



Solartechnik  
Prüfung  
Forschung

Institut für Solartechnik SPF  
HSR Hochschule für Technik Rapperswil  
Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil  
Tel. +41 55 222 48 21, Fax +41 55 222 48 44  
[www.solarenergy.ch](http://www.solarenergy.ch)



HSR  
HOCHSCHULE FÜR TECHNIK  
RAPPERSWIL

## Langzeit-Alterungsuntersuchung an Abdeckungsma- terialien für thermische Sonnenkollektoren

Autoren Florian Ruesch<sup>1</sup>, Stefan Brunold<sup>1</sup>, Ueli Frei<sup>2</sup>, Thomas Häuselmann<sup>1</sup>,  
Elmar Frank<sup>1</sup>

Datum Februar 2008

<sup>1</sup> Institut für Solartechnik SPF, Hochschule für Technik Rapperswil HSR,  
Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil

<sup>2</sup> Inzwischen Interfloat Corp., Fürst-Franz-Josef Str. 19, FL-9493 Mauern



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Swiss Federal Office of Energy SFOE

# 1 Inhaltsverzeichnis

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Inhaltsverzeichnis .....   | 2  |
| 2     | Einleitung.....  | 3  |
| 3     | Versuchsaufbau und Durchführung .....                                  | 5  |
| 3.1   | Auswahl der Proben.....  | 5  |
| 3.2   | Meteorologische Daten der Standorte .....                              | 7  |
| 3.3   | Exponierung der Proben .....   | 8  |
| 3.4   | Beurteilung der optischen Eigenschaften der Proben .....               | 11 |
| 3.5   | Beurteilung der Verschmutzung und der Degradation .....                | 14 |
| 4     | Präsentation und Diskussion der Messdaten .....                        | 15 |
| 4.1   | Übersicht über Solare Transmission der verschiedenen Materialien ..... | 15 |
| 4.2   | Übersicht der Formen und Strukturen.....                               | 18 |
| 4.3   | Verschmutzung der verschiedenen Materialien.....                       | 19 |
| 4.4   | Bleibende Transmissionsverluste und Materialdegradation .....          | 25 |
| 4.5   | Betrachtung der einzelnen Materialgruppen.....                         | 29 |
| 4.5.1 | Gläser .....   | 29 |
| 4.5.2 | Polymethylmetacrylat (PMMA) .....                                      | 33 |
| 4.5.3 | Polycarbonat (PC) .....  | 38 |
| 4.5.4 | Fluorierte Kunststoffe.....  | 44 |
| 4.5.5 | Ungesättigtes Polyester (UP) .....                                     | 47 |
| 4.5.6 | Polyvinylchlorid (PVC) und Polyethylen Terephthalat (PET) .....        | 49 |
| 4.6   | Zweitabdeckungen .....   | 50 |
| 5     | Schlussfolgerungen .....   | 53 |
| 5.1   | Verschmutzung .....  | 55 |
| 5.2   | Degradation.....   | 56 |
| 6     | Danksagung .....   | 58 |
| 7     | Literatur .....  | 58 |

## 2 Einleitung

Ein Grossteil des weltweiten Energiekonsums wird durch fossile Brennstoffe gedeckt. Die Folgen sind bekannt: Der Anstieg des CO<sub>2</sub> Gehaltes in der Atmosphäre und die daraus resultierende globale Klimaerwärmung bergen grosse Gefahren. Ein rascher Umstieg auf CO<sub>2</sub> neutrale, erneuerbare Energien ist daher unabdingbar. Immer noch wird etwa die Hälfte der fossilen Brennstoffe zum Heizen verwendet, daher liegt hier das grösste Potential für die Substitution durch erneuerbare Energien, insbesondere Solarthermie. Denn Sonnenenergie ist im Prinzip mehr als genug vorhanden, und Solarthermie ist die einfachste und effizienteste Art ihrer Nutzung. Doch leider ist der Gewinn von Wärmeenergie aus Sonnenstrahlung durch die hohen Anlagekosten in der Regel immer noch teurer als das Verbrennen von fossilen Brennstoffen.

Um die relativ hohen Investitionen einer solarthermischen Anlage rechtfertigen zu können, ist es unbedingt nötig, verlässliche Daten zur Langzeitstabilität vorweisen zu können. Es ist wichtig, dass die gratis einfallende Sonnenenergie nach der Installation und dem damit verbundenen Kapitaleinsatz möglichst lange ausgenutzt werden kann. Daher sollten Kollektoren sehr langlebig sein. Grundsätzlich werden Lebenserwartungen von 20 Jahren und mehr erwartet. Das Nachlassen der solaren Transmission der Kollektorabdeckungen durch Verschmutzung oder Materialdegradation spielt für den altersbedingten Effizienzrückgang eine wichtige Rolle, da sich der optische Wirkungsgrad eines Kollektors über grosse Bereiche linear zu Transmission der Kollektorabdeckung verhält. Die meisten Hersteller können allerdings keine verbindlichen Angaben zur Wetterbeständigkeit in einem Zeitrahmen von über 20 Jahren machen.

In dieser Studie wurde untersucht, wie sich verschiedenste Materialien, die als Kollektorabdeckungen in Frage kommen, unter natürlichen Wettereinflüssen verhalten. Eine möglichst grosse Anzahl von Kandidaten wurde realistischen Bedingungen unter unterschiedlichen klimatischen Bedingungen sowie Umweltbelastungen exposiert. Das Transmissionsverhalten dieser Proben wurde dann über einen Zeitraum von 20 Jahren systematisch untersucht. Einige Proben wurden zusätzlich unter einem Glas mit hoher solarer Transmission exponiert, um deren Eignung als Zweitabdeckung, d.h. als isolierende Konvektionsbremse, zu testen.

Neue Materialien werden in beschleunigten Alterungsversuchen getestet. Um die Zuverlässigkeit solcher Alterungsuntersuchungen zu gewährleisten, müssen die daraus gewonnenen Ergebnisse durch echte Alterungsversuche unter natürlichen Bedingungen bestätigt werden. Diese Studie bietet eine grosse Anzahl an spektralen Daten verschiedenster Materialien, die zur Validierung dienen können.

Eine Möglichkeit, um Solarthermie wirtschaftlich konkurrenzfähiger zu machen, besteht im Einsatz von neuen Materialien. Konventionellerweise werden vor allem beschichtetes Kupfer als Absorber und eisenarme Gläser für die Abdeckung verwendet. Zurzeit wird der Einsatz von Kunststoffen vermehrt diskutiert, was eine deutliche Kostenreduktion zur Folge haben könnte. Einsparungen im Produktionsprozess und zu erwartende Verringerungen der Transport- und Installationskosten aufgrund

der Gewichtsreduktion bilden dabei die Hauptvorteile. In dieser Studie werden u.a. Daten zur Langzeitstabilität verschiedenster Kunststoffe präsentiert, die zum Abschätzen des Alterungsverhaltens von Kunststoffkollektoren von grosser Bedeutung sind.

Die Verschmutzung spielt für den Effizienzrückgang von Kollektoren eine nicht zu unterschätzende Rolle, der aber bisher wenig Bedeutung zugemessen wurde. In dieser Studie werden die verschmutzungsbedingten Verluste für die hinsichtlich der relevanten Umgebungsbedingungen unterschiedlichen Standorte Rapperswil (CH, 417 m ü. NN, typisches Klima des schweizerischen Mittellandes, städtischer Standort) und Davos (CH, 1556 m ü. NN, alpines Klima, ländlicher Standort) untersucht und quantifiziert.

### 3 Versuchsaufbau und Durchführung

#### 3.1 Auswahl der Proben

Die Studie zur Untersuchung der Langzeiteigenschaften von Kollektorabdeckungsmaterialien wurde 1984 gestartet. Eine Marktanalyse bei allen grösseren Herstellern ergab eine Fülle von Kandidaten. Daraus wurde eine Auswahl von 58 Abdeckungstypen getroffen:

**Tabelle 1** Übersicht der untersuchten Abdeckungstypen.

| Material               | Abdeckungstypen | Bezugsquellen | Kommentar   |
|------------------------|-----------------|---------------|---|
| Glas                   | 16              | 6             | 9 verschiedene Gläser, meist beidseitig exponiert. Gehärtete und ungehärtete Low Fe und Float Gläser. Teilweise mit Struktur. |
| PMMA                   | 15              | 5             | Flache, sinusförmige, und teilweise glasfaserverstärkte Proben sowie Stegdoppel- und Dreifachplatten.                         |
| PC                     | 13              | 3             | Flache Scheiben, Stegdoppelplatten sowie Folien. 2 Typen mit Entspiegelungsschicht wurden beidseitig exponiert.               |
| Fluorierte Kunststoffe | 6               | 2             | Folien aus 3 verschiedenen Materialien.   |
| UP                     | 3               | 1             | Flache und sinusförmige Platten, faserverstärkt.  |
| PVC                    | 3               | 2             | 2 Folien und eine Spezialplatte.  |
| PET                    | 2               | 2             | Folien.   |
| Total                  | 58              |               |   |

Diese Materialien entsprachen 1984 dem aktuellen Stand des Marktes. Die Auswahl bietet daher keinen vollständigen Überblick über die Materialien, die heute zur Verfügung stehen. Grundsätzlich lassen sich folgende Vor- und Nachteile der verschiedenen Materialgruppen zusammenfassen:

- **Glas:** Dank hoher solarer Transmission und guter Langzeitbeständigkeit werden im Kollektorbau bevorzugt eisenarme Gläser verwendet. Die preisgünstigeren eisenhaltigen Gläser weissen einen um etwa 5% - 10% geringeren solaren Transmissionsgrad auf. Im Vergleich zu den Kunststoffen hat Glas ein relativ hohes Gewicht. Um die thermisch induzierten Spannungen aufnehmen zu können muss das Glas gehärtet sein (ESG). Nach dem Härteten ist es mechanisch praktisch nicht mehr bearbeitbar. ESG ist an den Kanten empfindlich gegenüber mechanischer Beschädigung, so dass auf einen, auch

während der Betriebszeit des Kollektors, spannungsfrei bleibenden Einbau zu achten ist.

- **PMMA:** Der solare Transmissionsgrad von PMMA ist etwa vergleichbar mit demjenigen eisenhaltigen Glases. Es lässt sich vielfältig und splitterfrei bearbeiten und formen, ist deutlich leichter als Glas, verliert aber je nach Typ bereits bei Temperaturen ab etwa 80°C - 90 °C deutlich an Festigkeit, so dass es in modernen leistungsfähigen Flachkollektoren ohne Überhitzungsschutz nicht einsetzbar ist.
- **PC:** Polycarbonat besitzt grundsätzlich ähnliche Vor- und Nachteile wie PMMA. Das solare Transmissionsvermögen liegt aber um einige Prozentpunkte unter dem von PMMA, die Temperaturbeständigkeit ist dagegen besser und PC bietet auch bessere Brandschutzeigenschaften.
- **Fluorierte Polymere:** Grundsätzlich besitzen fluorierte Polymere eine sehr gute Beständigkeit gegenüber mechanischen Einwirkungen, Chemikalien und Umwelteinflüssen. Dünne Folien weisen einen solaren Transmissionsgrad auf, welcher denjenigen eisenfreien Glases um einige Prozentpunkte übertrifft. Die dauerhafte Fixierung von Folien als Kollektorabdeckung stellt aber eine anspruchsvolle Herausforderung dar. Insbesondere bei halogenierten Polymeren ist auf eine fachgerechte Entsorgung zu achten.
- **UP:** Composite-Platten aus glasfaserverstärktem Polyester zeichnen sich durch gute mechanische Eigenschaften bei geringer Plattenstärke aus. Durch wechselnde thermische Belastung können Probleme mit dem Glas-Kunststoff-Verbund auftreten.
- **PVC:** Ähnlich wie PMMA und PC bietet PVC einfache und vielfältige Verarbeitungsmöglichkeiten, die solare Transmissionsfähigkeit ist aber geringer. Auf eine fachgerechte Entsorgung ist, wie bei allen halogenierten Polymeren, besonders zu achten.
- **PET:** Dünne Folien aus PET liegen im solaren Transmissionsgrad zwischen PMMA- und PC-Platten einerseits und den fluorierten Polymerfolien andererseits. Es zeichnet sich durch gute Verarbeitungsmöglichkeiten, niedrige Materialkosten sowie gute Entsorgungs- bzw. Rezyklierungsmöglichkeiten aus.

Die Materialeigenschaften von Polymeren können durch Beimischung unterschiedlicher Zusätze stark beeinflusst werden. Daher haben die oben genannten Vor- und Nachteile nicht für alle Vertreter dieser Gruppen uneingeschränkte Gültigkeit.

In der folgenden Tabelle wird die in dieser Studie verwendete Namensgebung erläutert, präzise Angaben zu Hersteller und Typ können aus rechtlichen Gründen nicht gemacht werden.

**Tabelle 2** Bedeutung der verwendeten Bezeichnungen.

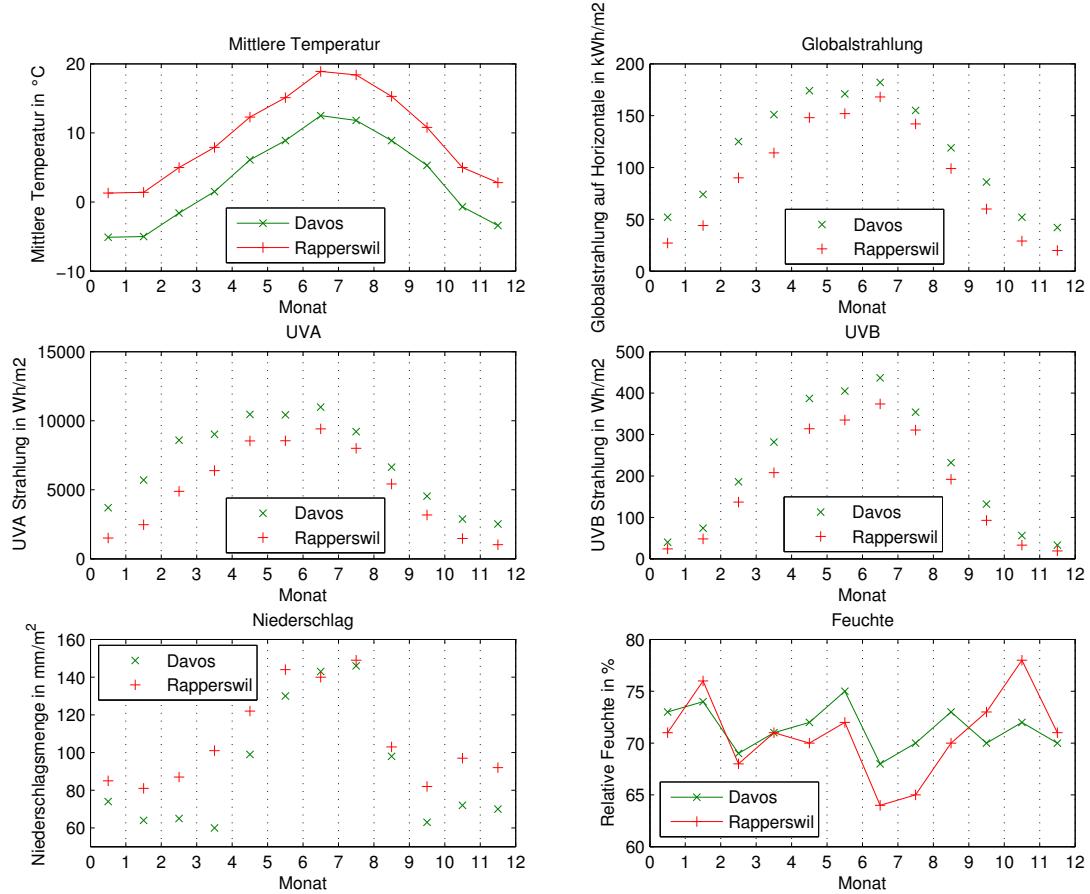
| Bezeichnung | Material                                      | Zusatz | : Bedeutung                       |
|-------------|---|--------|-----------------------------------|
| Gl          | : Glas  | oFe    | : Eisenarm                        |
| PMMA        | : Polymethylmetacrylat                        | mFe    | : Eisenhaltig                     |
| PC          | : Polycarbonat                                | fl     | : Flache Scheibe                  |
| PET         | : Polyethylen Terephthalat                    | fo     | : Folie                           |
| FEP         | : Fluoriertes Ethylen-Propylen                | Sin    | : Sinusförmige Wellenplatte       |
| ETFE        | : Mischpolymerisat: Tetrafluorethylen-Ethylen | SxP    | : Stegdoppel- oder Dreifachplatte |
| UP          | : Ungesättigtes Polyester                     |        |                                   |
| PVF         | : Polyvinylfluorid                            |        |                                   |
| PVC         | : Polyvinylchlorid                            |        |                                   |

### 3.2 Meteorologische Daten der Standorte

Als geeignete Exponierungsstandorte wurden Rapperswil und Davos ausgewählt. Rapperswil bzw. insbesondere der Standort der HSR, repräsentiert eine typisch städtische Umgebung bezüglich Luftschatstoffen und Schwebestoffen. Die solare Einstrahlung entspricht der für das schweizerische Mittelland üblichen Jahressumme und Verteilung über das Jahr. Davos hingegen liegt in den Alpen. Hohe jährliche, solare Einstrahlung mit hohem UV-Anteil, tiefe mittlere Umgebungstemperatur und deutlich weniger Luftschatstoffe bzw. Schwebestoffe, im Vergleich zu Rapperswil, charakterisieren das Klima. Detaillierter Informationen zu Klimadaten der Standorte (Einstrahlung, Temperatur, Niederschlag und Feuchte), die auf statistisch ausgewerteten Zeitreihen basieren (vgl. [1] ), können Fig. 1 entnommen werden.

**Tabelle 3** Vergleich der Exponierungsstandorte.

| Ortschaft                         | CH-8640 Rapperswil               | CH-7260 Davos Dorf               |
|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Höhe                              | 417 m ü. NN                      | 1556 m ü. NN                     |
| Längengrad                        | -8.82 °                          | -9.83°                           |
| Breitengrad                       | 47.20 °                          | 46.80°                           |
| Globalstrahlung horizontal        | 1093 kWh/m <sup>2</sup> jährlich | 1381 kWh/m <sup>2</sup> jährlich |
| Diffusstrahlung horizontal        | 649 kWh/m <sup>2</sup> jährlich  | 648 kWh/m <sup>2</sup> jährlich  |
| Jährliche Durchschnittstemperatur | 9.3 °C                           | 3.1 °C                           |



**Fig. 1** Vergleich der meteorologischen Gegebenheiten der beiden ausgewählten Standorte Davos und Rapperswil. Die meteorologischen Daten wurden mit dem Programm Meteonorm Version 5.1 [1] erzeugt.

### 3.3 Exponierung der Proben

Von den 58 verschiedenen Abdeckungstypen wurden an den Standorten Davos und Rapperswil je 5 Exemplare exponiert. Zusätzlich wurden von 12 Abdeckungstypen, die als Zweitabdeckung (Konvektionsbremse) geeignet schienen, wiederum je 2x5 Exemplare unter einem Glas exponiert. Dies ergibt eine Anzahl von 700 Proben die für die Langzeitstudie bereitgestellt werden mussten. Nach einer Expositionsdauer von 40 Tagen, 1, 3, 10 und 20 Jahren (siehe

Tabelle 4) wurden an beiden Standorten von jedem Abdeckungstyp eine Probe entnommen, spektral vermessen und eingelagert.

Die Proben wurden an beiden Standorten Richtung Süden ausgerichtet. Damit allfälliger Schnee abrutscht, wurde der Anstellwinkel mit  $60^\circ$  sehr steil gewählt. Dadurch war die über das Jahr gemittelte Belastung durch solare Einstrahlung in die Probenebene geringer als bei den für Sonnenkollektoren üblichen, flacheren Anstellwinkeln.

