelle mit 15 mm Strahldurchmesser beleuchtet. Das Streubild zeigt, zumindest bei der hier gewählten logarithmischen Intensitätsskala, einen deutlichen Unterschied bzgl. der Streuung in x-Richtung (horizontal) und y-Richtung (vertikal). Der Grund für diese Anisotropie liegt in den herstellungsbedingten Walzriefen, welche im vorliegenden Beispiel in vertikaler Richtung verlaufen.

Für die Ermittlung des gerichteten Reflexionsgrades  $\rho_s(\lambda, \Theta_i, \varphi)$  in Abhängigkeit der Akzeptanzapertur  $\varphi$ , wird zunächst der Schwerpunkt der (Dunkelstrom korrigierten) Intensitätsverteilung (Abb. 4.4.7) gesucht. Nach dem Reflexionsgesetz repräsentiere dieser Punkt die Hauptrichtung  $-\Theta_i$  der direkten Reflexion. Werden diesem Punkt die Pixel-Koordinaten  $n = k = 0$  zugeordnet, so entspricht die gesamte reflektierte Strahlungsleistung  $I_s(\lambda, \Theta_i, \varphi)$ , welche innerhalb einer Akzeptanzapertur  $\varphi$  liegt, der Summe über alle (Dunkelstrom korrigierten) Pixelintensitäten  $I_{s,n,k}$ , die innerhalb eines Kreises mit der Gleichung  $n^2 + k^2 = (\varphi/M)^2$  liegen.

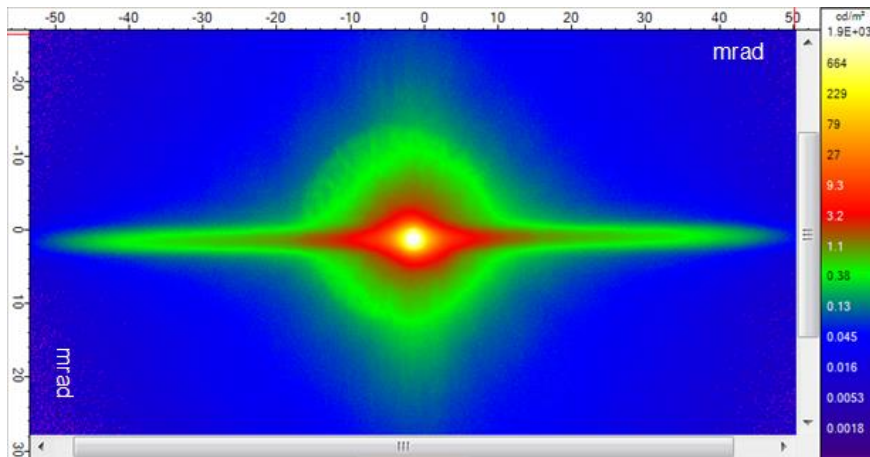


Abb. 4.4.7: Streulichtverhalten eines Aluminiumreflektors mit ausgeprägter Anisotropie bedingt durch die vertikal verlaufenden Walzriefen. (Intensitätsskala in logarithmischer Darstellung).

Zur Bestimmung der einfallenden Strahlungsleistung  $p_0(\lambda)$  wird das Streubild der Lichtquelle direkt aufgenommen und um den Dunkelstrom korrigiert.  $p_0(\lambda)$  ergibt sich dann aus der Summation der (Dunkelstrom korrigierten)  $I_{0,n,k}$  über alle  $n$  und  $k$ .

Bleibt für beide Messungen, also Referenzmessung der Lichtquelle und Probenmessung des Reflektors, die Lichtquelle unverändert (d.h. dieselbe LED bei konstanter Leistung und unverändertem Strahldurchmesser), so erhält man nach vollzogener Division den spekularen Reflexionsgrad  $\rho_s(\lambda, \Theta_i, \varphi)$ , wie dieser in Abbildung 4.4.8 für den Aluminiumreflektor dargestellt ist. Da das Streubild dieses Reflektors deutliche Anisotropie aufweist, ist in Abb. 4.4.8 der spekulare Reflexionsgrad für eine Lochblende (circular apt.) sowie für eine horizontale (slit apt. X) und eine vertikale (slit apt. Y) Schlitzblende dargestellt.

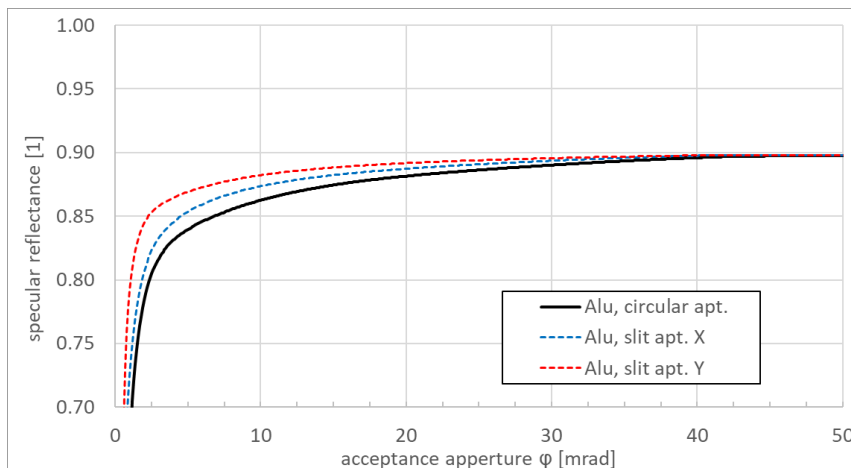


Abb. 4.4.8: Gerichteter Reflexionsgrad eines Aluminiumreflektors als Funktion des Akzeptanzwinkels  $\varphi$  für eine runde Blende (circular apt.) sowie für eine horizontal bzw. vertikal ausgerichtete Schlitzblende (slit apt.). (Messung mit roter Lichtquelle bei 15 mm Strahldurchmesser)

Alle Reflexionskurven für den Alu-Reflektor in Abb. 4.4.8 konvergieren knapp unterhalb von 50 mrad Akzeptanzwinkel gegen einen Wert von 0.898. Dieser Wert sollte, solange der maximale Streuwinkel des Aluminiumreflektors kleiner ist als der maximale Akzeptanzwinkel der LD-Kamera, dem hemisphärischen Reflexionsgrad  $\rho_h$  entsprechen. Da der maximale Akzeptanzwinkel der Kamera bei (56 x 47) mrad liegt, ist unklar, ob diese Bedingung noch erfüllt ist. Ein Vergleich mit dem mittels spektraler direkt-hemisphärischer Reflexionsmessung zu  $\rho_h = 0.903$  bestimmten Reflexionsgrad könnte ein Hinweis darauf sein, dass diese Bedingung knapp nicht erfüllt ist (Abb. 4.4.9).