**Tabelle 4** Expositionszeitraum und Expositionsdauer.

|                       |   | Entnahme          | Expositionsdauer |
|-----------------------|---|-------------------|------------------|
| Start der Exponierung | : | 29. August 1985   | Referenz         |
| Erste Entnahme        | : | 14. Oktober 1985  | 40 Tage          |
| Zweite Entnahme       | : | 7. September 1986 | 1 Jahr           |
| Dritte Entnahme       | : | Ende August 1988  | 3 Jahre          |
| Vierte Entnahme       | : | Ende August 1995  | 10 Jahre         |
| Fünfte Entnahme       | : | Ende August 2005  | 20 Jahre         |



**Fig. 2** Prüfstände; links: Rapperswil, rechts: Davos

Die Belastung der Proben (Südorientierung, Anstellwinkel 60°) wurde mit Meteonorm 5.1 [1] für die beiden Standorte berechnet und in Tabelle 5 und Tabelle 6 dargestellt.

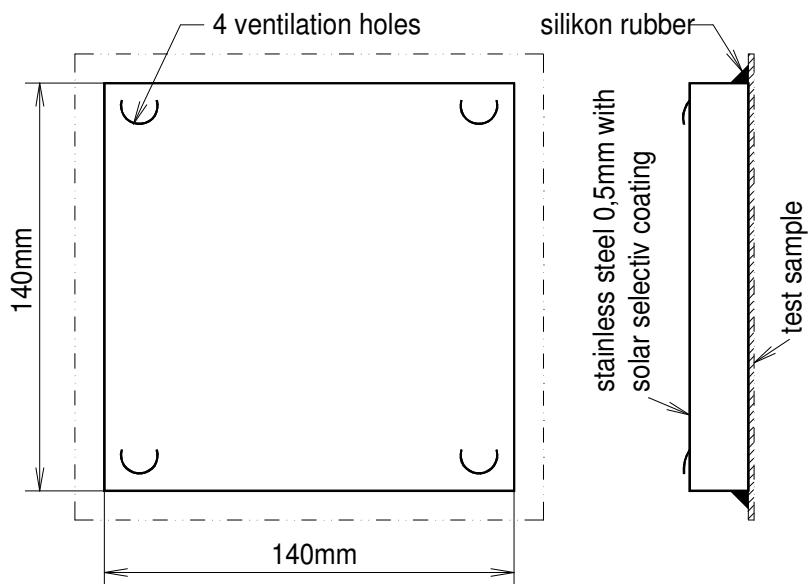
**Tabelle 5** Hemisphärische Einstrahlungssumme in die Probenebene  $H_G$ , Diffusstrahlungssumme für die Probenebene  $H_D$  für den Standort Davos.

| Davos                          | Jan. | Feb. | März | April | Mai | Juni | Juli | Aug. | Sep. | Okt. | Nov. | Dez. | Jahr |
|--------------------------------|------|------|------|-------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $H_G$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | 52   | 74   | 125  | 151   | 174 | 171  | 182  | 155  | 119  | 86   | 52   | 42   | 1382 |
| $H_D$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | 23   | 29   | 47   | 60    | 81  | 91   | 82   | 73   | 49   | 41   | 24   | 20   | 620  |

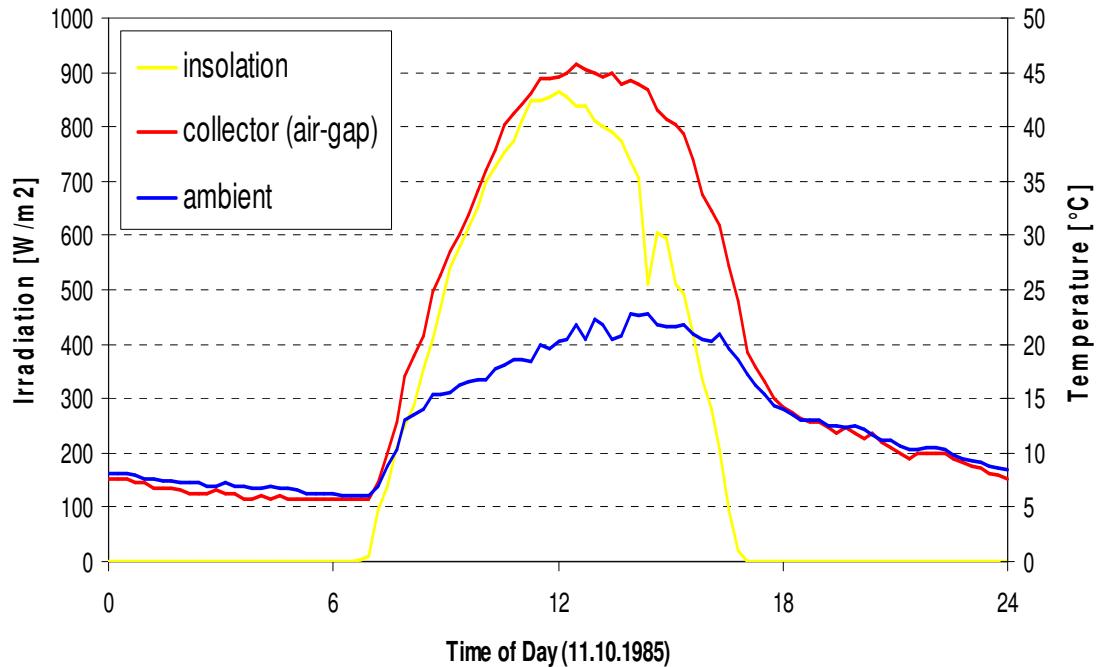
**Tabelle 6** Hemisphärische Einstrahlungssumme in die Probenebene  $H_G$ , Diffusstrahlungssumme für die Probenebene  $H_D$  für den Standort Rapperswil.

| Rapperswil                     | Jan. | Feb. | März | April | Mai | Juni | Juli | Aug. | Sep. | Okt. | Nov. | Dez. | Jahr |
|--------------------------------|------|------|------|-------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $H_G$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | 47   | 75   | 116  | 114   | 128 | 122  | 141  | 136  | 116  | 85   | 45   | 39   | 1162 |
| $H_D$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | 25   | 32   | 59   | 63    | 79  | 74   | 83   | 74   | 63   | 46   | 23   | 18   | 640  |

Um möglichst realistische, d.h. dem Betrieb eines Solarkollektors entsprechende Bedingungen zu erzeugen, erfolgte die Exponierung der Proben mittels Ersatzkollektoren. Dabei diente jede Probe als Abdeckung eines kleinen Kollektorgehäuses wie in Fig. 3 dargestellt. Das belüftete und rückseitig nicht wärmegedämmte Gehäuse besteht aus solarselektivem Edelstahlblech. In Fig. 4 wird der Verlauf der Sonneneinstrahlung, der Aussentemperatur und der Temperatur im Innern eines solchen Ersatzkollektors während eines sonnigen Tages dargestellt. Dabei wurden Mitte Oktober ca. 45°C Innentemperatur und weniger als 25 °C Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Aussentemperatur gemessen. Dies entsprach in etwa den Temperaturen die für Brauchwasserkollektoren mit Kunststoffabdeckung während dieser Jahreszeit erwartet wurden. Zwar traten im Sommer höhere Werte auf, aber die mittlere thermische Belastung war bezogen auf die gesamte Expositionsdauer eher geringer als bei modernen Flachkollektoren. Insbesondere fehlten die thermischen Belastungsspitzen, die bei Flachkollektoren im Falle von Stagnation auftreten.



**Fig. 3** Ersatzkollektor mit Abdeckungsprobe



**Fig. 4** Verlauf von Sonneneinstrahlung und Temperatur in einem Ersatzkollektor während eines sonnigen Tages.

### 3.4 Beurteilung der optischen Eigenschaften der Proben

Zur Quantifizierung möglicher Veränderungen der Abdeckungsmaterialien steht deren Leistungsfähigkeit, d.h. der solare Transmissionsgrad, im Vordergrund. Die Transmission der Referenz sowie der ersten 3 Entnahmen wurden mit einem Zeiss-Spektrometer mit Ulbricht-Kugel spektral vermessen [2]. Beim Zeiss-Spektrometer wird jede Wellenlänge manuell eingestellt und vermessen. Die Anzahl der gemessenen Wellenlängen wurde auf 34 beschränkt um den Aufwand in einem vertretbaren Rahmen zu halten. Damit kann der solare Transmissionsgrad hinreichend genau bestimmt werden. Für die Messung der Proben mit einer Expositionsdauer von 10 und 20 Jahren stand ein Fouriertransform-Spektrometer, ebenfalls gekoppelt mit einer Ulbricht-Kugel, zur Verfügung [3]. Die Anzahl der Messpunkte konnte damit drastisch erhöht werden. Es wurden jeweils Spektren im Bereich von 0.3 bis 2.5 µm aufgenommen. Der spektrale Vergleich der Messdaten beider Apparate ist infolge der unterschiedlichen spektralen Auflösung nur bedingt möglich. Insbesondere bei Kunststoffen mit zahlreichen Absorptionsbanden im Bereich von 0.8 bis 2.5 µm ist ein solcher Vergleich problematisch (s.u.).

Eine zentrale Grösse für die Bestimmung der Leistungsfähigkeit einer Kollektorabdeckung ist die solare Transmission  $\tau_{Solar}$ , die den Anteil an transmittierter Sonnenstrahlung beschreibt:

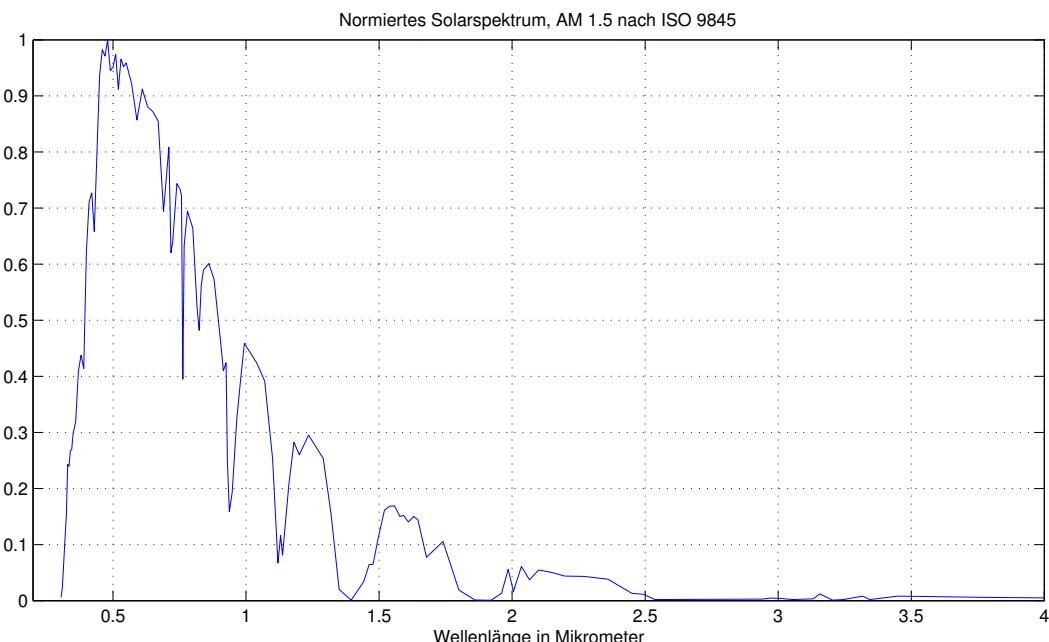
$$\tau_{Solar} = \frac{\sum_n \tau(\lambda_n) I(\lambda_n) \Delta\lambda_n}{\sum_n I(\lambda_n) \Delta\lambda_n} \quad (1)$$

mit:  $I(\lambda_n)$  solare Bestrahlungsstärke nach ISO 9845, siehe Fig. 5  
 $\tau(\lambda_n)$  spektrale Transmission

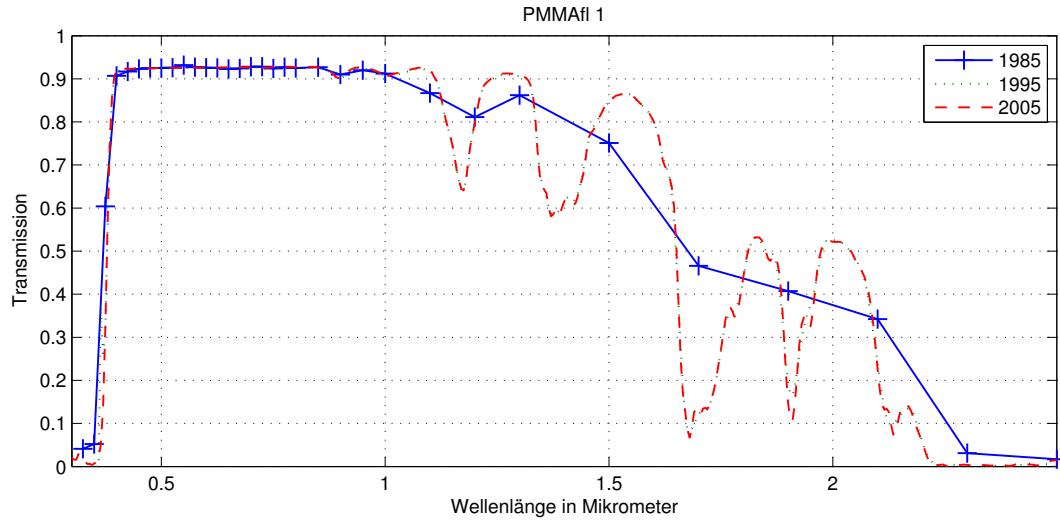
Es wird über alle Messpunkte im Bereich von 0.3 bis 2.5  $\mu\text{m}$  summiert. Dabei wird ein geringer Anteil an Solarstrahlung mit Wellenlängen von über 2.5  $\mu\text{m}$  vernachlässigt (Energetisch etwa 1.2%).

In Fig. 6 werden Referenzmessungen derselben PMMA-Platte, die vor Licht geschützt gelagert wurde, miteinander verglichen. Diese Messungen wurden 1985, 1995 und 2005 mit unterschiedlichen Spektrometern durchgeführt. Mit den wenigen Messpunkten von 1985 können die Absorptionsbanden im nahen Infrarot-Bereich nicht aufgelöst werden. Dies ist jedoch zur Berechnung der solaren Transmission von untergeordneter Bedeutung. Da jeder Messpunkt einen Mittelwert über ein relativ grosses Wellenlängenintervall darstellt, bieten die wenigen Messpunkte im Infrarot-Bereich trotzdem eine gute Basis zur Berechnung der solaren Transmission.

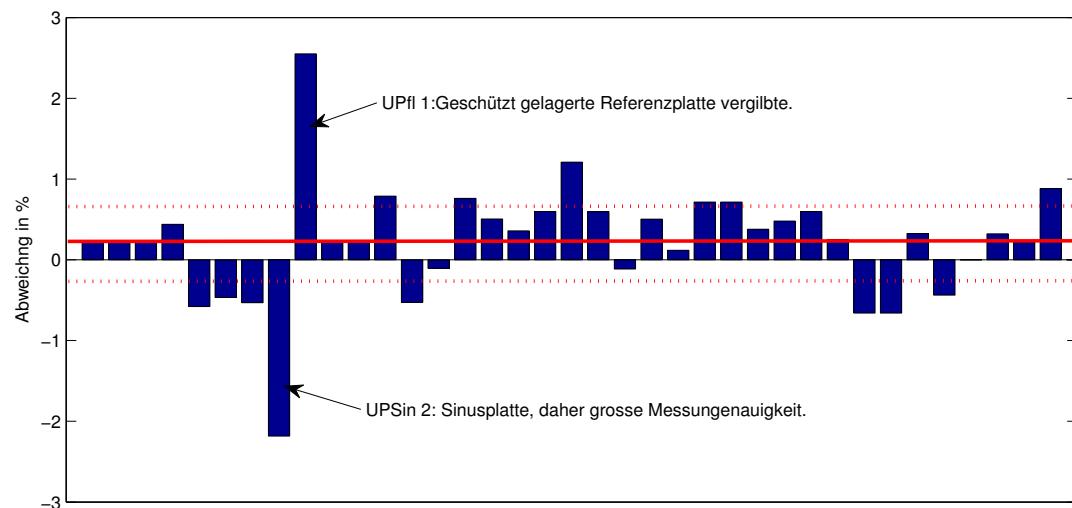
Bei 38 geschützt gelagerten Referenzplatten wurde ein hoch aufgelöstes Spektrum nachgemessen. Die Abweichungen der solaren Transmissionen aus Referenzmessungen von 1985 und 2005 sind in Fig. 7 dargestellt. Die resultierende Abweichung von  $0.2 \pm 0.5\%$  (extremwertbereinigt) gewährleistet, dass durch den Wechsel der Messapparatur keine systematischen Fehler entstehen.



**Fig. 5** Normiertes Solarspektrum für eine mittlere Sonneneinstrahlung AM 1.5. Nach ISO 9845.



**Fig. 6** Vergleich von Referenzmessungen derselben PMMA-Probe die geschützt gelagert wurde. Trotz unterschiedlicher Anzahl Messpunkte stimmt die solare Transmission der drei Messungen (1985: 0.836; 1995: 0.839; 2005: 0.833) gut überein.



**Fig. 7** Relative Abweichungen der gemessenen solaren Transmissionen aus alten (1985) und neuen (2005) Referenzmessungen. Die Abweichungen (alt – neu) werden relativ zur alten Messung angegeben. Zusätzlich sind Mittelwert und Standardabweichung als durchgezogene und gepunktete Linien dargestellt ( $0.2 \pm 0.5\%$  extremwertbereinigt).

Im Weiteren wurden die Proben mittels einer speziellen Vorrichtung im Durchlicht fotografisch dokumentiert. Der Vergleich mit der geschützt gelagerten Referenz gibt einen guten visuellen Eindruck der Veränderungen.

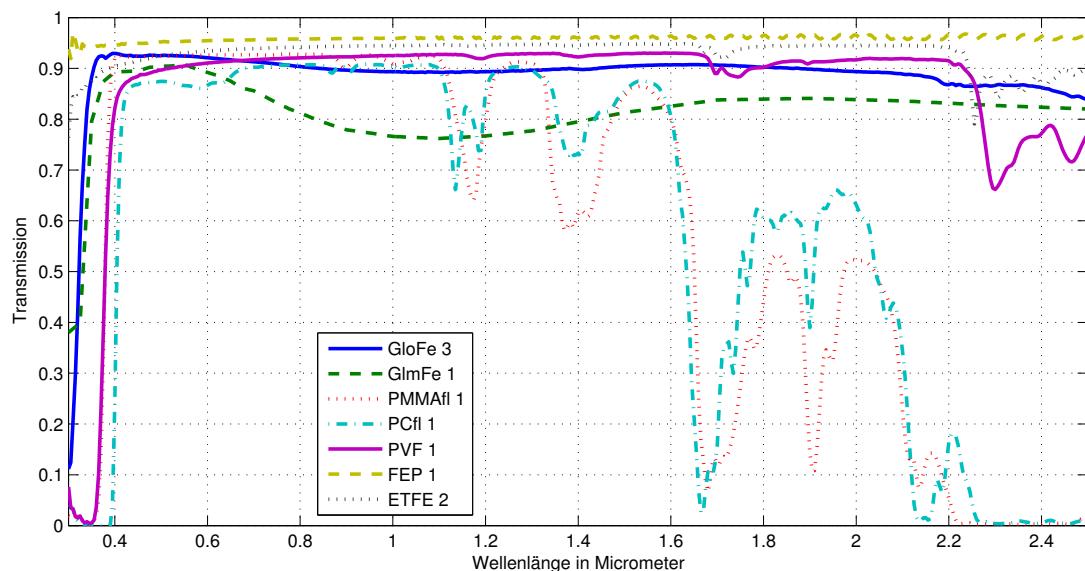
### **3.5 Beurteilung der Verschmutzung und der Degradation**

Die 3, 10 und 20 Jahre exponierten Proben wurden auch hinsichtlich des Einflusses der Verschmutzung analysiert. Dazu wurde die spektrale Transmission der Proben sowohl im ungereinigten als auch im gereinigten Zustand gemessen. Die Reinigung erfolgte durch sorgfältiges Abwischen der Probenoberfläche mit einem weichen Schwamm und einer milden Seifenlösung. Zusätzlich wurde bei einigen Proben mit hartnäckiger Verschmutzung ein Teil der bereits gesäuberten Fläche mit Ethanol nachgereinigt. Die Transmissionsdifferenz zwischen der mit Ethanol gereinigten und der ungereinigten Stelle wird im Folgenden als "Verschmutzung" bezeichnet. Unter "Degradation" hingegen werden alle Transmissionveränderungen zusammengefasst, die durch gründliches Reinigen mit Ethanol nicht beseitigt werden konnten. Darunter fallen etwa Reflexionsverluste an der Oberfläche aufgrund nur schwer entferbarer Schmutzrückstände oder Oberflächenangriffs, aber auch Verluste hervorgerufen durch Veränderungen des Materials. Degradation, die ausschliesslich auf Veränderungen im Material und nicht auf hartnäckige Verschmutzung zurückzuführen ist, wird im Folgenden als Materialdegradation bezeichnet.

Bei der Beurteilung der Verschmutzung ist auch das der Entnahme vorausgehende Wetter zu beachten. Niederschläge können eine reinigende Wirkung haben. So haben beispielsweise Niederschläge von mehr als 60 l/m<sup>2</sup> im Vorfeld der Probenentnahme 2005 zu verminderter Verschmutzung geführt. Die fünf zeitlich gestaffelten Messreihen bieten also nur Momentaufnahmen der Schmutzschicht an den Tagen der Entnahme. Es konnten in der Zwischenzeit durchaus deutlich höhere oder tiefere schmutzbedingte Transmissionen auftreten. Die Verschmutzung ist auf den Fotos gut sichtbar (siehe z.B. Fig. 26, Fig. 36 oder Fig. 37).

## 4 Präsentation und Diskussion der Messdaten

Von jeder exponierten Probe wurde ein Transmissionsspektrum im Bereich von 0.3 bis 2.5 µm aufgenommen. In Fig. 8 werden einige ausgewählte Transmissionsspektren von nicht exponierten Referenzproben gezeigt. Die Kunststoffe PMMA und PC weisen starke Absorptionsbanden im infraroten Bereich auf. Eisenhaltiges Glas zeigt im Vergleich zu eisenarmem eine deutlich geringere Transmission insbesondere im Bereich zwischen 0.7 µm und 1.8 µm, bedingt durch die Absorption von Fe<sup>2+</sup> Ionen. Die Folien aus fluoriertem Kunststoff (PVF, FEP und ETFE) weisen alle eine durchgängig sehr hohe Transmission auf. Die PMMA-, PC- und die PVF-Proben enthalten stabilisierende Zusätze, die Strahlung im UV-Bereich absorbieren.



**Fig. 8** Vergleich der Transmissionsspektren einiger ausgewählter Referenz-Proben.

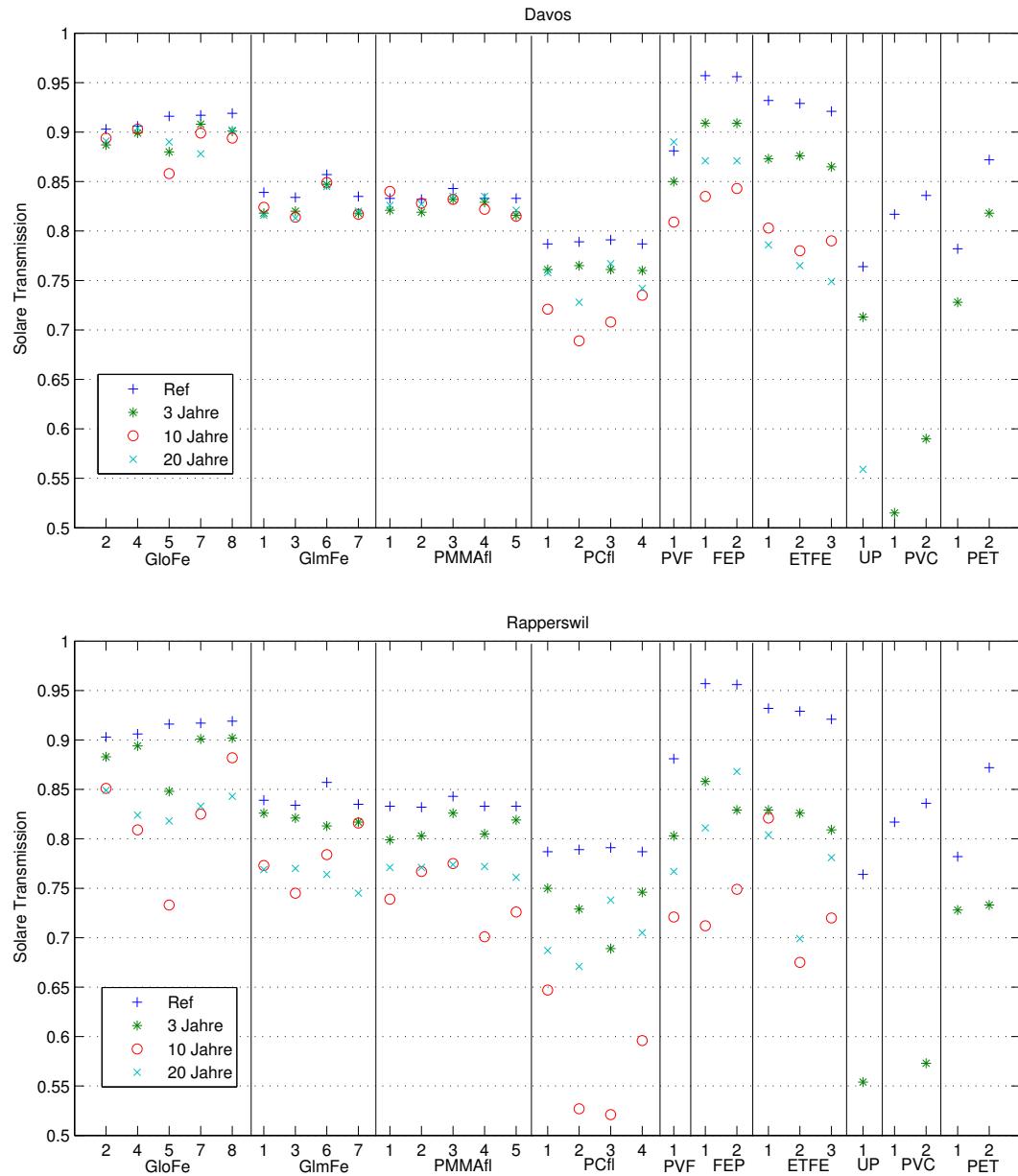
### 4.1 Übersicht über Solare Transmission der verschiedenen Materialien

In diesem Abschnitt soll zunächst ein Überblick über die Veränderung der solaren Transmission der im Test untersuchten Materialien erfolgen. Dazu werden von den jeweiligen Materialien einige Abdeckungstypen herausgegriffen und verglichen. Die Auffälligkeiten werden in den weiteren Teilen des Berichts im Einzelnen erläutert.

In Fig. 9 wird die solare Transmission einiger ausgewählter Abdeckungstypen nach unterschiedlicher Expositionsduer miteinander verglichen. Um einen möglichst guten Vergleich der verschiedenen Materialien zu erhalten, werden nur plane Proben gezeigt. Diese variieren aber in ihrer Stärke im Bereich von 0.025 mm bis 5 mm. Die nach 20 Jahren Exposition tendenziell höhere Transmission als nach 10 Jahren, wurde durch die starken Niederschläge im Vorfeld der Probeentnahme nach 20 Jahren verursacht, welche offensichtlich eine reinigende Wirkung hatten.

Die für Kollektoren am häufigsten verwendeten eisenarmen Gläser zeichneten sich durch einen sehr hohe solare Transmission aus, die auch durch Verschmutzung und Degradation nicht sonderlich stark verringert wurde. Ihre solare Transmission im neuwertigen Zustand von über 0.9 wurde nur von den dünnen FEP- und ETFE-Folien (beides fluorierte Kunststoffe) übertroffen. Diese erwiesen sich aber als verschmutzungsanfällig, was ihre solare Transmission im Laufe der Exposition stark verringerte. Beachtlich ist die Tatsache, dass innerhalb der 20 Jahre keine der sehr dünnen Folien aus fluoriertem Kunststoff zerstört wurde.

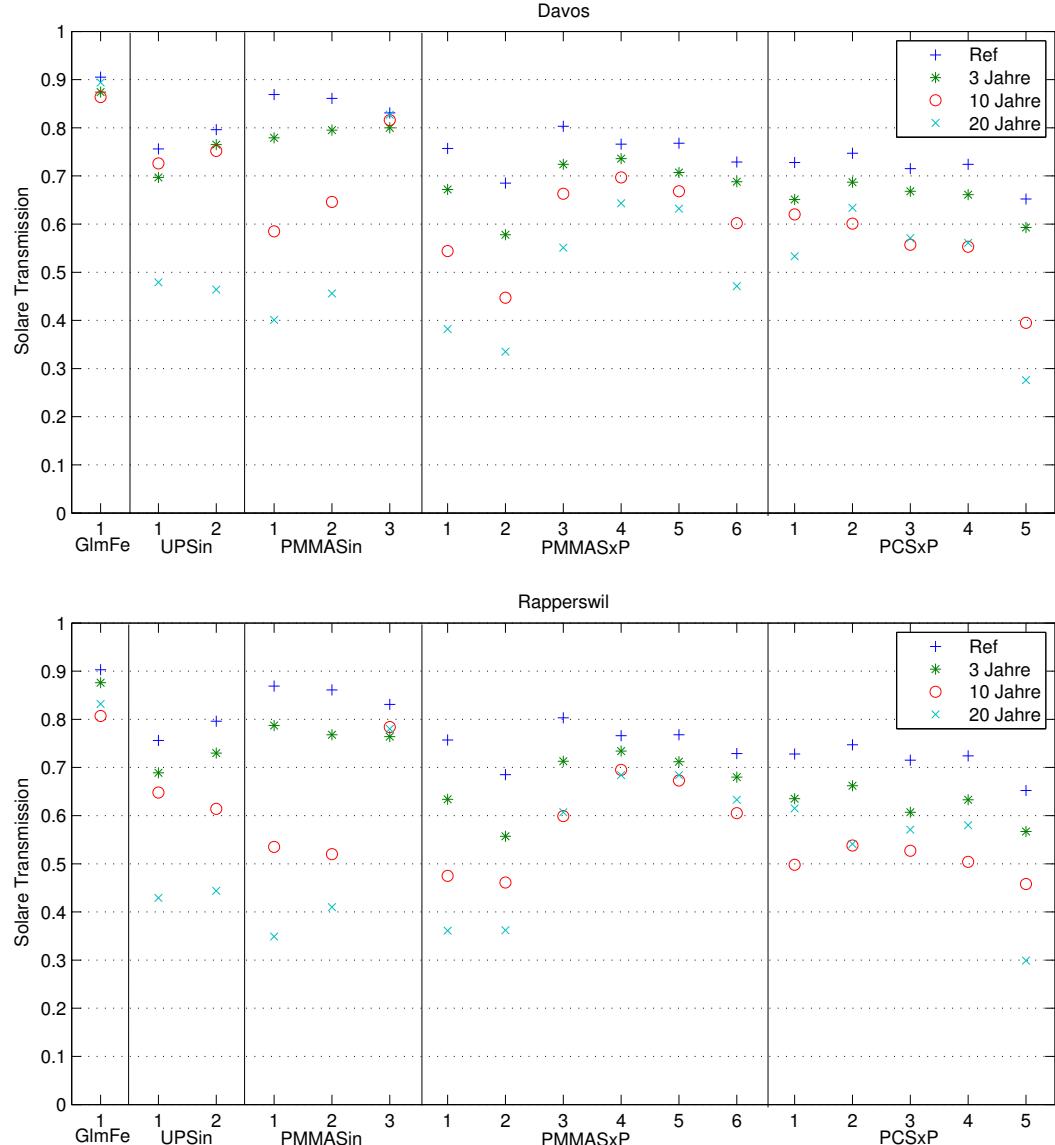
Eisenhaltige Gläser und PMMA besassen ähnliche solare Transmissionsgrade, die sich durch die Wetterexposition auch in ähnlichem Masse verringerte. Speziell im ländlichen Davos mit wenig Luftschaud- und Schwebestoffen fielen die Transmissionsverluste bei diesen Materialien verhältnismässig gering aus. PC-Scheiben besaßen schon im Neuzustand eine solare Transmission unterhalb von 0.8, die sich durch Verwitterung nochmals stark verschlechterte. Bei allen getesteten PC-Proben konnte auch schon mit dem blossen Auge eine Vergilbung festgestellt werden. Die getesteten PC-Folien sind in Fig. 9 nicht dargestellt, da sie während der Testdauer zerstört wurden. Die getesteten UP-, PVC- und PET-Proben eignen sich offensichtlich nicht als Kollektorabdeckungsmaterial. Bei UP sank die Transmission teilweise unter 0.5 und die PET- und PVC-Folien haben die 20 Jahre Wetterexposition nicht überdauert.



**Fig. 9** Solare Transmission verschiedener Materialien im Neuzustand (Referenz) sowie nach 3, 10 und 20 Jahren Expositionsdauer. Die Werte beziehen sich auf die ungewaschenen Proben. Um einen möglichst guten Vergleich der verschiedenen Materialien zu erhalten, werden hier nur plane Abdeckungstypen gezeigt. Sie variieren aber in ihrer Stärke im Bereich von 0.025 bis 5 mm. Proben, die beidseitig exponiert wurden, sind nur einmal dargestellt. Die Exposition erfolgte bei strukturierteren Gläsern mit der Struktur nach unten, bei Floatgläsern mit der zinnreichen Seite nach oben und bei mit einer Entspiegelungsschicht ausgestatteten Kunststoffen mit dieser Schicht nach oben. Werte der solaren Transmission unterhalb von 0.5 wurden ausgeklammert, im Falle der Zerstörung der Proben fehlen die entsprechenden Messpunkte.

## 4.2 Übersicht der Formen und Strukturen

Es wurden nicht nur verschiedene Materialien, sondern auch verschiedene Formen oder Strukturen getestet. Neben den flachen Platten oder Folien wurden auch einige sinusförmige Wellabdeckungen und Stegdoppel- und Dreifachplatten mit einbezogen. In Fig. 10 werden Die Transmissionswerte dieser Spezialformen mit einer eisenarmen Glasscheibe verglichen. Die unverstärkte PMMA-Sinusplatte verhielt sich ähnlich wie ihre flachen Gegenstücke (vergleiche Fig. 9). Die faserverstärkten Wellenplatten und die Stegdoppel- und Dreifachplatten zeigen eine stetige Transmissionsverminderung, die sich zwischen dem 10. und 20. Expositionsjahr, im Gegensatz zu den meisten flachen Abdeckungstypen, meist nochmals verstärkte. Bei diesen Spezialformen waren auch nur sehr gering Transmissionsunterschiede bezüglich Expositionsstandort auszumachen. Faserverstärkte composite Materialien degradieren, wie im Kapitel 4.4 näher beschrieben wird, stark. Die Stegdoppel- und Dreifachplatte waren während des Versuches nur unzureichend vor innerer Verschmutzung geschützt, was zu einer deutlichen Transmissionsverminderung führte, und von den heftigen Niederschlägen im Vorfeld der Probeentnahme nach 20 Jahren auch nicht weggewaschen wurde.



**Fig. 10** Vergleich der verschiedenen getesteten Formen und Strukturen bei 20 jähriger Exponierung in Rapperswil und Davos. Einige sinusförmige Wellabdeckungen, Stegdoppel- und Dreifachplatten werden mit einer Standard low Fe Glasplatte verglichen.

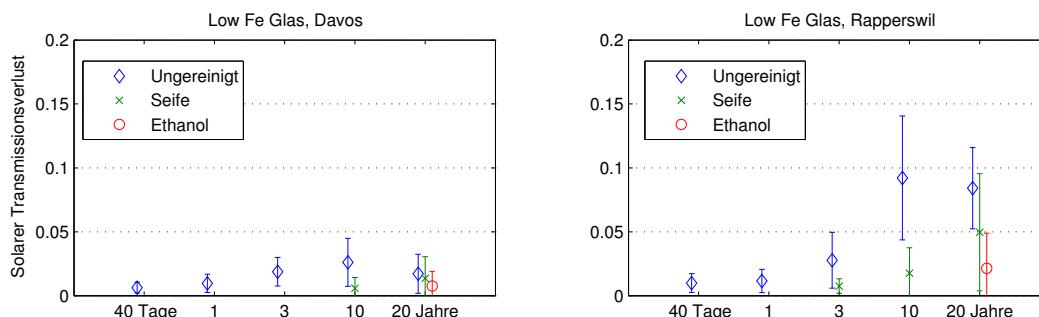
### 4.3 Verschmutzung der verschiedenen Materialien

Es erwies sich als schwierig, Rückschlüsse über die Verschmutzung zu ziehen, da kaum zu beurteilen ist, zu welchem Anteil die Schmutzschicht entfernt war. Bei der nachträglichen Reinigung mit Ethanol konnte die Transmission verschiedener, bereits mit Schwamm und Seife gereinigter, Proben nochmals stark verbessert werden. Bei den auch nach einer Reinigung mit Ethanol verbleibenden Transmissionsverlusten blieb aber unklar, ob sie von einer Materialgradation der Probe oder von einer hartnäckigen Verschmutzung herrührten. Für den Einsatz der Materialien

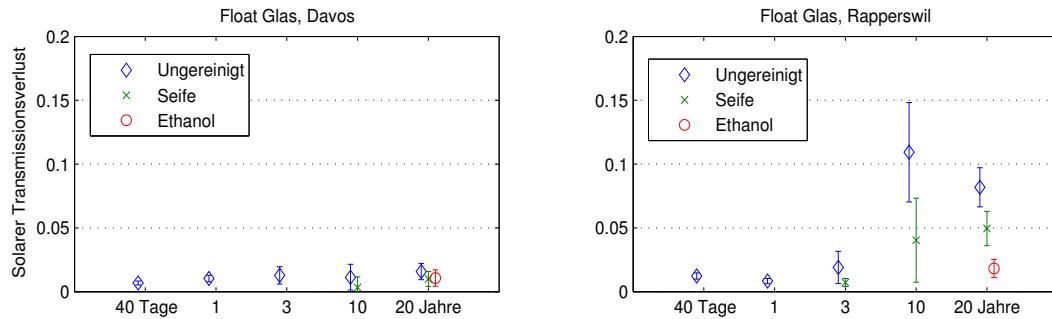
als Kollektorabdeckung ist aber vor allem wichtig, inwiefern die Transmissionsverluste durch eine einfach durchzuführende Reinigung rückgängig gemacht werden können. Um die unterschiedlichen Materialtypen miteinander zu vergleichen, wurden Proben verschiedener Hersteller zu Materialgruppen zusammengefasst und analysiert. In Fig.11a-e wird der Transmissionsverlust während der 20 Jahren Exposition und die Waschbarkeit dieser Gruppen dargestellt.