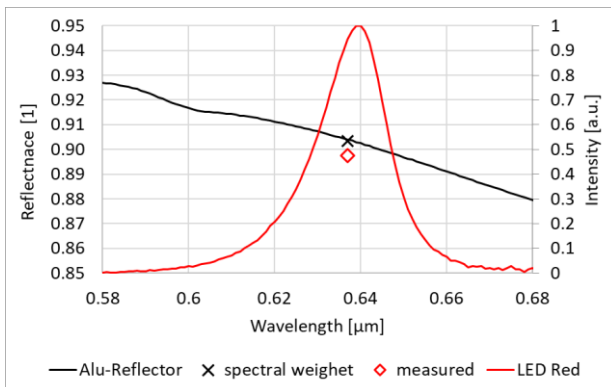


Abb. 4.4.9: Spektraler hemisphärischer Reflexionsgrad des Alu-Reflektors und spektrale Intensitätsverteilung der roten Lichtquelle. Bei der Schwerpunktswellenlänge  $\lambda=637\text{nm}$  der Lichtquelle ergibt sich durch gewichtete Integration des Reflektor-Spektrums mit dem Spektrum der Lichtquelle ein Reflexionsgrad von 90.3%. Dem gegenüber wurde mit dem Streulichtmessstand ein Reflexionsgrad von 89.8% gemessen.

Abbildung 4.4.10 (links) zeigt die gemessenen Intensitäten einer Lichtquelle vor und nach der Reflexion an einem 1<sup>st</sup> Surface Glasspiegel als Funktion der Akzeptanzapertur  $\varphi$ . Beide Funktionen sind auf die Gesamtintensität der Lichtquelle normiert, wodurch der Intensitätsverlauf des Spiegels gerade  $\rho_s$  entspricht. Es fällt auf, dass, wie bereits beim Alu-Reflektor, auch hier der gerichtete Reflexionsgrad selbst für grosse Werte der Akzeptanzapertur noch ansteigt. Für einen beinahe perfekt spekularen Reflektor, wie dieser durch den Glasspiegel gegeben ist, wäre jedoch zu erwarten, dass dessen Streuung deutlich kleiner als 1 mrad ist und damit sein spekulärer Reflexionsgrad  $\rho_s$  bereits für  $\varphi < 1$  mrad seinem hemisphärischen Reflexionsgrad  $\rho_h$  entspricht. Die Ursache, dass dies hier nicht der Fall ist, liegt jedoch nicht im Streuverhalten des Spiegels. Vielmehr zeigt die gemessene Strahlungsleistung der Lichtquelle dieselbe Abhängigkeit von der Akzeptanzapertur. Dies zeigt die Division der beiden gemessenen Intensitätsfunktionen, welche zu einem  $\rho_h$  entsprechenden Wert von 0.868 führt, der weitestgehend unabhängig von der Akzeptanzapertur ist.

Wie bereits Eingangs erläutert, ist die theoretische als auch die gemessene Divergenz der Lichtquelle kleiner als 0.2 mrad (HWHM) (siehe Abb. 4.4.5). Eine genauere Betrachtung der Messung zeigt jedoch, dass selbst bis zu einem Winkel von 40 mrad noch eine geringe Intensität gemessen wird (Abb. 4.4.10 rechts). Da der Raumwinkel mit zunehmendem Abstand vom Zentrum immer grösser wird, tragen die Signale mit grösserer Distanz mehr zum Gesamtsignal bei. So wird das Signal des Peaks der Lichtquelle mit einer Halbwertsbreite von 0.2 mrad durch etwa 60 Pixel auf dem CCD-Chip repräsentiert. Ein 0.2 mrad breites Intervall im Abstand von 40 mrad entspricht dagegen mehr als 7'500 Pixeln. Und obschon oberhalb 3.5 mrad die gemessene Intensität um deutlich mehr als einen Faktor  $10^{-4}$  abgefallen ist, führt dies dazu, dass bei einer Akzeptanzapertur von 3.5, 7.5, 12 bzw. 23 mrad nicht jeweils 100% der Gesamtintensität der Lichtquelle, sondern nur 97%, 98%, 98.6% bzw. 99.3% davon innerhalb der Apertur liegen. Dies resultiert in einer entsprechenden Ungenauigkeit bei der Bestimmung der spekularen Reflexion.

Sollte die in Abb. 4.4.10 (rechts) gemessene Divergenz tatsächlich auf die Lichtquelle zurückzuführen sein, könnte die korrekte Streufunktion, wie bereits oben erörtert, über einen Faltungsansatz ermittelt werden. Erste Versuche deuten jedoch darauf hin, dass es sich hier nur um eine "scheinbare" Divergenz der Lichtquelle handelt, die eigentliche Ursache dafür aber bei der LD-Kamera zu suchen ist. Je nach tatsächlicher Ursache kann dann aber der Faltungsansatz in die Irre führen.