Bei den meisten Gruppen war ein starker Verschmutzungsunterschied zwischen den beiden Standorten bemerkbar: Die Proben verschmutzen in Rapperswil um ein Vielfaches mehr als in Davos. Einzig bei den fluorierten Kunststoffen ETFE, FEP und PVF waren die Unterschiede weniger ausgeprägt. Generell zeigte sich, dass durch Reinigung mit milder Seifenlösung und Schwamm deutliche Verbesserungen erzielt werden konnten. Bei den im Kollektorbau oft verwendeten Gläsern konnte nach 3 und 10 Jahren die Verringerung der Transmission durch waschen mit Seifenlösung um mehr als die Hälfte reduziert werden. Bei der Vermessung der Proben nach 20 Jahren führte das Reinigen mit Seifenlösung zu keinem vergleichbaren Ergebnis, wohl auch weil starker Niederschlag im Vorfeld der Probenentnahme einen Teil der leicht löslichen Verschmutzung bereits weggewaschen hatte. Auch durch gründliches Reinigen mit Ethanol konnte bei den getesteten Gläsern die ursprüngliche Transmission nicht mehr erreicht werden.

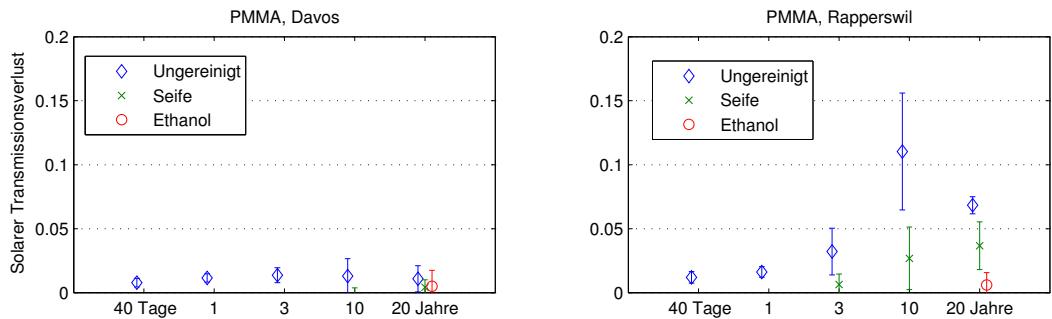
Im Gegensatz dazu konnte bei PMMA, FEP und PVF durch Reinigung mit Ethanol die ursprüngliche Transmission innerhalb von weniger als einem Prozent Abweichung wieder erreicht werden. Die Behandlung mit Ethanol führte bei einigen verwitterten PC-Proben zu einer leichten Trübung, was in einer schlechteren Transmission der behandelten Proben resultierte.



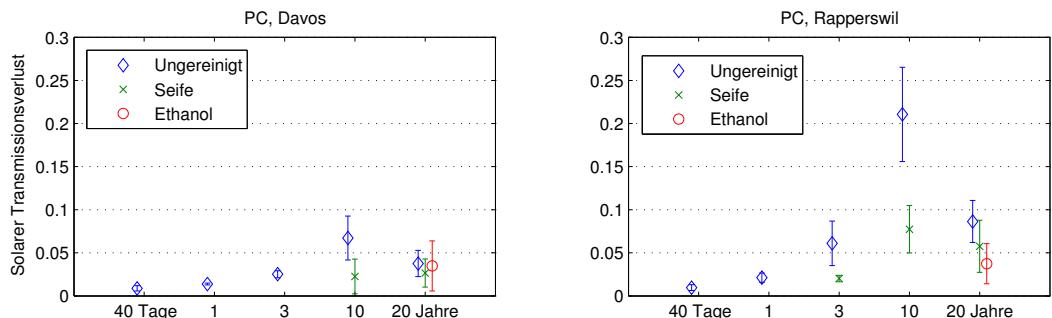
**Fig. 11a** Verschmutzung und Waschbarkeit der Low Fe Gläser. Alle acht getesteten low Fe Gläser wurden zu einer Gruppe zusammengefasst und die durchschnittlichen solaren Transmissionsverluste sowie Standardabweichungen dargestellt. Die Werte der ungewaschenen Proben werden mit den Werten nach der Reinigung mit Seife sowie mit Ethanol verglichen.



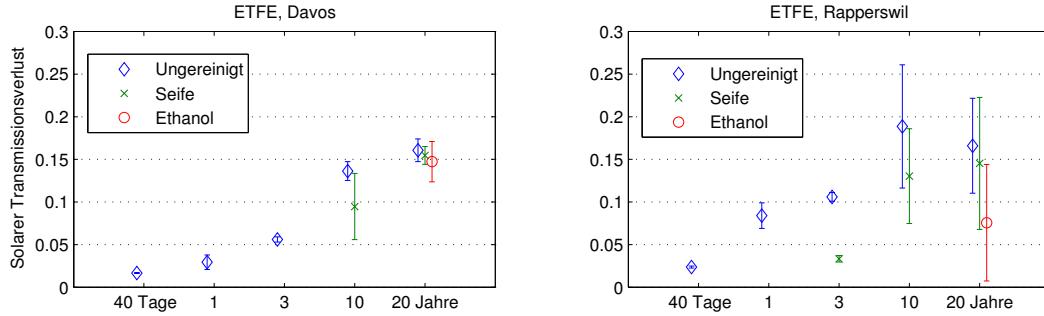
**Fig. 11b** Verschmutzung und Waschbarkeit der eisenhaltigen Floatgläser. Durchschnitt und Standardabweichung der acht getesteten Typen.



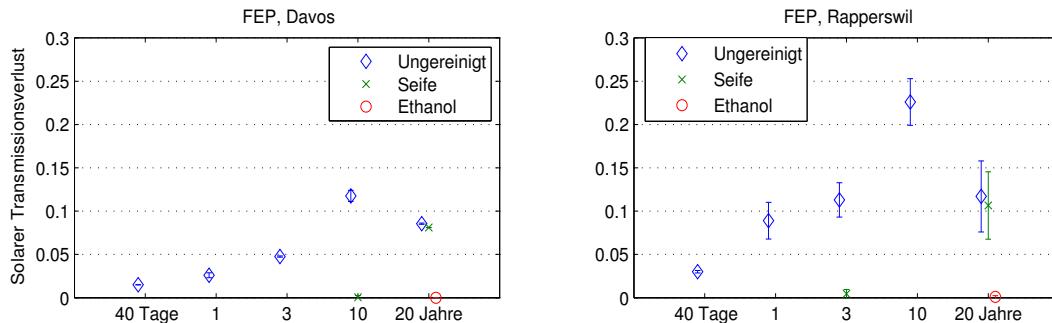
**Fig. 11c** Verschmutzung und Waschbarkeit der PMMA-Scheiben. Durchschnitt und Standardabweichung der sechs getesteten Typen.



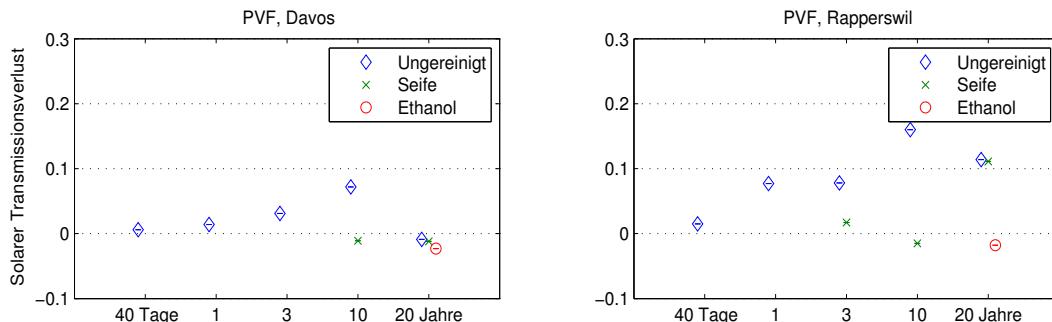
**Fig. 11d** Verschmutzung und Waschbarkeit der PC-Scheiben. Durchschnitt und Standardabweichung der fünf getesteten Typen. Da durch die Reinigung mit Ethanol eine gewisse Trübung auftrat, wurden sie solaren Transmissionsverluste zusätzlich erhöht. Die dargestellten Werte sind also höher als die echten Verwitterungsverluste.



**Fig. 11e** Verschmutzung und Waschbarkeit der ETFE-Folien. Durchschnitt und Standardabweichung der drei getesteten Typen.



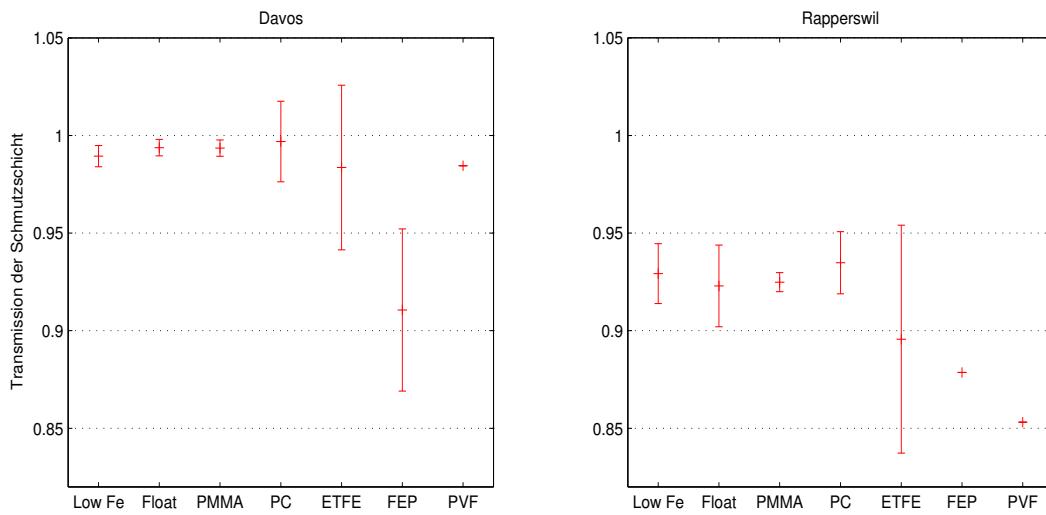
**Fig. 11f** Verschmutzung und Waschbarkeit der FEP-Folien. Durchschnitt und Standardabweichung der zwei getesteten Typen.



**Fig. 11g** Verschmutzung und Waschbarkeit der PVF-Probe. Es wurde nur ein PVF-Typ untersucht. Der negative solare Transmissionsverlust ist bedingt durch eine höhere solare Transmission gegenüber der unexponierten Referenz (siehe auch Kapitel 4.5.4).

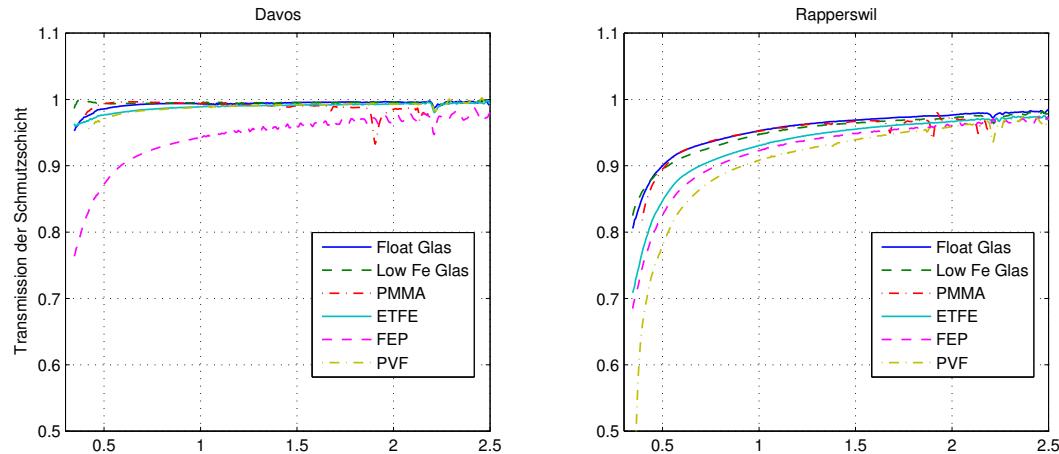
In Fig. 12 werden die Transmissionswerte der Schmutzschicht dargestellt, welche nach 20 Jahren Bewitterung mit Ethanol entfernt werden konnte. Auch hierbei war ein deutlicher Unterschied zwischen Davos und Rapperswil auszumachen. Im eher städtischen Rapperswil, mit Bahnhof und Industrie in der Nähe, lag die Transmission der Schmutzschicht nach 20 Jahren bei allen Materialien unter 0.95, das heisst es gingen mindestens 5 % der Solarstrahlung auf Grund der Verschmutzung verloren. Bei den FEP- und PVF-Proben lag dieser Wert sogar über 10%. Im abgelegenen Davos mit sauberer Luft waren die Transmissionsverluste bei den meisten Materialien sehr gering. Einzig die FEP-Folien wiesen eine Schmutzschicht mit solarer

Transmission von unter 0.95 auf. Die Werte für PC wurden, wie schon oben erwähnt, durch das Putzen mit Ethanol verfälscht, die wahre Transmission der PC-Schmutzschicht läge etwas tiefer als in Fig. 12 dargestellt.



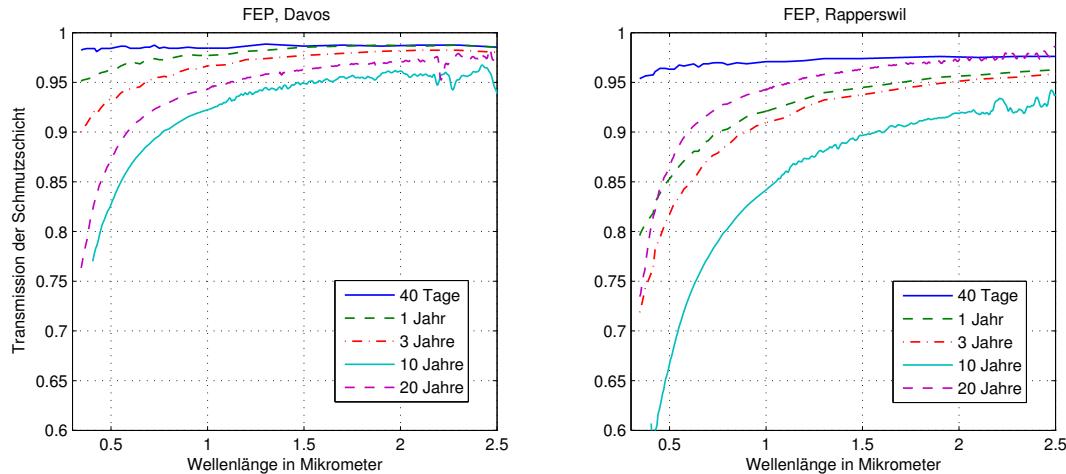
**Fig. 12** Vergleich verschiedener Materialgruppen; Solare Transmission der mit Ethanol abwaschbaren Schmutzschicht nach 20 Jahren Bewitterung. Diese errechnet sich aus der Division von der solaren Transmission der verschmutzten Proben und der solaren Transmission der mit Ethanol gereinigten Proben. Dargestellt werden Mittelwert und Standardabweichung der zu Gruppen zusammengefassten Proben (Low Fe und Floatgläser je acht Proben, sechs PMMA-Proben, fünf PC-Proben, drei ETFE-Proben, zwei FEP-Proben, eine PVF-Probe).

Fig. 13 zeigt die spektrale Transmission der Schmutzschicht für die unterschiedlichen Materialgruppen nach 20 Jahren Exposition. Dazu wurden die Spektren aller getesteten Vertreter einer Gruppe gemittelt. Die Transmission einer Schmutzschicht kann indirekt, durch das Dividieren des Spektrums einer ungereinigten Probe durch ihr Spektrum nach der Reinigung, bestimmt werden. Bei allen Materialien zeigte die Schmutzschicht einen ähnlichen spektralen Verlauf, mit einer deutlichen Transmissionsverringerung bei kürzeren Wellenlängen. Das Ausmass der Transmissionsabnahme unterschied sich aber stark zwischen den beiden Standorten und den unterschiedlichen Materialien, analog zu Fig. 12 Dennoch waren kleine Unterschiede in der Form der Transmissionsspektren auszumachen, die auf unterschiedliche Schmutzzusammensetzungen für verschiedene Materialien hindeuten. Bei fluorierten Kunststoffen und bei PMMA wurde ein starker Transmissionsabfall im kurzen Wellenlängenbereich gemessen, die Gläser zeigten eine flachere Transmissionskurve ihrer Schmutzschichten. Das Spektrum der PC-Schmutzschicht wurde nicht dargestellt, da es durch das Waschen mit Ethanol, wie schon oben erwähnt, verfälscht wurde.



**Fig. 13** Transmission der mit Ethanol reinigbaren Schmutzschicht nach 20 Jahren Bewitterung. Spektraler Vergleich verschiedener Materialgruppen. (Die Absorptionspeaks bei PMMA und PVF sind auf Artefakte durch die Spektrendivision zurückzuführen).

Da die mit Ethanol gereinigten FEP-Proben auch nach 20 Jahren wieder dieselben Transmissionswerte erreichten wie im Neuzustand, kann davon ausgegangen werden, dass das Material selbst keine Degradation zeigt (vergleiche Fig. 16). Die Transmissionsverluste waren also während der gesamten Expositionsdauer nur auf die Schmutzschicht zurückzuführen. Fig. 14 zeigt die Transmissionsspektren der Schmutzschichten, die mit Hilfe der verschmutzten und der unexponierten Referenz-Probe errechnet wurden. Sowohl in Davos als auch in Rapperswil war die Transmission der Schmutzschicht stark wellenlängenabhängig. Nach 40 Tagen transmittierte die Schmutzschicht fast über das gesamte Spektrum gleich viel, bis auf eine kleine Abnahme bei kurzen Wellenlängen. Vor allem im kurzweligen Bereich verschlechtert sich die Transmission deutlicher mit zunehmender Expositionsdauer. Beachtlich ist auch, dass nach den starken Niederschlägen vor der Probenentnahme 2005 die Transmission im langwelligen Bereich proportional stärker zunahm. Die im IR-Bereich absorbierenden Schmutzanteile wurden durch den Regen offensichtlich besser weggeschwemmt. Während der 20 Jahre veränderten sich also die spektralen Anteile der Transmission durch Verschmutzung. Kurzwelliges Licht wurde mit der Zeit immer schlechter transmittiert als langwelliges.



**Fig. 14** Transmissionsspektren der Schmutzschichten auf einer FEP-Probe nach unterschiedlichen Expositionzeiten.

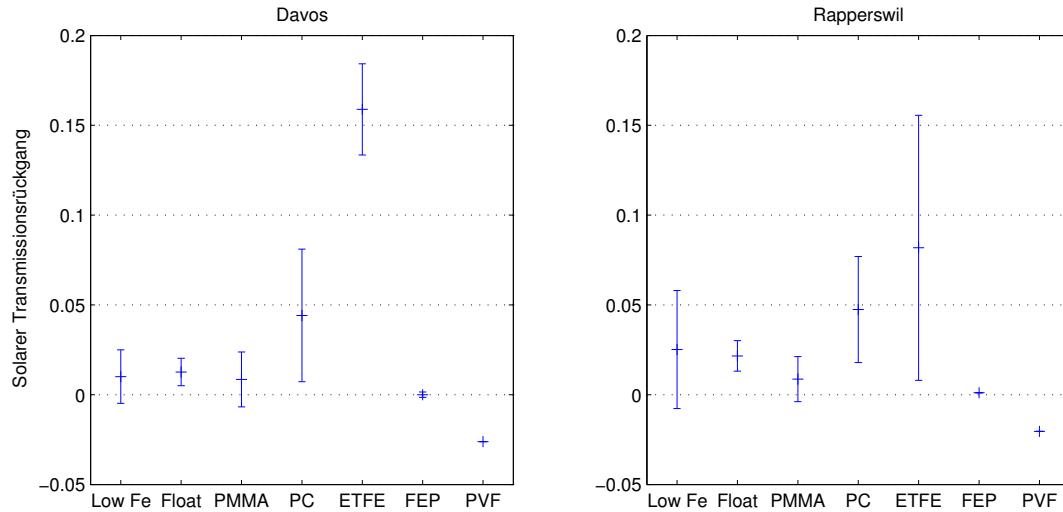
Bei den meisten anderen Materialien waren deutliche Unterschiede zwischen den Spektren der Referenzen und den mit Ethanol gereinigten 20 jährigen Proben auszumachen. Daher konnten bei den älteren Proben Degradation und Verschmutzung nicht eindeutig voneinander getrennt werden. Aus diesem Grund war eine Analyse der Verschmutzungsveränderung für die anderen Materialien ohne aufwändiges Nachreinigen der alten Proben mit Ethanol nicht mehr möglich.

#### 4.4 Bleibende Transmissionsverluste und Materialdegradation

Die Unterscheidung zwischen Verschmutzung und Materialdegradation ist, wie bereits erwähnt, schwierig, da die Grenzen zwischen hartnäckiger Verschmutzung und Korrosion auf der Oberfläche oft fliessend sind. Unter Degradation werden hier alle Transmissionsveränderungen zusammengefasst die durch intensives Reinigen mit Ethanol nicht mehr rückgängig gemacht werden konnten. Dabei wurden hartnäckige Verschmutzungen, die mit anderen Mitteln vielleicht noch abwaschbar wären, zur Degradation gezählt. Degradation, die ausschliesslich auf Veränderungen im Material und nicht auf hartnäckige Verschmutzung zurück zu führen ist, wird im Folgenden als Materialdegradation bezeichnet. In Fig. 15 wird die nach 20 Jahren gemessene Degradation von verschiedenen Materialgruppen zusammengefasst. Dabei wurden nur flache, nicht faserverstärkte Proben zum Vergleich ausgewählt.

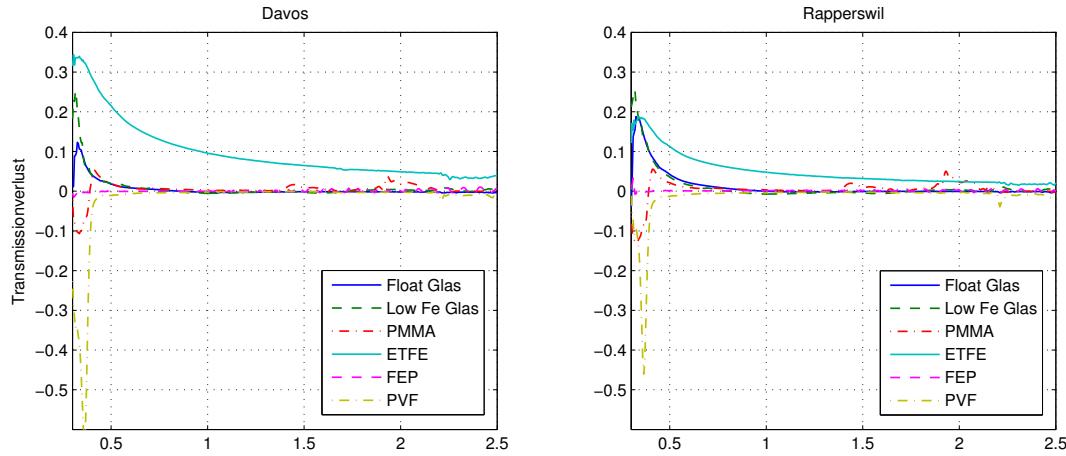
Die getesteten PMMA- sowie die FEP- und PVF-Proben zeigten auch nach 20 Jahren nur sehr geringen bis gar keinen solaren Transmissionsrückgang durch Degradation. Bei den getesteten Gläsern war eine Standortabhängigkeit zu beobachten, in Rapperswil war eine stärkere Degradation vorhanden. Es konnte eine bräunliche Verfärbung der Glasoberfläche beobachtet werden, die auch mit Ethanol nicht zu reinigen war. Daher kann davon ausgegangen werden, dass ein beträchtlicher Anteil der Degradation bei Gläsern durch nicht mehr zu reinigende Verschmutzungen verursacht wurde. Der bei PC gemessene Transmissionsrückgang wurde wie oben

erwähnt durch das Reinigen mit Ethanol verfälscht. Der echte, auf Degradation zurückzuführende Rückgang, läge etwas tiefer als in Fig. 15 dargestellt. Bei ETFE wurde auch nach der Reinigung ein sehr hoher Transmissionsrückgang gemessen. Es ist aber auch zu beachten, dass es sich hierbei um dünne Folien handelte, die nur vorsichtig und daher auch weniger gründlich gereinigt wurden. Dies könnte zu einer zu hohen Einschätzung der Degradation geführt haben. Bei den getesteten FEP- und PVF-Proben konnte nach 20 Jahren tendenziell sogar eine erhöhte solare Transmission der mit Ethanol gereinigten Proben gemessen werden, siehe auch Fig. 41. Dies manifestiert sich in Fig. 15 als negativer Transmissionsrückgang.



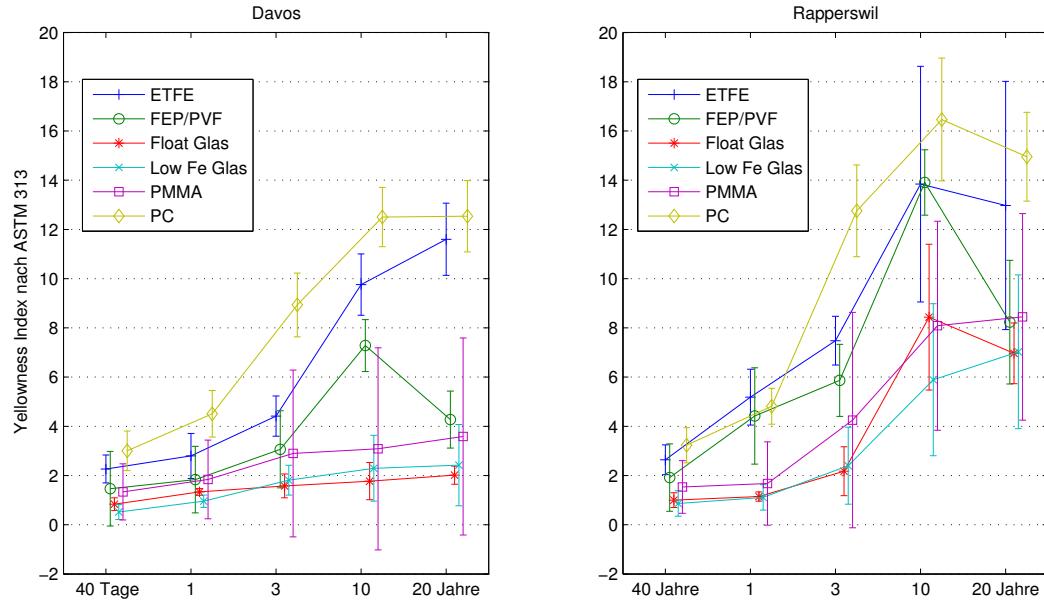
**Fig. 15** Solarer Transmissionsrückgang aufgrund nicht waschbarer Verschmutzung oder Materialdegradation. Dargestellt werden Mittelwert und Standardabweichung der zu Gruppen zusammengefassten Proben (Low Fe und Floatgläser je acht Proben, sechs PMMA-Proben, fünf PC-Proben, drei ETFE-Proben, zwei FEP-Proben, eine PVF-Probe).

In Fig. 16 wird der mittlere Transmissionsrückgang der Materialgruppen spektral aufgelöst dargestellt. Negative Werte bedeuten eine Transmissionszunahme nach 20 Jahren. Der verstärkte Transmissionsrückgang im kurzen Wellenlängenbereich, der bei den meisten Materialgruppen auftrat, zeigt starke Ähnlichkeiten mit dem von Schmutz bedingten Rückgang. Nicht abwaschbarer Schmutz ist also als grosser Bestandteil der Degradation zu vermuten. Die negativen Werte bei PMMA und PVF sind auf eine Verschlechterung der UV-Blockierung zurückzuführen, auf die in 4.5.2 und 4.5.4 genauer eingegangen wird. Beim PMMA treten Absorptionsbanden im Bereich um 1.45 und 1.9  $\mu\text{m}$  auf, welche auf die Resorption von Wasser hindeuten. Aufgrund der weiter oben erwähnten Effekte beim Reinigen der PC-Proben mit E-ethanol wurde die PC-Kurve verfälscht, daher wird diese hier nicht dargestellt.



**Fig. 16** Transmissionsverluste aufgrund nicht waschbarer Verschmutzung oder Materialdegradation, Spektral aufgelöst.

Um die Vergilbung der getesteten Materialien zu beurteilen wurde der Yellowness Index (YI) nach ASTM 313 bestimmt. Da sich die Transmission der Schmutzschicht in Abhängigkeit der Wellenlänge stark verändert, wird dadurch jedoch auch der YI verändert. Die Transmission der Schmutzschicht verschlechtert sich bei kurzwelligem, also blauem Licht am stärksten. Dadurch tendiert die Probe zu einer gelblichen Erscheinung. In Fig. 17 wird die Veränderung des durchschnittlichen YI für die verschiedenen Probengruppen während der 20 jährigen Exposition dargestellt. Generell war bei allen Abdeckungstypen ein Anstieg des YI zu verzeichnen, wobei er bei einigen Materialgruppen analog zur Verschmutzung nach 20 Jahren geringer ausfiel als nach 10 Jahren. Bei den PC-Proben war der Anstieg des YI von allen dargestellten Materialgruppen am deutlichsten. Bei diesen Proben konnte eine mit dem Auge sichtbare deutliche Vergilbung festgestellt werden. Der hohe Anstieg des YI bei den fluorierten Kunststoffen ETFE, FEP und PVF ist wohl auf die deutlich stärkere Verschmutzung dieser Proben zurück zu führen. Vor allem auch die PVC-Proben zeigten eine sehr starke Vergilbung, siehe 4.5.6. Diese Proben wurden aber im Verlauf des Testes zerstört und sind deshalb in Fig. 17 nicht dargestellt.



**Fig. 17** Vergleich der Verschiedenen Materialgruppen bezüglich des Yellowness Indexes nach ASTM 313.

Zusätzlich wurden einige composite Platten aus glasfaserverstärktem PMMA und UP untersucht. Diese Proben zeigten aber alle sehr starke Transmissionsrückgänge. Beim Betrachten der Proben wird der Grund für diesen Rückgang deutlich sichtbar (Fig. 26 und Fig. 27 bei PMMA, sowie Fig. 43 bei UP); Die Glasfaserverstärkungen treten deutlich als weisse, nicht mehr transparente Strukturen hervor. Vor allem an den Grenzflächen zwischen Glasfasern und Kunststoff-Matrix treten starke Spannungen auf (A. Davis und D. Sims S. 266 ff [12]). Grund dafür sind die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen Fasermaterial und Matrix und das Aufquellen der Polymermatrix durch die Aufnahme von Wasser. Als Folge davon wird die Faser-Matrix Verbindung geschwächt und es entstehen Risse an den Verbindungsstellen und in der Matrix. An diesen Rissen wird das Licht gestreut und die Probe verliert ihre Transparenz. Bei zunehmender Verwitterung bricht die dünne Kunststoff-Schicht über den Fasersträngen auf, und Fasern treten an die Oberfläche. In den dadurch entstehenden Ritzen kann sich Schmutz leichter festsetzen, was zu zusätzlichen Transmissionsverlusten führt.

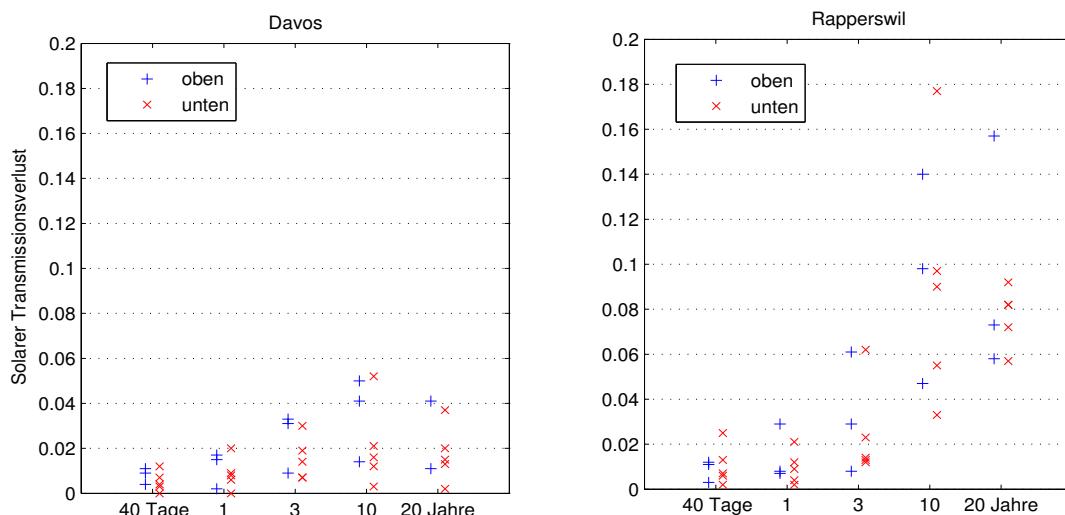
Bei einigen Proben konnte auch ein mikrobieller Befall, vermutlich durch Schimmel-pilze, und auch ein Befall mit Flechten beobachtet werden. Dies wurde aber fast ausschliesslich in Rapperswil und nur bei Materialien, deren Oberfläche durch Verwitterung aufrauhte, beobachtet, also bei den PC- und den faserverstärkten UP-Platten. Ein solcher Befall konnte frühestens nach 10 Jahren Expositionsdauer beobachtet werden.

## 4.5 Betrachtung der einzelnen Materialgruppen

### 4.5.1 Gläser

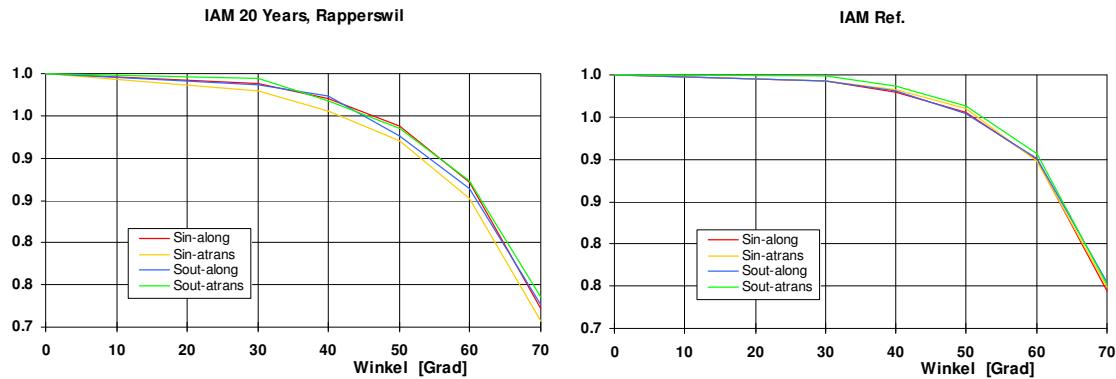
Um den Einfluss von strukturierten Glasoberflächen auf deren Verschmutzungsgrad zu untersuchen, wurden einseitig strukturierte Gläser sowohl mit der glatten, als auch mit der strukturierten Seite nach aussen getestet. In Fig. 18 wird der Transmissionsverlust der ungewaschenen Proben nach unterschiedlicher Exponierungszeit dargestellt. Dabei werden die Proben mit der strukturierten Seite nach aussen (oben) mit den Proben mit der strukturierten Seite nach innen (unten) verglichen. Wie schon nach 10 Jahren festgestellt wurde, kann kein eindeutiger Trend identifiziert werden. Die Struktur hatte also entgegen der üblichen Meinung, dass strukturierte Oberflächen stärker verschmutzen als glatte, keinen Einfluss auf die Verschmutzung.

Bei den untersuchten low Fe Gläsern scheint die Härtung keinen Einfluss auf die solare Transmission zu haben.



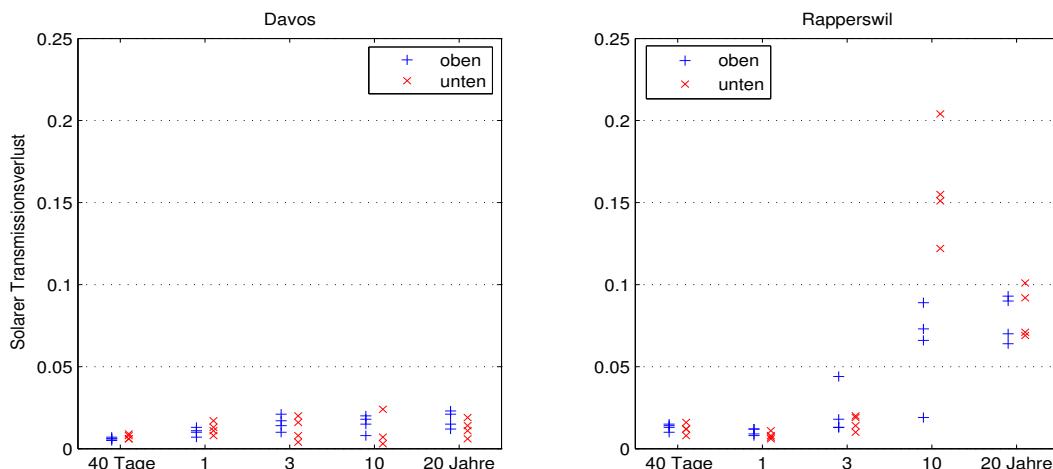
**Fig. 18** Einfluss der Expositionsseiten von strukturierten Gläsern auf ihre Verschmutzung (Struktur aussen: oben, Struktur innen : unten).

Um die winkelabhängigen Verluste zu quantifizieren wurde bei einigen Proben der 'Incident angle modifier' IAM gemessen, welcher die Abhängigkeit der solaren Transmission vom Einfallswinkel beschreibt. In Fig. 19 wird der IAM einer 20 Jahre in Rapperswil exponierten Glasscheibe mit dem IAM der unexponierten Referenzprobe verglichen. Dabei wird sowohl zwischen einer Exposition mit der strukturierten Seite nach innen und nach aussen als auch zwischen longitudinalem und transversalem Lichteinfall unterschieden. Mit Hilfe von Simulationen mit der Software Polysun wurde der Einfluss dieser Verluste auf einen durchschnittlichen Jahresertrag abgeschätzt[6]. Dies ergab zusätzliche Verluste von ca. 1% für die Probe, welche mit der Struktur nach aussen exponiert wurde. Bei der mit der glatten Seite nach aussen exponierten Probe, ergab sich eine Ertragseinbusse von ca. 2%.