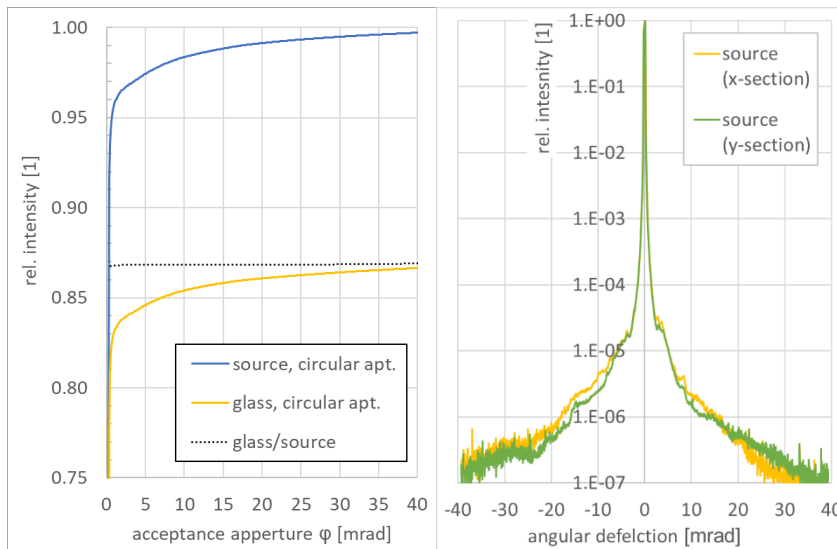


Abb. 4.4.10:  
(links) Intensität der Lichtquelle vor und nach Reflexion an einem 1st Surface Glasspiegels als Funktion der Akzeptanzapertur  $\phi$ .

(rechts) Intensitätsverlauf (Divergenz) der Lichtquelle als Funktion der Winkelabweichung.

(Messung mit roter Lichtquelle bei 15 mm Strahldurchmesser)

## 5 Diskussion der Ergebnisse

### 5.1 Untersuchung von wetterexponierten Proben (AP1)

#### 5.1.1 Standortabhängigkeit

Die Standortabhängigkeit der Resultate ist, wie schon in der vorangegangenen Studie, sehr ausgeprägt. Die beiden Standorte repräsentieren einen ruralen Standort mit alpinem Klima (Davos) und einen suburbanen Standort mit Klima des schweizerischen Mittellandes. Es ist aber unklar inwiefern die Standorte für die jeweilige Kategorie repräsentativ sind. In Rapperswil mit der starken Verschmutzung ist insbesondere die Nähe zum Bahnhof zu erwähnen. Es ist unklar ob die Resultate mit einer anderen als „suburban“ klassifizierten Mikroumgebung ähnlich deutlich ausgefallen wären. Die Standorte wurden aber analog zur Vorgängerstudie ausgewählt, um Resultate vergleichen zu können.

Auch der Versuchsablauf wurde analog zur Vorgängerstudie gewählt und Proben wurden nur zu wenigen Zeitpunkten eingesammelt und vermessen. Die Verschmutzung der Proben ist natürlich abhängig vom Wetter und der Regenhäufigkeit kurz vor der Vermessung. Anfang Juni 2017 gab es sowohl in Rapperswil (Probenahme 9.6.2017) und in Davos (Probenahme 14.6.2017) mehrere Regentage. Es ist also nicht von einer überdurchschnittlich hohen Verschmutzung aufgrund einer langen Trockenperiode auszugehen. Vielmehr kann nach längeren Trockenperioden von einer stärkeren Verschmutzung als hier angegeben ausgegangen werden.

#### 5.1.2 Glas mit AR Beschichtung

Das Verhalten aller untersuchten Proben ist in vielerlei Hinsicht ähnlich. Sofern die Hersteller Informationen zum Schichtaufbau gaben, waren alle Schichten aus porösem Silizium Dioxid hergestellt. Diese Schichten werden meist im sol-gel Verfahren hergestellt und anschliessend eingebrannt. Die Resultate können also nur auf derartige AR-Schichten übertragen werden. Weil sich aber acht Schichten von vier Herstellern sehr ähnlich verhalten haben, kann von einer guten Korrosionsresistenz dieser Schichttechnologie ausgegangen werden. Insbesondere die nahezu gleichbleibende Transmission aller Gläser in Davos zeigt, dass die exponierten AR-Schichten über viele Jahre ihre Eigenschaften behalten. Weil beim zweiten Expositionsprojekt keine unbeschichteten Gläser exponiert wurden, kann hier kein



direkter Vergleich gemacht werden und die Einbussen durch Verschmutzung in Rapperswil können lediglich mit Resultaten aus dem Vorgängerprojekt verglichen werden. Auch wenn die Bedingungen nach zwanzig Jahren sicherlich nicht identisch sind, so liegen die Transmissionseinbussen der AR-Gläser nach sieben Jahren in einer ähnlichen Grössenordnung wie die Transmissionseinbussen der umgeschichteten Gläser aus dem Vorgängerprojekt nach zehn Jahren.

### 5.1.3 Spektrale Analyse

Wie schon im Vorgängerprojekt sind die Transmissionseinbussen im kurzwelligen Bereich stärker ausgeprägt. Dies deutet auf eine Akkumulation kleiner Schmutzpartikel. Erstaunlicherweise zeigen alle Glasproben mit AR-Schicht ein ähnliches „Degradationsverhalten“. Vergleicht man die Transmissionspektren der gereinigten Proben mit den Referenzspektren, so kann bei allen Gläsern (zumindest in Davos) ein Transmissionsgewinn im Subprozentbereich über einen breiten Wellenlängenbereich um 1000 nm ausgemacht werden. Ein ähnlicher Effekt wurde auch in der Vorgängerstudie und von anderen Autoren bei eisenhaltigem Floatglas beobachtet. Dieser wurde auf eine Fotooxidation des  $Fe^{2+}$  Ions zurückgeführt. Dadurch wird die breite Absorptionsbande dieses Ions im Wellenlängenbereich um 1000 nm etwas abgeschwächt und die Transmission nimmt zu. Weil es sich bei den hier untersuchten Proben aber durchwegs um eisenarmes Solarglas handelt, bei dem der Eisengehalt und insbesondere der Oxidationszustand  $Fe^{2+}$  schon bei der Herstellung minimiert wurde, ist eine Fotooxidation in dieser Grössenordnung unwahrscheinlich. Die Antireflexeigenschaften der hier getesteten Gläser werden hauptsächlich durch einen Interferenzeffekt verursacht. Dabei überlagern sich die Reflexionsstrahlen der Vorderseite der AR-Schicht (Übergang Luft/Schicht) und der Rückseite der AR-Schicht (Übergang Schicht/Glas). Wenn die Wellen dieser beiden Strahlen um eine halbe Wellenlänge verschoben sind, löschen sie sich gegenseitig aus. Dazu muss die Schichtdicke ein Viertel der Wellenlänge betragen. Die AR Eigenschaft der Schichten sind also wellenlängenabhängig, mit einem Transmissionsmaximum für Wellenlängen, die vier Mal länger als die Schichtdicke sind. Um einen maximalen Effekt zu erzielen, werden die Schichtdicken meist so gewählt, dass das Transmissionsmaximum im Wellenlängenbereich von 500-600 nm liegt. Die Transmissionszunahme im Wellenlängenbereich über diesem Peak könnte mit einer Verschiebung des Transmissionspeaks, also einem Anstieg der optischen Schichtdicken erklärt werden. Insbesondere weil sie mit einer Transmissionsabnahme im kurzwelligen Bereich unter ca. 500 nm einhergeht. Zur Kontrolle wurden einige Referenzgläser, welche in geschützter Umgebung archiviert wurden, nachgemessen. Diese zeigten ebenfalls eine leichte Tendenz zur Transmissionsabnahme im kurzwelligen Bereich. Der Effekt ist aber deutlich weniger stark ausgeprägt, als bei den exponierten Proben.