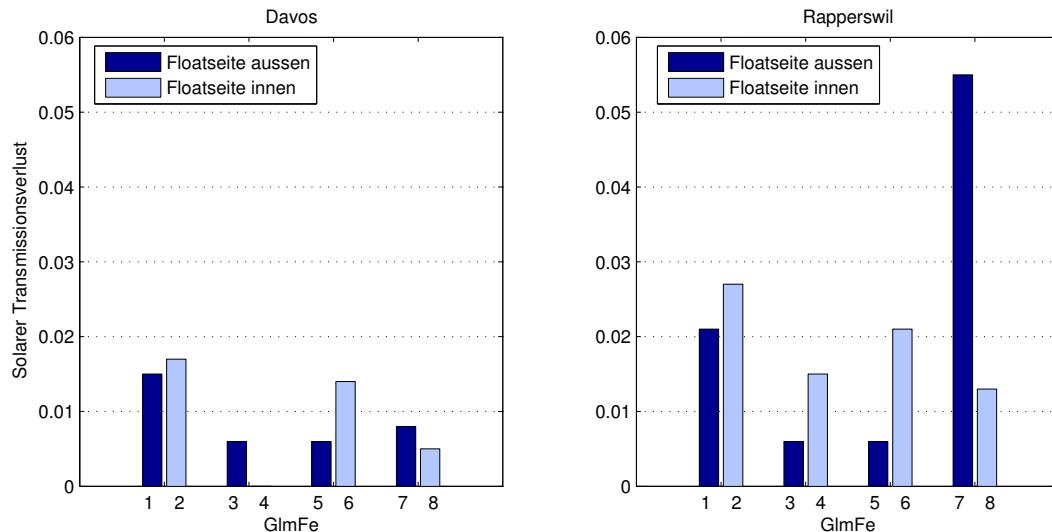


**Fig. 19** IAM einer exponierten Glasscheibe (links) verglichen mit dem IAM einer geschützt aufbewahrten Referenzscheibe. Die Probe wurde jeweils longitudinal und transversal zur Strukturierungsrichtung gemessen. Sin: Struktur innen, Sout: Struktur aussen.

Floatgläser besitzen durch den Produktionsprozess zwei durch Ihren Zinngehalt unterschiedliche Seiten. Shelby et al. [7] stellten fest, dass die zinnarme Seite von eisenarmem Floatglas bei beschleunigten Alterungsversuchen stärker aufrauht. Analog dazu wurde nach 10 Jahren im Zwischenbericht dieser Studie [8] festgestellt, dass die zinnarme Seite der getesteten eisenhaltigen Floatgläsern auch stärker verschmutzte. Dieser Trend bestätigte sich aber nach 20 Jahren nicht mehr, siehe Fig. 20. Einzig bei den am stärksten verschmutzten Proben von Rapperswil nach 10 Jahren war ein derartiger Trend sichtbar, in Davos hingegen war kein Trend erkennbar. Auch nach einer gründlichen Reinigung mit Ethanol weisen die beiden Seiten der 20 jährigen Proben keine unterschiedlichen solaren Transmissionsgrade auf, siehe Fig. 21. Falls also die zinnreiche Floatseite tatsächlich weniger stark degradierte, war der Einfluss bezüglich der solaren Transmission vernachlässigbar oder der Effekt wurde durch die Reinigung mit Ethanol rückgängig gemacht. Bezuglich der Härtung konnte, wie schon nach 10 Jahren, kein Unterschied festgestellt werden. Das gehärtete Floatglas wies sehr ähnliche solare Transmissionswerte auf wie das ungehärtete Glas desselben Herstellers.



**Fig. 20** Abnahme an solarer Transmission während der 20 jährigen Exponierung bei Floatgläsern. Sie wurden jeweils mit der zinnreichen Floatseite nach oben und nach unten getestet.

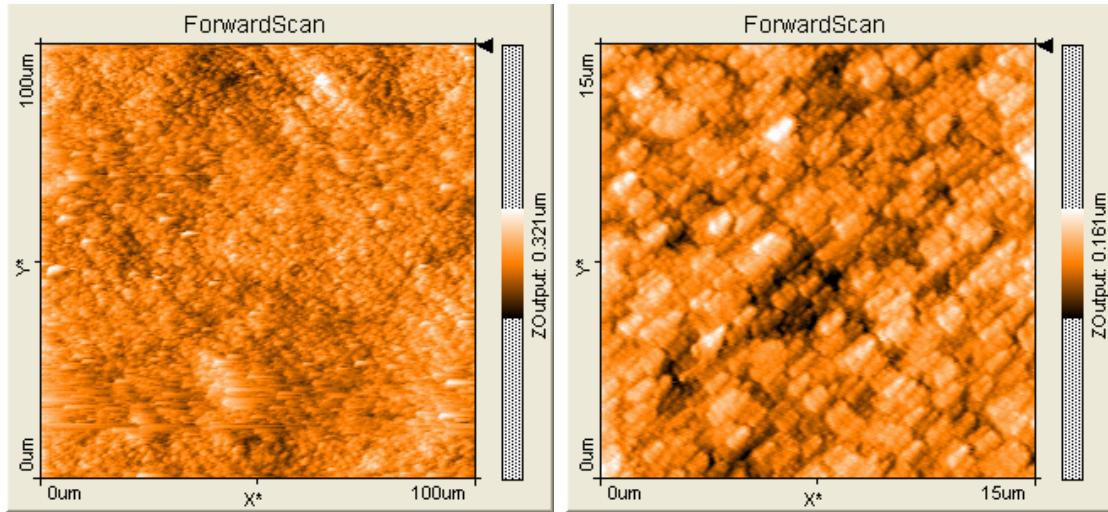


**Fig. 21** Solare Transmissionsverluste von eisenhaltigen Floatgläsern, die auf Degradation zurückzuführen sind. Dabei wird unterschieden zwischen Gläsern, die mit der Floatseite nach unten exponiert wurden und solchen mit der Floatseiten nach oben.

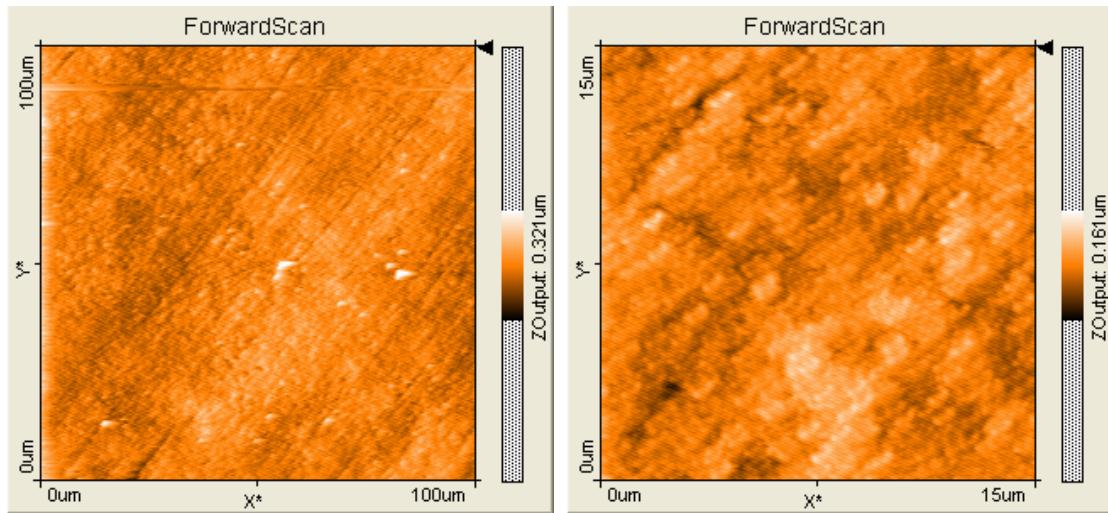
Um die Oberflächenbeschaffenheit der Floatgläser genauer zu untersuchen, wurden diese mit einem Dynamic Force Microscope (easyScan DFM System von Nanaosurf) vermessen, siehe Fig. 22 und Fig. 23. Dabei wurden nur die 20 Jahre exponierten Gläser verwendet. Der Tastkopf des AFM ist relativ anfällig auf Verschmutzungen, daher mussten die zu vermessenden Oberflächen gründlich gereinigt werden. Dabei ist nicht auszuschliessen, dass durch das Reinigen mit Papiertüchern und Ethanol Kratzer auf der Oberfläche entstehen. Durch die AFM Aufnahmen konnte gezeigt werden, dass die Resultate von Shelby für eisenarmes Floatglas nicht auf eisenhaltiges Floatglas übertragen werden können. Wie in der folgenden Tabelle 7 gezeigt wird, wiesen die zinnreichen Seiten rauhere Oberflächen auf als die zinnarmen, und zwar unabhängig von der Grösse der vermessenen Oberflächen.

**Tabelle 7** Oberflächenrauhigkeit von eisenhaltigen Floatgläsern nach 20 Jahren Wetterexposition in Davos.

| Oberfläche | Rauheit der Oberfläche, Standardabweichung der z-Koordinate in $\mu\text{m}$ |                                      |                                  |                                    |
|------------|--|--------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
|            | 100 x 100 $\mu\text{m}$ , gehärtet   | 100 x 100 $\mu\text{m}$ , ungehärtet | 15 x 15 $\mu\text{m}$ , gehärtet | 15 x 15 $\mu\text{m}$ , ungehärtet |
| Zinnreich  | 0.043  | 0.040                                | 0.026                            | 0.026                              |
| Zinnarm    | 0.034  | 0.029                                | 0.022                            | 0.013                              |



**Fig. 22** Zinnreiche Seite ungehärtet (GloFe 3).

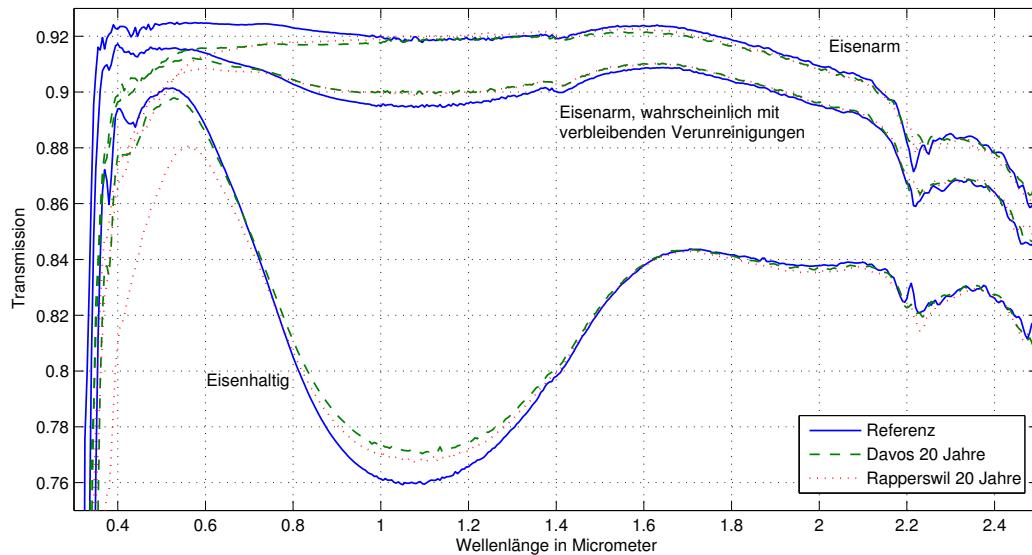


**Fig. 23** Zinnarme Seite, ungehärtet (GloFe 4).

Nach der Reinigung der exponierten Proben wurde festgestellt, dass bei den meisten Gläsern die Transmission im Bereich um 1.1  $\mu\text{m}$  tendenziell zunahm. Diese Zunahme wurde auch schon von Petit et al. [9] bei Verwitterungsversuchen mit Solar-spiegeln und von Lind et al. [10] bei über 40 jährigen Fensterscheiben beobachtet und betrifft genau den Absorptionsbereich der  $\text{Fe}^{2+}$  Unreinheiten. Dies legt die Vermutung nahe, dass die  $\text{Fe}^{2+}$  Konzentration durch Verwitterung vermindert wurde. Eine Oxidation zu  $\text{Fe}^{3+}$  würde aber auch die für  $\text{Fe}^{3+}$  charakteristische Absorption bei 0.38  $\mu\text{m}$  mit sich bringen, die jedoch nicht beobachtet werden konnte. In einer Studie von Vitko et al. [11] wurde genau dieselbe Beobachtung beschrieben. Darin wird vermutet, dass bei der Oxidation zu  $\text{Fe}^{3+}$  die unmittelbare Umgebung von  $\text{Fe}^{2+}$  erhalten blieb und dadurch der Absorptionskoeffizient von  $\text{Fe}^{3+}$  stark vermindert wurde. Als weitere Erklärungsmöglichkeit wird auch vermutet, dass die verminderte Absorption von  $\text{Fe}^{2+}$  nicht durch eine Konzentrationsverminderung, sondern durch eine Veränderung der unmittelbaren Umgebung und somit des Absorptionskoeffizienten verursacht werden könnte. Wie in Fig. 24 gezeigt wird, trat die erwähnte Transmissionszunahme bei eisenhaltigem Floatglas deutlich auf. In geringem Masse konnte sie auch bei eisenarmem Glas beobachtet werden, welches aber immer noch

eine deutliche Absorption in der  $\text{Fe}^{2+}$ -Bande zeigte. Bei der Probe mit der höchsten Transmission kann auf eine sehr geringe Verunreinigung mit  $\text{Fe}^{2+}$  geschlossen werden, da sowohl die Absorption als auch die Transmissionszunahme durch Solarisation im Bereich um  $1.1 \mu\text{m}$  nur in sehr kleinem Masse auftraten.

Bei eisenhaltigen Gläsern wirkt dieser Solarisationseffekt also der allgemeinen Verschlechterung der solaren Transmission durch Verschmutzung entgegen. Die oben genannten Effekte konnten in ähnlichem Masse sowohl bei der gehärteten als auch bei den ungehärteten Proben beobachtet werden



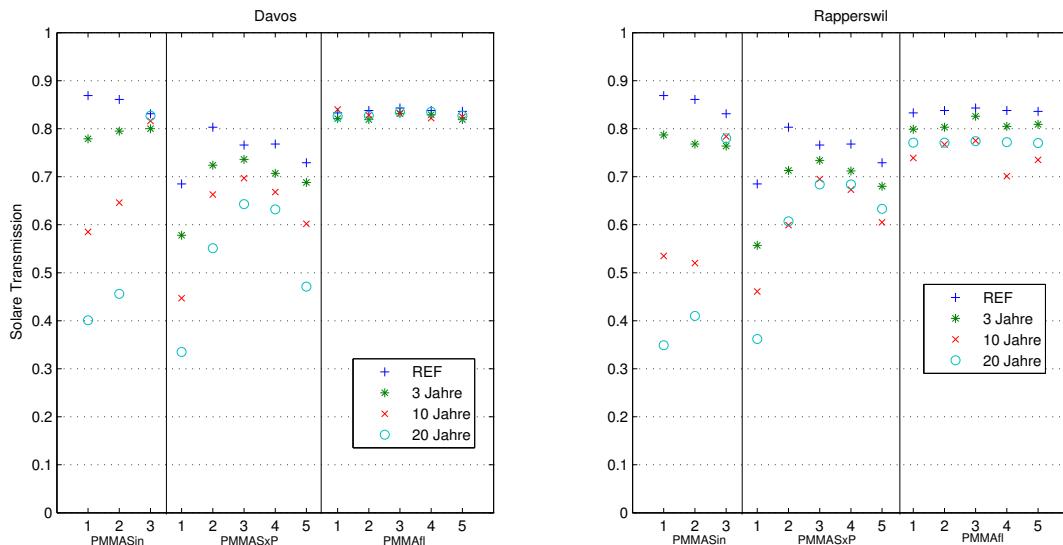
**Fig. 24** Transmissionsspektren von drei verschiedenen Glasproben; GImFe 3 (eisenhaltig), GloFe 1 (eisenarm mit Rückständen), GloFe 8 (eisenarm). Die Referenz wird mit 20 Jahren wetterexponierten und dann gewaschenen Proben verglichen.

Anhand der getesteten Gläser konnte gezeigt werden, dass strukturierte Oberflächen keinen Einfluss auf die Verschmutzung haben, der sich negativ auf die solare Transmission auswirkt. Auch hinsichtlich der Expositionsseite von eisenhaltigem Floatglas konnten keine eindeutigen Auswirkungen auf den solaren Transmissionsgrad ausgemacht werden. Entgegen früherer Beobachtungen an eisenarmem Floatglas, wiesen die zinnreichen Seiten der untersuchten eisenhaltigen Floatgläser eine rauhere Oberfläche auf als die zinnarmen. Des Weiteren wurde eine Abschwächung der  $\text{Fe}^{2+}$  Absorptionsbande im Bereich um  $1.1 \mu\text{m}$  nach 20 Jahren Wetterexposition aufgezeigt.

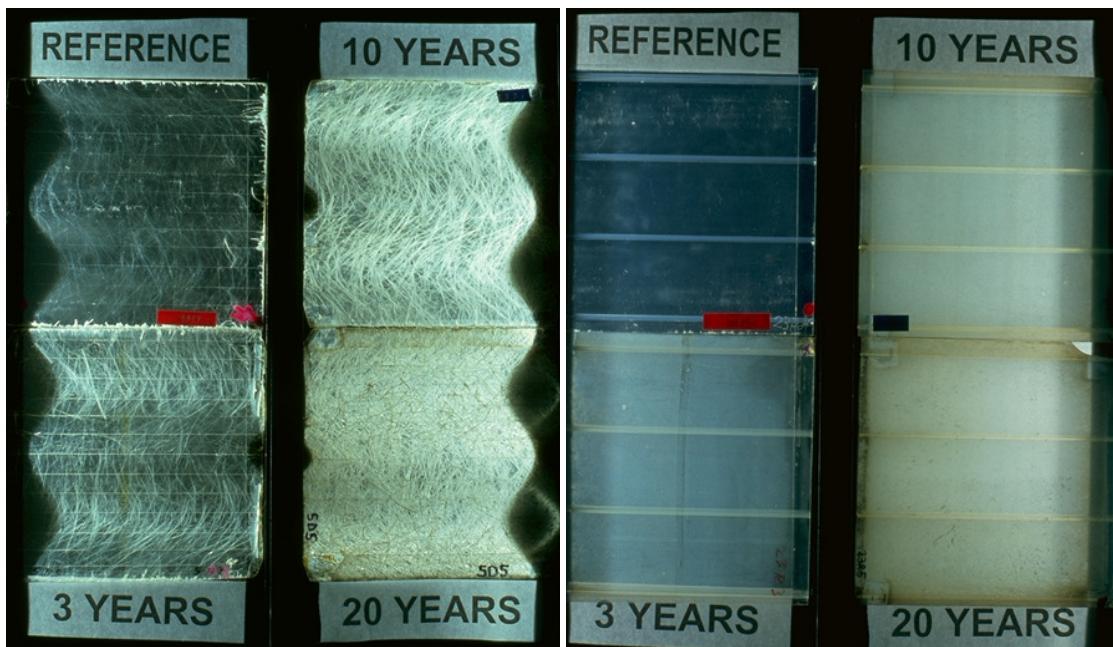
#### 4.5.2 Polymethylmetacrylat (PMMA)

Neben flachen PMMA-Scheiben wurden auch Platten verschiedener Strukturen getestet; sinusförmige Wellenplatten mit (PMMASin 1 und 2) und ohne (PMMASin 3) Glasfaser verstärkung, sowie mehrere Stegdoppel- und Dreifachplatten. Von diesen Spezialformen wies nur die unverstärkte Wellenplatte eine mit den flachen Scheiben

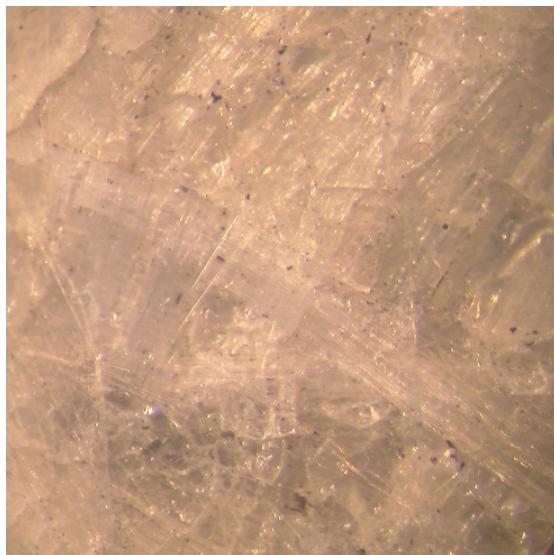
vergleichbare Transmission auf, siehe Fig. 25. Die dünnen faserverstärkten Platten wiesen im Neuzustand eine um einige Prozentpunkte höhere Transmission als die dickeren herkömmlichen Scheiben auf. Durch die Wetterexposition war aber ein stetiger Transmissionsrückgang zu beobachten. Dieser wird durch das Aufbrechen der PMMA-Matrix im Bereich der Glasfaserstränge (wie in 4.4 beschrieben) verursacht, siehe Fig. 26 und Fig. 27. Zusätzlich konnte bei diesen composite Proben auch eine leichte Vergilbung beobachtet werden. Die getesteten Stegdoppel- und Dreifachplatten wiesen schon im Neuzustand eine vergleichsweise niedrige solare Transmission von unter 0.8 auf. Es ist aber mit einer relativ hohen Messungenauigkeit zu rechnen, da die Transmission von der Anzahl durchleuchteter Verstrebungen, also von Grösse und Position des Messfleckes abhängt. Um diese Messungenauigkeit möglichst gering zu halten, wurde immer ein Steg in die Mitte des Lichtflecks platziert. Alle getesteten Stegplatten wiesen einen starken Transmissionsrückgang zwischen 10% und 50 % (relativ) auf. Ein grosser Teil dieses Rückgangs kann der Verstaubung im Plattenzwischenraum, die nicht durch Niederschlag wegwaschen wurde, zugeschrieben werden. Bei einigen Proben konnte aber auch eine leichte Vergilbung beobachtet werden, siehe Fig. 26.