## 5.2 Studie zur Verschmutzung von Oberflächen für den Einsatz in der Solartechnik (AP2)

- Die Menge an angesammeltem Staub und Schmutz auf der Oberfläche des PV-Moduls und Solarkollektors beeinflusst die gesamte Energie, die täglich, monatlich, saisonal und jährlich geliefert wird.
- Verschmutzung ist ein komplexes Thema, das von mehreren Faktoren abhängt, wie Standort, Systemauslegung, Klima, Oberflächenbeschaffung usw.
- Blätter, Vogelkot und Schmutzflecken, die einige Zellen eines PV-Moduls, aber nicht das ganze blockieren, können einen starken Einfluss auf PV-Module haben.
- Zusammenfassend kann man die Ablagerung von Schmutz grundsätzlich auf zwei Arten klassifizieren: physikalisch und chemisch gebundene Schmutzpartikel.
- Um eine langfristige Funktionsfähigkeit der solaren Systeme zu gewährleisten, ist es wichtig, für die auftretenden Verschmutzungen die richtige Reinigungsmethode anzuwenden. Es gibt den präventiven und den regenerierenden Ansatz zur Vermeidung von Verschmutzungen.



- Es existieren eine Vielzahl von Normen zu Testverfahren von optischen Schichten und Oberflächen. Jedoch fehlt ein einheitliches Testverfahren, das die Degradation von beschichtete Oberflächen von solaren Systemen unter Berücksichtigung der Temperaturdegradation, Einwirkung von Kondenswasser, Luftfeuchtigkeit, Korrosion und Verschmutzung betrachtet.

### 5.3 Aufbau eines Abrasionstests (AP3)

Basierend auf IEC NP 62862-3-3 wurde ein Abrasionstester aufgebaut und eine Abrasionsprüfung an einem AR beschichteten Glasrohr durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass die solare Transmission des Prüflings mit wachsender Anzahl Abrasionszyklen stetig abnimmt (siehe Abb. 4.3.3). Nach den in der Norm vorgeschrieben 100 Prüfzyklen ist der solare Transmissionsgrad von ursprünglich 96.7% auf 95.9% abgefallen. Der Norm folgend, ist also über die Lebensdauer des Receiver-Hüllrohres, mit einer entsprechenden Effizienzeinbusse der Solaranlage, aufgrund von Reinigung, Sandstürmen und anderen mechanischen Einflüssen, zu rechnen. Auf die Qualität und Langzeitbeständigkeit der Schicht lässt dieses Ergebnis aber nur sehr bedingt Rückschlüsse zu.

Die Ursache für dieses Manko liegt darin begründet, dass durch die Prüfung zwar eine Transmissions-einbusse aufgrund der Degradation der Schicht ermittelt wird, diese aber in Relation zur Transmission eines ganzen Bauteils (in diesem Fall AR Schicht – Glas – AR Schicht) gesetzt wird. Die Transmission des Bauteils ohne die geprüfte Schicht (bzw. der durch die Schicht erzielte Transmissionsgewinn) ist nicht bekannt. Dieser Mangel an Information schafft Raum für (Fehl-)Interpretationen, welche zu einer falschen Beurteilung der Beständigkeit der Schicht führen können. Es ist nicht bekannt, ob der durch die Beschichtung erzielte positive Effekt durch die Prüfung nur marginal beeinträchtigt worden ist, oder ob die Schicht möglicherweise bereits ganz verschwunden ist (darauf könnte die nur noch leichte Abnahme der Transmission um lediglich 0.1%-Punkte nach den letzten 50 Zyklen gegenüber einer Abnahme um 0.7%-Punkte nach den ersten 50 Zyklen hindeuten).

Ideal wäre also, wenn neben dem Transmissionsgrad des Glases mit der zu prüfenden AR Schicht auch derjenige ohne diese Schicht bekannt wäre. Dies ist bei einseitig beschichteten Gläsern kein Problem, da letzterer einfach vor der Beschichtung gemessen werden kann. Bei zweiseitiger Beschichtung ist dies jedoch nur möglich, solange beide Schichten in zwei getrennten Prozessschritten aufgebracht werden. Ist dies nicht der Fall, kann der unbekannte Transmissionsgrad (ohne zu prüfende Schicht) durch eine der folgenden Methoden ermittelt werden:

1. Steht das unbeschichtete Glas zur Verfügung, können aus der Messung des Transmissionsgrades  $\tau$  und Reflexionsgrades  $\rho$  bei nahe senkrechtem Einfall sowie der Glasdicke  $d$ , die Werte für dessen Brechungsindex  $n_{GI}$  und Extinktionskoeffizienten  $K_{GI}$  rechnerisch ermittelt werden. Da des Weiteren der Transmissionsgrad mit beidseitiger AR Schicht bekannt ist, kann, folgt, unter Berücksichtigung von Mehrfachreflexionen an den Grenzflächen und der Annahme, dass die auf das Glas aufgetragenen AR Schichten keine Absorption aufweisen, daraus Brechungsindex der beiden AR Schichten. Mit den nun bekannten optischen Konstanten für das Glas und die AR Schicht kann nun auch der Transmissionsgrad für das einseitig beschichtete Glas bestimmt werden.
2. Steht kein unbeschichtetes Glas zur Verfügung, besteht die Möglichkeit, die Abrasionsprüfung über die durch die Norm vorgeschriebenen 100 Zyklen hinaus solange fortzusetzen, bis sich die Transmission durch zusätzliche Zyklen nicht mehr weiter verringert. Die Wahrscheinlichkeit ist gross, dass dann ein Stadium erreicht ist, bei welchem die AR Schicht vollständig entfernt ist und der Transmissionsgrad  $\tau_{1AR}$  des einseitig beschichteten Glases gemessen wird.