**Fig. 25** Vergleich Verschiedener Plattenarten aus PMMA.



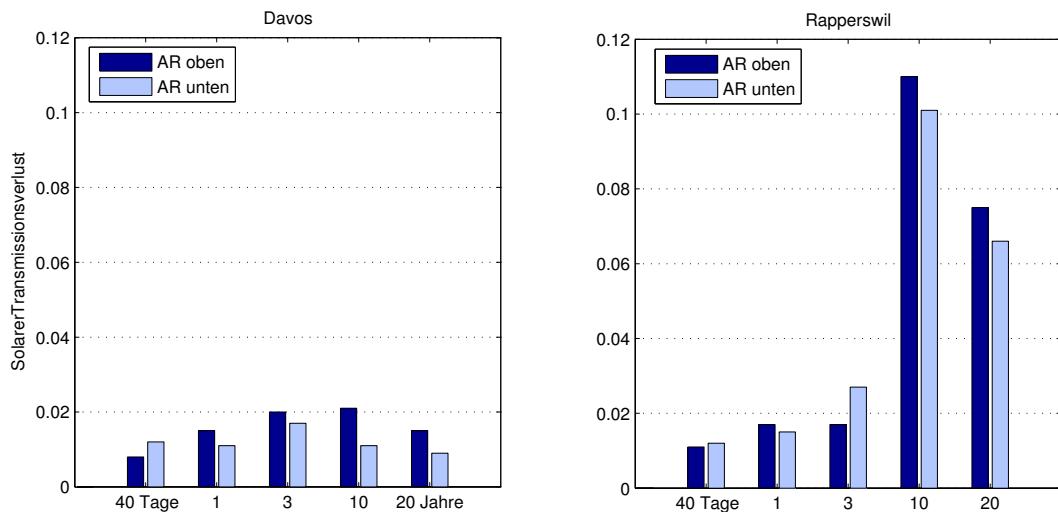
**Fig. 26** Aufnahme der unterschiedlich lang exponierten Proben einer faserverstärkten PMMA-Wellenplatte (PMMASin 1) und einer PMMA-Stegdoppelplatte (PMMASxP 1).



**Fig. 27** Mikroskopische Aufnahme der Oberfläche einer faserverstärkten PMMA-Probe (PMMASin 1) nach 20 Jahren Exposition in Rapperswil.

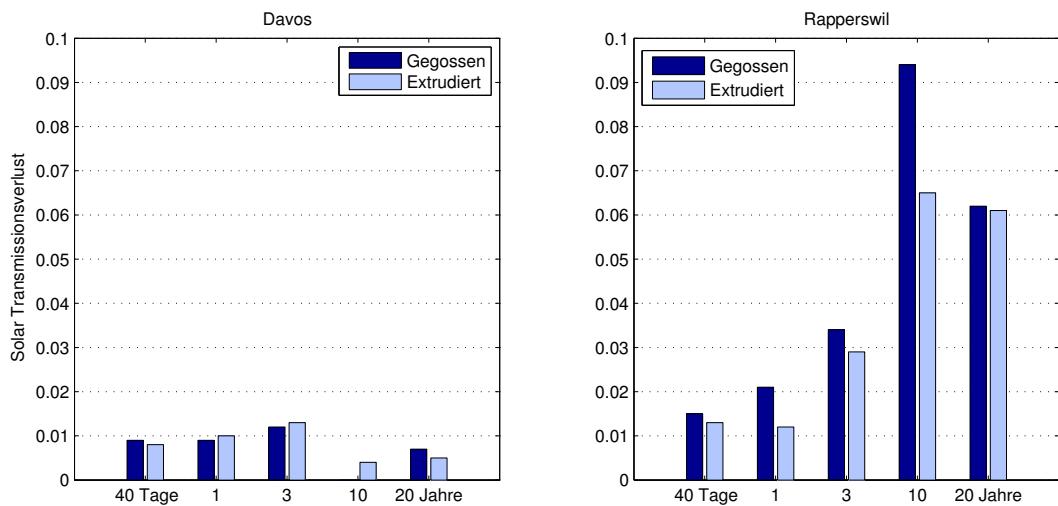
Des Weiteren wurde auch eine PMMA-Probe mit Antireflexschicht (AR) in den Test mit einbezogen. Diese Schicht reduziert die Spiegelung durch eine Struktur, hat aber keinen positiven Einfluss auf den Transmissionsgrad. Eine einseitig beschichtete Platte wurde je einmal mit der AR-Beschichtung nach aussen und nach innen exponiert. Die daraus resultierenden Transmissionsverluste in ungereinigtem Zustand werden in Fig. 28 miteinander verglichen. Dabei zeichnete sich ein Trend nach höheren Transmissionsverlusten bei Proben mit der AR-Schicht nach aussen ab. Dieser verstärkt sich mit zunehmendem Alter (Ausnahme: 3 Jahre Rapperswil). Da es sich um dieselbe Probe handelt, kann eine unterschiedliche Materialdegrada-

tion ausgeschlossen werden. Die strukturierte AR-Schicht verschmutzt also tendenziell stärker als die glatte Seite.



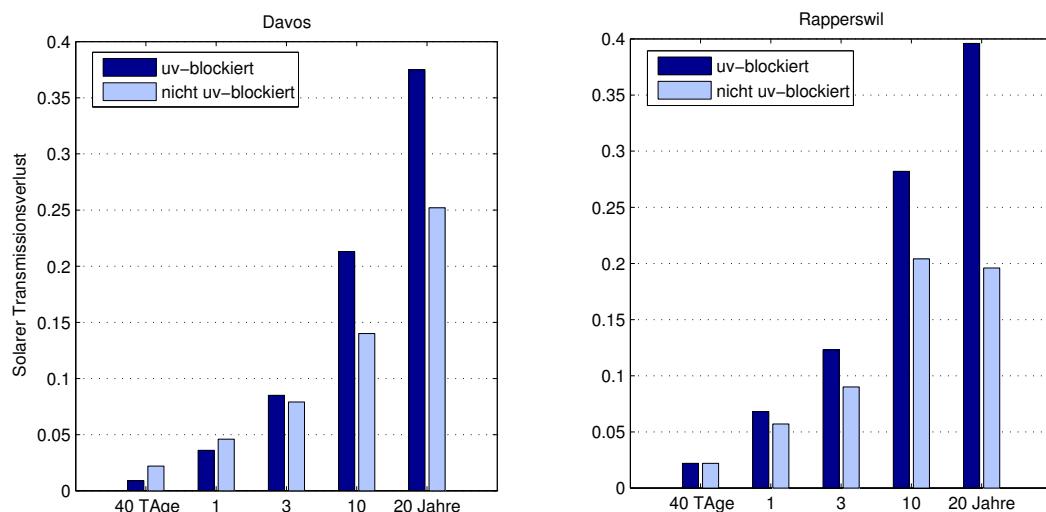
**Fig. 28** Einfluss einer Antireflex Schicht auf den Transmissionsverlust einer PMMA-Platte. AR oben: PMMAf1 5, AR unten: PMMAf1 6.

Es wurden auch zwei PMMA-Platten desselben Herstellers, aber mit verschiedener Herstellungsweise (gegossen und extrudiert), getestet. In Fig. 29 werden die solaren Transmissionsverluste dieser Platten im ungewaschenen Zustand miteinander verglichen. Diesbezüglich konnten in Davos keine Unterschiede zwischen den Herstellungsweisen ausgemacht werden. Bei den Proben aus Rapperswil trat in den ersten zehn Jahren ein Trend zu höheren Transmissionsverlusten der gegossenen Platten auf, der aber nach 20 Jahren nicht bestätigt werden konnte.



**Fig. 29** Vergleich der Transmissionsverluste einer gegossenen (moulded, PMMAf1 1) und einer extrudierten (extruded, PMMAf1 2) PMMA-Platte desselben Herstellers in ungereinigtem Zustand.

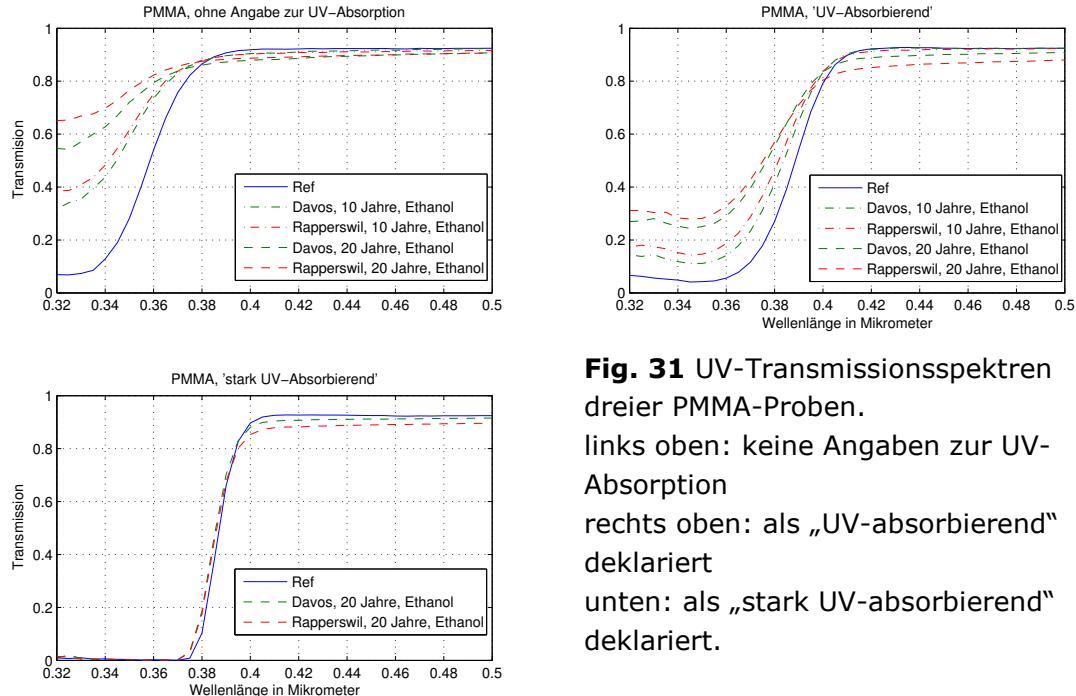
Die Mehrheit der getesteten PMMA-Proben wird vom Hersteller als UV-absorbierend, blockierend oder stabilisiert deklariert. In Fig. 30 wird der solare Transmissionsverlust einer UV-blockierenden mit dem einer nicht UV-stabilisierten Stegdoppelplatte verglichen. Entgegen der Erwartungen zeigten die UV-blockierenden Proben höhere Transmissionsverluste. Auch beim Betrachten der Proben konnte bei der UV-blockierenden Platte eine stärkere Vergilbung festgestellt werden. Dies ist insofern erstaunlich, da keine der getesteten flachen PMMA-Scheiben, die mehrheitlich UV-undurchlässig sind, deutliche Vergilbungsspuren aufwies.



**Fig. 30** Vergleich einer UV-blockierenden (PMMASxP 1) und einer nicht blockierenden (PMMASxP 3) PMMA-Stegdoppelplatte desselben Herstellers in ungereinigtem Zustand.

In Fig. 31 werden die Transmissionsspektren dreier PMMA-Abdeckungstypen miteinander verglichen, die sich bezüglich der Herstellerangaben zur UV-Absorption unterscheiden. Die vom Hersteller als „stark UV-absorbierend“ beschriebene Platte zeigte eine fast totale Blockierung von Licht mit Wellenlänge unter 3.7 µm. Diese blieb auch nach 20 jähriger Wetterexposition erhalten. Eine Platte ohne Herstellerangabe zur UV-Absorption und eine der Platten die mit „UV-absorbierend“ bezeichnet wurde, zeigten eine mit der Expositionsduer zunehmende Durchlässigkeit im UV-Bereich. Alle weiteren als „UV-absorbierend“ bzw. „UV-blockierend“ bezeichneten PMMA-Platten zeigten ähnlich der dargestellten „stark UV-absorbierenden“ Platte keine Veränderungen bezüglich Absorption im UV-Bereich.

Die Zerstörung des UV-Schutzes scheint aber nicht nur durch UV-Strahlung verursacht worden zu sein. Der Effekt fiel in Rapperswil deutlicher aus als im höher gelegenen Davos mit grösserer UV-Bestrahlungsintensität und Jahresdosis. Dies war bei beiden Platten mit Transmissionszunahme unabhängig von der Expositionsduer zu beobachten. Andere Parameter wie z.B. Temperatur oder höhere Luftsadstoff-Belastung scheinen einen entscheidenden Einfluss auf die Zerstörung des UV-Schutzes zu haben.

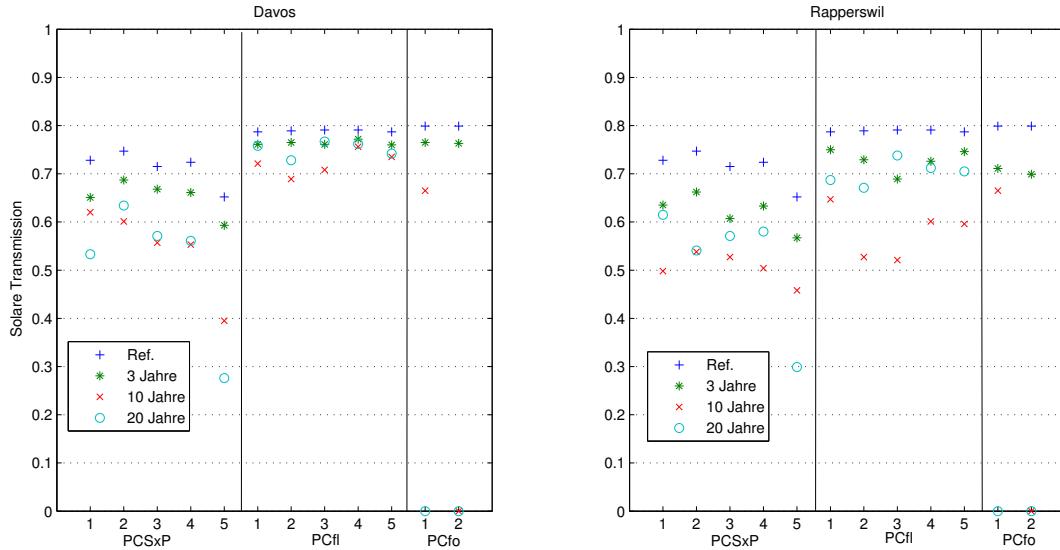


**Fig. 31** UV-Transmissionsspektren dreier PMMA-Proben.  
links oben: keine Angaben zur UV-Absorption  
rechts oben: als „UV-absorbierend“ deklariert  
unten: als „stark UV-absorbierend“ deklariert.

Vergleicht man die verschiedenen PMMA-Plattenarten, waren die Transmissionsverluste bei den Stegdoppel- und Dreifachplatten sowie den glasfaserverstärkten Proben deutlich höher als bei den konventionellen Platten. Bei einer Scheibe mit AR-Schicht konnte eine leichte Tendenz zu stärkerer Verschmutzung der beschichteten Seite festgestellt werden. Zwischen einer extrudierten und einer gegossenen Probe desselben Herstellers konnten keine klaren Unterschiede ausgemacht werden. Bei einer als „UV-blockierend“ deklarierten Stegdoppelplatte wurden höhere Transmissionsverluste gemessen als bei einer „nicht UV-blockierenden“ Stegdoppelplatte desselben Herstellers. Die Herstellerdeklaration „UV-absorbierend“ gewährleistet offensichtlich nicht den Langzeiterhalt des UV Schutzes.

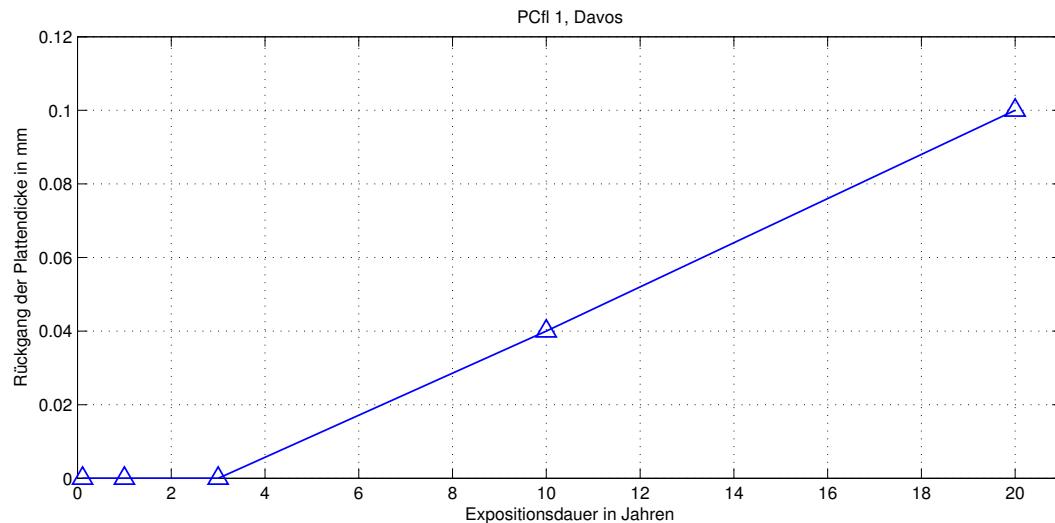
#### 4.5.3 Polycarbonat (PC)

Das Alterungsverhalten der verschiedenen Plattenarten aus PC ist in Fig. 32 dargestellt. Analog zu PMMA zeigen die Stegdoppelplatten eine deutlich niedrigere Transmission. Hier erlitten aber auch die flachen Proben eine sehr deutliche Transmissionsabnahme, die von weniger als 5% bis zu einem Drittel der ursprünglichen Transmission schwankte. Die PC-Folien waren teilweise bereits nach 10 Jahren Wetterexposition zerstört.