Beide Methoden haben offensichtlich ihre Schwächen. So wird bei der ersten Methode vorausgesetzt, dass die beiden AR Schichten auf den zwei Seiten des Glases identisch sind. Dies ist bei im Tauchverfahren auf plane Gläser aufgetragenen Sol-Gel Schichten mit relativ hoher Sicherheit der Fall.



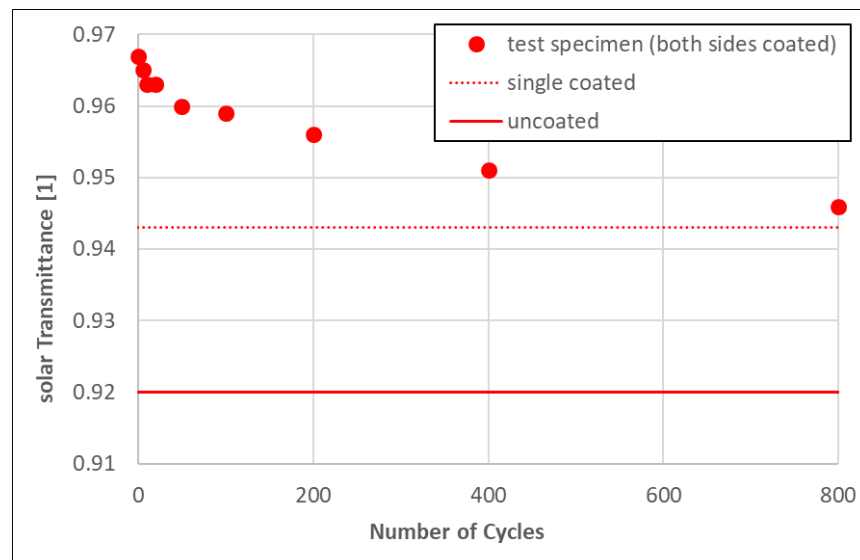
Bei Glasrohren aber kann davon nicht unbedingt ausgegangen werden. Zwar werden auch hier beide Schichten im gleichen Arbeitsgang aufgetragen. Allerdings hängen die Eigenschaften der endgültigen Schicht nicht nur von der verwendeten Sol-Gel-Lösung und der Geschwindigkeit beim Herausziehen des Glases aus der Lösung ab, sondern auch von den Eigenschaften der die Schicht umgebenden Atmosphäre beim Trocknen. Und diese kann sich auf der Aussenseite des Rohres durchaus von derjenigen im Inneren des Rohres unterscheiden.

Bei der zweiten Methode besteht das Problem darin, dass ein trotz zusätzlicher Prüfzyklen konstant bleibender Transmissionsgrad nicht mit 100%iger Sicherheit auf eine vollständige Entfernung der Schicht schließen lässt. In vorliegendem Beispiel könnte z.B. bereits nach 20 Zyklen darauf geschlossen werden, dass die Schicht entfernt sei, da die Transmission gegenüber dem Zustand nach 10 Zyklen sich nicht weiter verschlechtert hat. Was offensichtlich aber eine Fehlinterpretation wäre.

Auf den in diesem Projekt untersuchten Prüfling wurden beide beschriebene Methoden angewendet. Für das unbeschichtete Glasrohr wurde der Transmissionsgrad  $\tau = 0.920$  und der Reflexionsgrad  $\rho = 0.072$  gemessen. Daraus folgt für das Glas, mit einer Wandstärke von  $d = 2$  mm, ein Brechungsindex von  $n_{GI} = 1.481$  und ein Extinktionskoeffizienten von  $K_{GI} = 4.017/m$ . Um den Transmissionsgrad dieses Glases durch beidseitige AR Beschichtung auf  $\tau_{2AR} = 0.967$  (Messwert) zu steigern, müssen diese beiden Schichten einen Brechungsindex von  $n = 1.310$  aufweisen. Mit einer nur einseitigen Beschichtung würde dieses Glas dann eine Transmission von  $\tau_{1AR} = 0.943$  aufweisen.

Für die zweite Methode wurde der Abrasionstest über die bereits angewendeten 100 Prüfzyklen hinaus zunächst fortgeführt (siehe Abb. 5.3.1). Der Test wurde abgebrochen, nachdem sich auch nach 800 Prüfzyklen noch immer eine weitere Einbusse an Transmission einstellte. Im Anschluss daran wurde die Prüffläche händisch, und unter Einwirkung eines hoch abrasiven Schleifgummis mit der mindestens 10-fachen Auflagekraft der Norm, bearbeitet, bis sich die Transmission nicht mehr weiter verschlechterte. Der dadurch erreichte Wert sollte der des einseitig beschichteten Glases sein und wird hier mit  $\tau_{1AR} = 0.943$  bestimmt, was genau dem rechnerisch ermittelten Wert aus der ersten Methode entspricht.

Abb. 5.3.1: Abnahme der solaren Transmission bei Fortführung der Abrasionsprüfung über die in der Norm vorgegeben 100 Zyklen hinaus.



Die wichtigsten Daten zum durchgeführten Abrasionstest sind in Abbildung 5.3.1 zusammengefasst. Die solare Transmission des Prüflings (rote Punkte) fällt von Ursprünglich 96.7% nach 100 (in der IEC NP 62862-3-3 geforderten) Prüfzyklen auf 95.9% ab. Eine Weiterführung des Abrasionstests bis insgesamt 800 Zyklen führt zu einer weiteren Abnahme der Transmission, woraus geschlossen werden kann, dass die AR Schicht noch nicht vollständig entfernt ist. Die Grenzwerte für ein einseitig beschichtetes bzw. unbeschichtetes Glas sind als horizontale Linien dargestellt.



Nach IEC NP 62862-3-3 ist also, während der Lebensdauer des Glasrohres, mit einem Verlust von 0.8% an solarer Transmission zu rechnen, welcher durch Reinigung und weitere mechanische Einflüsse (wie etwa Sandstürme) verursacht wird. Dies scheint, angesichts eines Ausgangswertes von 96.7% durchaus akzeptabel zu sein, was aber vom jeweiligen Betreiber zu bewerten ist.

Für die Beurteilung der Stabilität von (unterschiedlichen) AR Schichten ist es aber zweckmässiger, die Funktionalität der AR Schicht isoliert zu betrachten. In vorliegendem Fall wird durch die (einseitige) AR Schicht die solare Transmission um 2.4% (abs.) von 94.3% auf 96.7% erhöht. Nach erfolgtem Abrasionstest verbleiben davon jedoch nur noch 1.6% (abs.). Dies bedeutet, dass die AR Schicht eine Einbusse von 33% aufweist.

## 5.4 Aufbau eines Messgerätes für die Spekulare Reflexionsmessung (AP4)

Um den gerichteten Reflexionsgrad  $\rho_s$  von spiegelnden bzw. wenig streuenden Reflektoren messen zu können, wurde ein neuer Messplatz aufgebaut. Da die Anforderungen an die Spekularität stark vom Einsatzzweck der Reflektoren abhängig ist, muss  $\rho_s$  für unterschiedliche Akzeptanzaperturen bestimmt werden können. Laut Empfehlung der "SolarPACES Reflectance Guideline" [27] sollten Werte für  $\rho_s$  für Akzeptanzaperturen mit einem (halben) Akzeptanzwinkel  $\varphi$  von 3.5, 7, 12.5 und 23 mrad angegeben werden.

Das grundlegende Messprinzip zur Bestimmung von  $\rho_s(\varphi)$  beruht auf einer Lichtquelle, welche einen kollimierten Lichtstrahl ohne Ausdehnung erzeugt, in Kombination mit einem Detektor, der den gesamten von der zu charakterisierenden Oberfläche reflektierten und durch eine Apertur mit halbem Öffnungswinkel  $\varphi$  treffenden Lichtstrom misst. Nun stellt jedoch zum einen ein kollimierter Lichtstrahl ohne räumliche Ausdehnung eine nicht erreichbare Idealisierung dar. Zum anderen ist eine Ausdehnung des Lichtstrahls durchaus erwünscht, um nicht nur einen einzelnen Punkt, sondern vielmehr eine grössere Fläche auf dem Reflektor charakterisieren zu können.

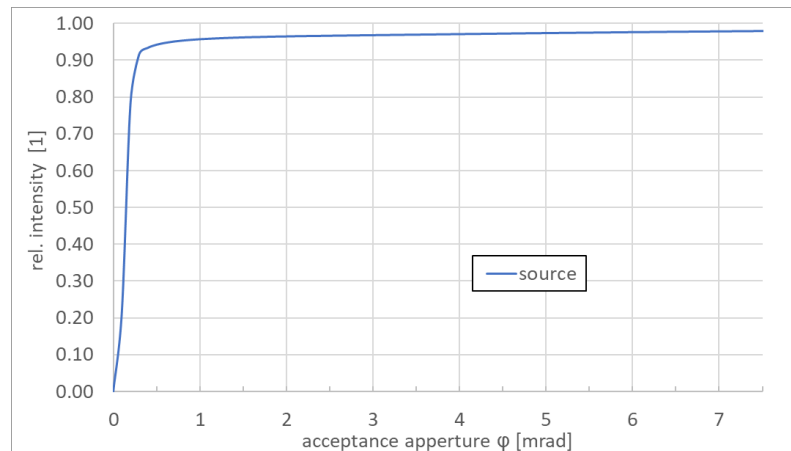
Daher wurde im Rahmen dieses Projektes ein anderes Messprinzip verfolgt, welches aus einer möglichst gut kollimierten aber ausgedehnten Lichtquelle in Kombination mit einer Leuchtdichtkamera als Detektor besteht. Mit der gewählten Optik entspricht jedem Pixel auf dem CCD-Chip der Kamera genau eine Einfallrichtung des an der Probe gestreut reflektierten Lichts. Zusammen mit einer Dunkelmessung sowie einer Messung der Lichtquelle direkt kann dann  $\rho_s(\varphi)$  für beliebige  $\varphi$  bestimmt werden.

Eine wichtige Voraussetzung ist dabei, dass die Divergenz der Lichtquelle klein ist im Vergleich zur zu messenden Akzeptanzapertur. Mit einem Divergenzwinkel  $< 0.2$  mrad (HWHM) gegenüber einer minimalen Akzeptanzapertur von 3.5 mrad kann dies als gegeben betrachtet werden.

Genauere Betrachtungen der mit der LD-Kamera vermessenen Lichtquelle hat jedoch gezeigt, dass die gesamte, innerhalb der Akzeptanzapertur liegende Intensität, mit zunehmendem Akzeptanzwinkel zwar zunächst rasch ansteigt und bei 0.5 mrad 95% erreicht, im weiteren Verlauf aber extrem abflacht und erst bei 17.5 mrad 99% überschreitet (Abb. 5.4.1). In der Praxis wird der in Abbildung 5.4.1 dargestellte Graph  $I(\varphi)$  so ermittelt, dass die Intensitäten aller Pixel auf dem Chip, welche innerhalb eines durch  $\varphi$  gegebenen Kreises um den Intensitätsschwerpunkt liegen, summiert werden, und diese Summe durch die Gesamtsumme aller Pixelintensitäten geteilt wird. Daher nimmt mit linear zunehmendem  $\varphi$  die Anzahl der Pixel quadratisch zu, so dass den vom Zentrum weiter entfernten Pixeln ein grösseres Gewicht zukommt. Dies hat zur Folge, dass, obwohl die Intensität oberhalb 17.5 mrad gegenüber dem Intensitätsmaximum auf deutlich unter  $10^{-6}$  abgefallen ist, die Gesamtintensität ausserhalb einer Akzeptanzapertur von 17.5 mrad immer noch bei ca. 1% liegt.



Abb. 5.4.1: Intensität der Lichtquelle mit zunehmender Akzeptanzapertur  $\varphi$ .



## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick

### 6.1 Untersuchung von wetterexponierten Proben (AP1)

Die guten Resultate nach sieben Jahren Exposition in Davos und nach der Reinigung der exponierten Proben in Rapperswil zeigen, dass die weit verbreiteten porösen  $\text{SiO}_2$  Antireflexschichten grundsätzlich über eine gute Langzeitstabilität bei natürlicher Bewitterung verfügen. Dies ist insofern bemerkenswert, als dass diese Schichten auf Beeinträchtigungen durch Feuchte oder Berührungen sensibel reagieren. Aufgrund der porösen Struktur bleiben Fingerabdrücke deutlich sichtbar und Kontakt mit Wasser kann zu Transmissionseinbussen führen.

Zum Zeitpunkt der Materialauswahl und dem Start dieser Studie waren AR-Schichten noch wenig verbreitet. Daher gibt es auch noch wenige wissenschaftlich dokumentierte Langzeiterfahrungen über deren Stabilität bei Freilandbewitterung. Mittlerweile haben sich AR-Schichten, zumindest im PV Markt, grossflächig durchgesetzt. Die hier dokumentierte gute Langzeitstabilität aller Schichten kann das Vertrauen in diese Technologie weiter bestärken.

Aufgrund der deutlichen Transmissionseinbussen durch Verschmutzung in Rapperswil, kann eine periodische Reinigung von Solaranlagen (ca. alle zwei bis drei Jahre) für gewisse Standorte klar empfohlen werden. Weil nur zwei Standorte ausgewählt wurden, kann aber nicht näher eingegrenzt werden bei welchen Standorten dies nötig ist.

### 6.2 Studie zur Verschmutzung von Oberflächen

Aufbauend auf der Studie zur Verschmutzung von beschichteten Oberflächen soll ein standardisiertes Testverfahren für beschichtete Solarkomponenten vorgeschlagen werden. Diese Aufgabe erweist sich jedoch als herausfordernd, da die Studie die hohe Komplexität des Verschmutzungsthemas aufweist. Mit der jetzigen allgemeinen Kenntnislage wird es schwierig werden ein Testverfahren zu entwickeln, das für unterschiedliche beschichtete Komponenten, Verschmutzungsarten, Reinigungsmechanismen und insbesondere unterschiedlichen Standorten gilt. Es ist jedoch vonnöten ein solches Testverfahren zu entwickeln, da die Auswirkung von Verschmutzung nicht nur zur Degradierung von Komponenten, sondern auch zu wirtschaftlichen Verlusten führen kann. Daher wäre eine detaillierte standortabhängige Untersuchung hilfreich um mehr über die Verschmutzungsvorgänge zu lernen.



### 6.3 Aufbau eines Abrasionstests (AP3)

Ein auf IEC NP 62862-3-3 basierender Abrasionsteststand wurde aufgebaut und in Betrieb genommen, mit welchem nicht nur beschichtete Glasrohre beinahe beliebigen Durchmessers, sondern darüber hinaus auch flache Glasscheiben geprüft werden können.

Dem Normentwurf folgend wurde ein Abrasionstest an einem anti-reflex beschichteten Borosilikatglasrohr mit 70 mm Durchmesser durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass mit diesem Test die Veränderung im solaren Transmissionsgrad aufgrund der abrasiven Einwirkung ermittelt werden kann. Eine Schwäche des Prüfverlaufs laut Norm ist, dass danach keine Information zum solaren Transmissionsgrad ohne die geprüfte anti-reflex Beschichtung ermittelt wird. Es kann also am Ende der Prüfung keine Aussage gemacht werden, zu welchem Grad die ar-Schicht durch die Prüfung in Mitleidenschaft gezogen worden ist. Dazu müssten Informationen zu Effizienz der geprüften Schicht bzgl. des Transmissionsgrades vorliegen.

Bei einseitig beschichtetem Glas ist dies einfach möglich, indem Transmissionsmessungen im unbeschichteten sowie im beschichteten Zustand (vor der Prüfung) durchgeführt werden. Für beidseitig beschichtetes Glas ist die Bestimmung der Effizienz einer Schicht in der Regel nicht mehr so einfach möglich. Im Rahmen dieses Projektes wurden jedoch zwei Möglichkeiten vorgeschlagen, wie diese dennoch ermittelt werden kann.

### 6.4 Aufbau eines Messgerätes für die Spekulare Reflexionsmessung (AP4)

Der neue Messplatz für die Messung von spiegelnden Reflektoren wurde aufgebaut und in Betrieb genommen. Die Divergenz der Lichtquelle hat sich mit 0.2 mrad (HWHM) der Theorie entsprechend als ausgezeichnet bestätigt. Mit der LD-Kamera werden jedoch auch noch für relativ grosse Winkelabweichungen sehr kleine Intensitäten im Bereich von  $10^{-7}$  bis  $10^{-6}$  (bezogen auf das Intensitätsmaximum) gemessen. Dies führt zu Unsicherheiten bei der Bestimmung des gerichteten Reflexionsgrades  $\rho_s$  für Akzeptanzaperturen  $\varphi = 3.5$  mrad bzw.  $\varphi = 23$  mrad von bis zu 3% bzw. 0.7%.

Erste Versuche deuten darauf hin, dass die Ursache für die Messung dieser geringen Restintensitäten nicht bei der Lichtquelle liegen, sondern möglicherweise Artefakte der LD-Kamera sind. Ob dies so ist, muss in weiteren Versuchen geklärt werden.



## 7 Referenzen

- [1] F. B. S. Ruesch, «Langzeit-Alterungsuntersuchung an Abdeckungsmaterialien für thermische Sonnenkollektoren,» Datenbank Energieforschung, 2008.
- [2] M.S. El-Shobokshy, «Effect of the dust with different physical properties on the performance of photovoltaics cells,» Bd. 51, pp. 505-511, 1993.
- [3] M.S. El-Shobokshy, «Degradation of photovoltaic cell performance due to dust deposition on to its surface,» *Renewable Energy*, Bd. 3, pp. 585-590, 1993.
- [4] G.A Mastekbayeva, «Effect of the dust on the transmittance of low density polyethylene glazing in a tropical climate,» *Solare Energy*, Bd. 68, pp. 135-141, 2000.
- [5] S.A. Kalogirou, «Onsite PV characterization and the effect of soiling on their performace,» *Energy*, Bd. 51, p. 439446, 2013.
- [6] j. Zorilla-Casanova, «Analysis of dust losses in photovolataic modules,» in *World Renewable Energy Congress Sweden, Photovolataic Technology*, 2011.
- [7] M.R. Maghami, «Power loss due to soiling on solar panel: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 59, pp. 1307-1316, 2016.
- [8] C.A. Pio, «Atmospheric aerosol and soiling of external surfaces ina n urban environmental,» *Atmospheric Environment*, Bd. 32, pp. 1979-1989, 1998.
- [9] [Online]. Available: <https://www.88energie.de/photovoltaikmodule-schaeden-durch-flechten-pilze-moose-1503494.html/>.
- [10] E. Cuddihy, «Soiling Mechanism and Performance of Anti-Soiling Surface Coatings,» *Particles on Surfaces I*, pp. 91-111, 1988.
- [11] K. Tator, Coating Deterioration, protective Organic Coatings, Bd. Bd. 5B, ASM Handbook, 2015, pp. 462-473.
- [12] E.F. Cuddihy, «Anti-soiling Technology:Theories of surface soiling and performace of anti-soiling surface coatings,» NASA, 1984.
- [13] V. Nair.United States Patent US8,864,897 B2, 2011.
- [14] T. Lorenz, *Energy Procedia*, pp. 749-756, 2014.
- [15] H. H. a. B. B. Woertz, «The performance of flat plate solar energy collectors,» *ASME Trans*, Bd. 64, pp. 299-302, 1942.
- [16] R. Appels, *Solar Energy*, Bd. 96, pp. 283-291, 2013.
- [17] M. Mani, «Impact of dust on solar photovoltaic performace,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 14, pp. 3124-3131, 2010.
- [18] T. Sarver, «A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 22, pp. 698-733, 2013.
- [19] M. Dudita, «Durability of solar selective absorbers under condensation test,» in *25. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, 6.-8. Mai 2015, Kloster Banz, Bad Staffelstein*, 2015.
- [20] Bo Carlsson, «Recommended qualification test procedure for solar absorber surface durability,» IEA SHC Task 27 Performace of SOLar Facade Components, 2004.



- [21] C. Völker, «Development of a test method for the investigation of the abrasive effect of sand particles on components of solar energy systems,» in *29th European PV Solar Energy Conference and Exhibition*, Amsterdam, The Netherlands, 2014.
- [22] K.C. Datsiou, «Artificial ageing of glass with sand abrasion,» *Construction and Building Materials*, Bd. 142, pp. 536-551, 2017.
- [23] F. Sallaberry, «Towards standard testing materials for high temperature solar receivers,» *Energy Procedia*, Bd. 69, pp. 532-542, 2015.
- [24] *ISO 9211-4 Optics and photonics-Optical coatings- Part4: Specific test methods*, ISO, 2012.
- [25] *EN 1096-1 Glass in building- Coated glass- Part1: Definitions and classification*, European Standard, 2011.
- [26] [Online]. Available: <http://www.spf.ch/Zertifizierung.94.0.html>.
- [27] SolarPACES, «SolarPACES Reflectance Guideline. Parameters and Method to Evaluate the Solar Reflectance Properties of Reflector Materials Concentrating Solar Power Technology – Version 2.5.,» 2013. [Online]. Available: [http://www.solarpaces.org/Tasks/Task3/reflectance\\_guideline.htm](http://www.solarpaces.org/Tasks/Task3/reflectance_guideline.htm); June 2013)..
- [28] P. Good und e. al, «Spectral reflectance, transmittance and angular scattering of materials for solar concentrators,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Bd. 144, pp. 509-522, 2016.
- [29] A. Heimsath, G. Kutscheidt und P. Nitz, «Detailed optical characterization of reflector materials for CSP applications,» in *16th Solar Power and Chemical Energy Systems International Symposium*, Granada, Spain, 2010.
- [30] A. Heimsath, G. Kutscheidt und P. Nitz, «Measuring reflectance - Overview and influence on optical performance,» in *17th Solar Power and Chemical Energy Systems International Symposium*, Granada, Spain, 2011.
- [31] R. B. Pettit, «Characterization of the reflected beam profile of solar mirror materials,» *Solar Energy*, Bd. 19, pp. 733-741, 1977.
- [32] A. Rabi, «Active Solar Collectors and their Applications,» Oxford University Press, New York, 1985.
- [33] B. Empa, «Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe 2014 (NABEL),» Bundesamt für Umwelt, 2014.
- [34] J. Ansorg, «Pilzbefall von Solarstromanlagen,» Department Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Umwelt, Kanton Aargau.
- [35] [Online]. Available: <http://solarsouthwest.co.uk/birds/>.
- [36] [Online]. Available: <https://www.waaree.com/soiling-losses-introduction-and-effects>.
- [37] W.J. Jamil, «Performance degradation of photovoltaic power system: Review on mitigation methods,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 67, pp. 876-891, 2017.
- [38] [Online]. Available: <https://www.dlg.org/de/landwirtschaft/themen/technik/technik-tierhaltung/dlg-merkblatt-414/>.
- [39] T. Weber, *Impact & Consequences of Soiling and Cleaning of PV Modules*, Denver: Photovoltaik-Institut Berlin, 2015.
- [40] S. C. e. al., «Dust and soiling issues and impact relating to solar energy systems: Literature review update for 2012-2015,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 63, pp. 33-61, 2016.