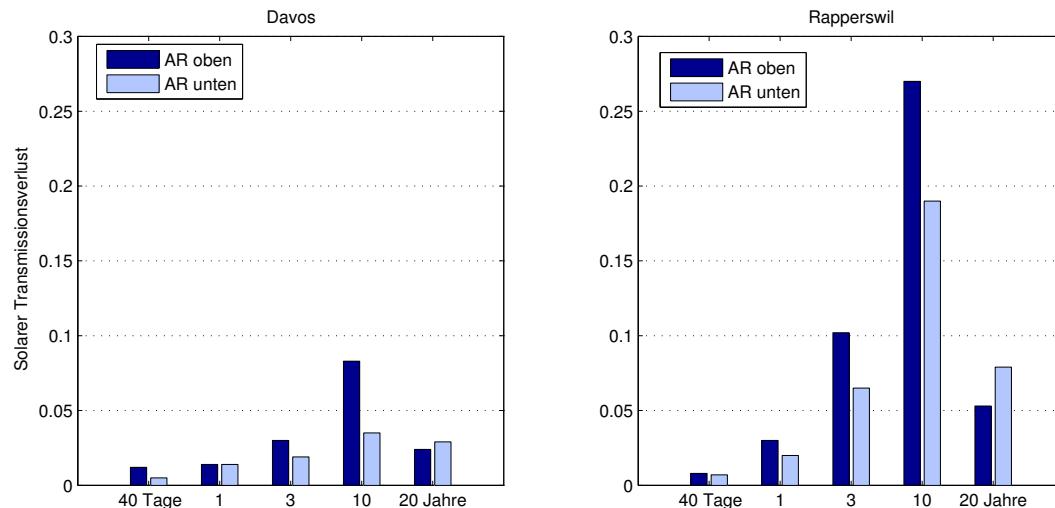
**Fig. 32** Vergleich der solaren Transmission von Polycarbonat (PC) Stegdoppelplatten mit der solaren Transmission von flachen PC-Scheiben und Folien.

Alle getesteten PC-Platten wurden von den Herstellern als UV-stabilisiert bezeichnet. Auch wenn bei allen Proben eine Vergilbung festgestellt wurde, blieb der UV-Schutz über 20 Jahre erhalten. Beim genauen Betrachten der Proben wurde eine gewisse Rauheit der exponierten Fläche im Vergleich zu den durch die Halterung geschützten Ecken bemerkt. Auf der vergrösserten fotografischen Aufnahme der 20 Jahre in Rapperswil exponierten Probe in Fig. 36 ist die körnige Struktur der Oberfläche gut zu erkennen. Dies liess die Vermutung auf Erosion der Oberfläche aufkommen. Tatsächlich konnte bei allen getesteten PC-Platten eine Verringerung der Stärke im exponierten Bereich gemessen werden. Dazu wurde die Plattenstärke der geschützten Ecken mit der Stärke der frei exponierten Fläche in unmittelbarer Nähe verglichen. Nach 20 Jahren wurde bei beiden Standorten eine Verjüngung zwischen 0.08 mm und 0.11 mm gemessen. Dabei konnte eine leichte Tendenz zu stärkerer Erosion in Davos festgestellt werden. Bezuglich verschiedener Fabrikate oder unterschiedlicher Oberflächenstruktur (Entspiegelung) bestanden hingegen keine Unterschiede. Wie in Fig. 33 gezeigt wird, trat in den ersten drei Expositionsjahren keine messbare Verjüngung auf, danach wurde eine stetige Materialabtragung beobachtet. Die in Fig. 33 dargestellten Messergebnisse lassen vermuten, dass dieser Effekt bereits innerhalb von 5 Jahren Exposition einsetzt.



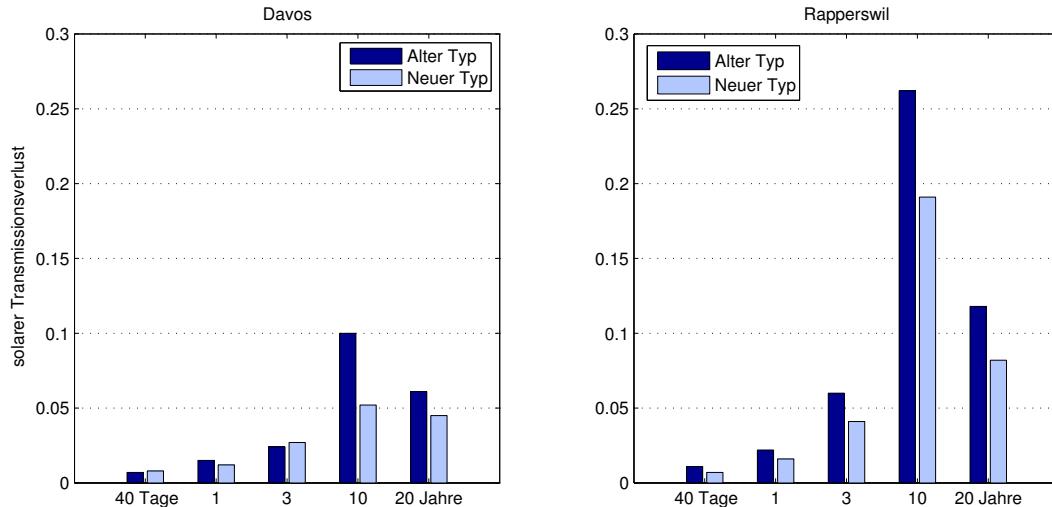
**Fig. 33** Verminderung der Plattendicke durch Erosion von in Davos exponierten PC-Proben (PCfl 1) nach unterschiedlicher Expositionsdauer.

Auch eine einseitig entspiegelte PC-Probe wurde analog zur AR-PMMA-Probe (Fig. 28) getestet. Die Resultate werden in Fig. 34 dargestellt. In den ersten 10 Jahren bestätigte sich der auch bei PMMA gemessenen Trend: Höhere Transmissionsverluste mit AR-Schicht nach oben. Dies konnte aber nach 20 Jahren nicht mehr bestätigt werden. Da nach 20 Jahren bei beiden Proben die obersten 0.1 mm und somit auch die AR-Schicht nicht mehr vorhanden waren, konnte auch kein Unterschied mehr erwartet werden.



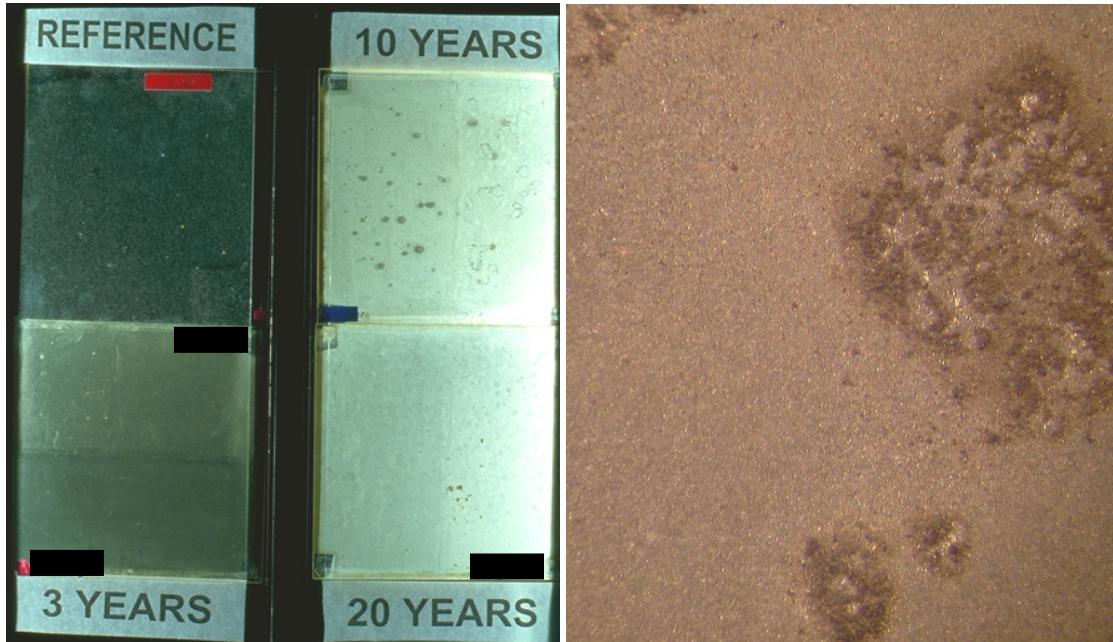
**Fig. 34** Einfluss einer Antireflex Schicht auf den Transmissionsverlust einer PC-Platte. AR oben: (PCfl 3), AR unten (PCfl 4).

In Fig. 35 wird eine vom Hersteller als „Verbesserter Typ“ bezeichnete PC-Platte mit ihrer Vorgängerin verglichen. Tatsächlich wurden bei der verbesserten Probe auch geringere Transmissionsverluste gemessen, die auch nach der Reinigung mit Seifenwasser erhalten blieben.



**Fig. 35** Der neue, verbesserte Typ einer PC-Platte (PCfl 5) im Vergleich mit dem Vorgänger Typ (PCfl 3).

Bei den meisten PC-Proben konnte in Rapperswil nach 10 und 20 Jahren Schimmelpilzbefall beobachtet werden. Diese konnten sich vermutlich auf der aufgerauten Oberfläche besser festsetzen. In Fig. 36 wird eine vergrösserte Aufnahme einer befallenen Stelle und eine Zeitserie von in Rapperswil exponierten PC-Proben dargestellt. Darauf sind nach 10 und nach 20 Jahren Exposition befallene Stellen sichtbar. Dabei ist zu beachten, dass der Befall nach 10 Jahren deutlich stärker war als nach 20 Jahren. Durch die Erosion der Oberfläche wurden wahrscheinlich auch die Verunreinigungen durch Schimmelpilze mit abgetragen.

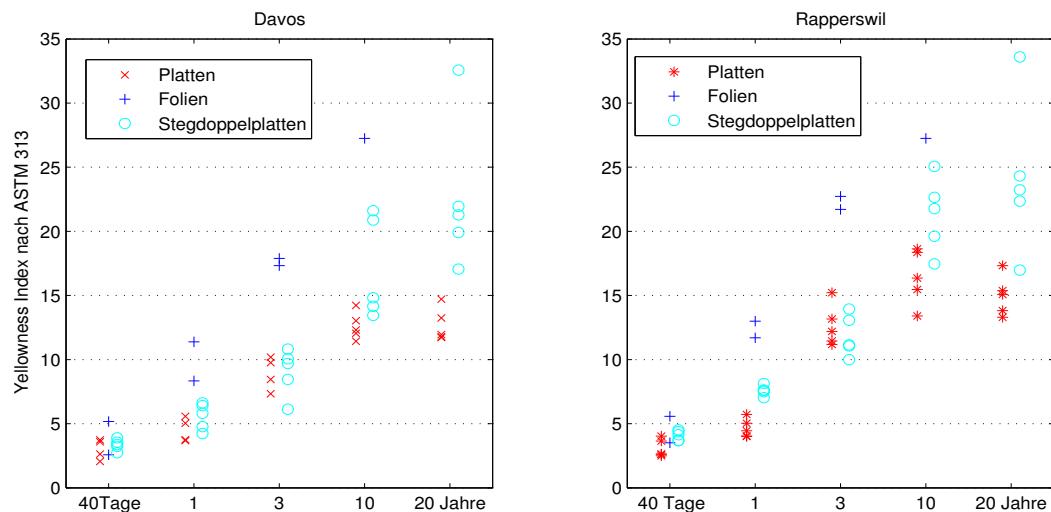


**Fig. 36** Aufnahmen der mit Schimmelpilz befallenen PC-Proben (PCfl 1) aus Rapperswil. Links Proben nach unterschiedlicher Expositionsduer in Durchlicht, rechts eine befallene Stelle vergrössert.

Wie bereits erwähnt, konnte bei einigen PC-Proben schon bei der Betrachtung mit dem Auge eine Farbänderung oder Vergilbung beobachtet werden, siehe Fig. 37. Dies ist sowohl bei der dargestellten Stegdoppelplatte als auch bei der flachen Probe sichtbar. Das weissliche Viertel der 20 jährigen Scheibe röhrt von der Reinigung mit Ethanol her. Bei der Stegdoppelplatte ist nach 20 Jahren auch eine inwändige Verschmutzung deutlich zu erkennen. Erstaunlicherweise scheint bei der flachen Scheibe die Vergilbung nach 20 Jahren eher schwächer ausgeprägt zu sein als nach 10 Jahren. Dies wird auch in Fig. 38 bestätigt, in der der Yellowness Index der getesteten PC-Proben dargestellt wird. Bei den flachen Scheiben veränderte sich der YI zwischen 1995 und 2005 in Davos kaum und in Rapperswil verminderte er sich sogar leicht. Eine Erklärung dafür könnte die bereits erwähnte Erosion sein. Es ist vorstellbar, dass degradierte Bestandteile mit den starken Niederschlägen vor der Probenentnahme nach 20 Jahren abgewaschen wurden. Bei den Stegdoppelplatten wurde eine stetige Zunahme des YI gemessen, die sicherlich auch durch inwändige Verschmutzung verstärkt wurde. Die dünnen PC-Folien vergilben deutlich stärker als die dickeren PC-Proben, und waren bereits nach 10 Jahren teilweise und nach 20 Jahren vollständig zerstört.

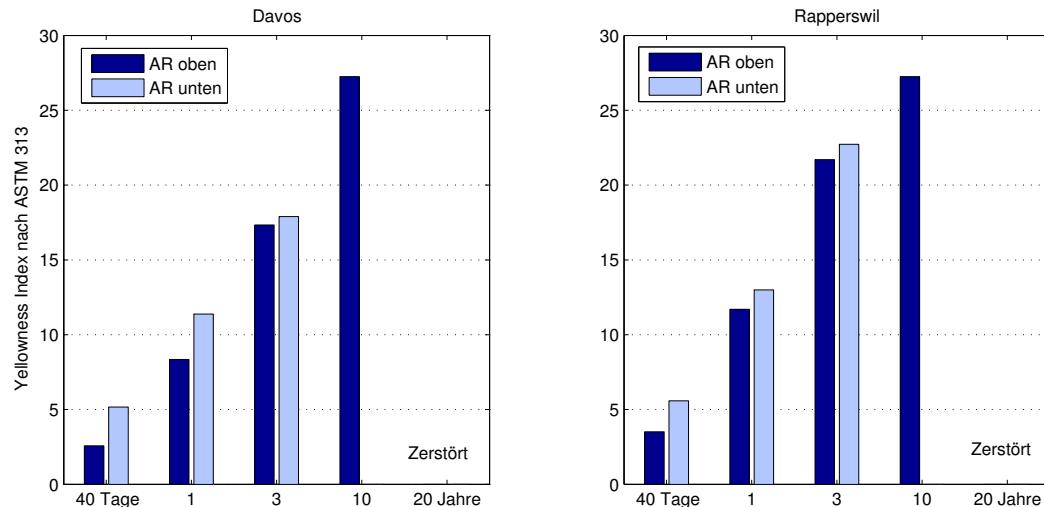


**Fig. 37** PC-Proben aus Rapperswil im Durchlicht, links: Stegdoppelplatte (PCSxP 5), rechts: Flache Scheibe (PCfl 1).



**Fig. 38** Yellowness Index der getesteten PC-Proben.

Die getestete PC-Folie war mit einer Antireflexschicht (AR) versehen. Um den Einfluss dieser Schicht auf die Alterungsbeständigkeit zu untersuchen, wurden diese Folien mit der AR-beschichteten Seite sowohl nach oben als auch nach unten exposiert. In Fig. 39 wird der Yellowness Index dieser beiden Proben verglichen. Mit der Schicht nach unten wurde an beiden Standorten eine stärkere Vergilbung gemessen. Die AR-Schicht schien also einen gewissen Schutz vor Verwitterung zu bieten, da die Proben mit AR-Schicht nach oben, zusätzlich zur geringeren Vergilbung, nach 10 Jahren auch noch nicht zerstört waren.



**Fig. 39** Yellowness Index der getesteten PC-Folie. Zwei Proben derselben Folie werden verglichen, einmal mit AR Schicht nach oben (PCfo 1) und einmal mit AR-Schicht nach unten Exponiert (PCfo 2).

Bei den getesteten PC-Proben konnte eine Materialdegradation beobachtet werden, welche sich durch eine deutliche Vergilbung, eine Erosion der Ausgesetzten Oberflächen und einen Zerfall der PC-Folien manifestierte. Analog zu PMMA konnte eine leicht stärkere Verschmutzung der beschichteten Oberfläche einer AR-beschichteten PC-Probe beobachtet werden. Die AR-Schicht der PC-Folie schien hingegen einen gewissen Schutz gegen Verwitterung zu bieten. Der Vergleich einer verbesserten Scheibe mit ihrer Vorgängerin konnte deutlich geringere Transmissionsverluste der verbesserten Scheibe aufzeigen. In Rapperswil wiesen ein Grossteil der getesteten PC-Proben Schimmelbefall auf, dies nach 10 und 20 Jahren Exposition.

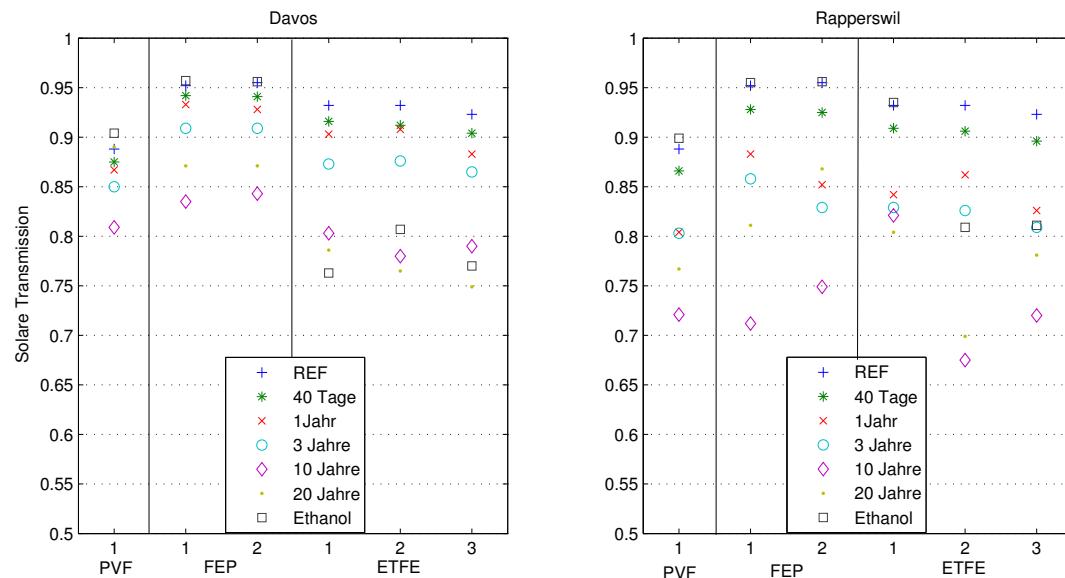
#### 4.5.4 Fluorierte Kunststoffe

Dünne Folien aus fluoriertem Kunststoff wiesen sehr hohe solare Transmissionskoefizienten von über 0.9 auf. Vergleichbare Werte wurden nur von eisenarmen Gläsern erreicht. Verschiedene fluorierte Kunststoffe wurden getestet:

- FEP: Fluoriertes Ethylen-Propylen,
- PVF: Polyvinylchlorid,
- ETFE: Tetrafluorethylen-Ethylen.

In Kapitel 2.1 wurde bereits auf die hohen Transmissionsverringerungen dieser Kunststoffe hingewiesen, die bei allen getesteten Proben, selbst in Davos mit geringerer Verschmutzung, bei über 10 % lagen. Es ist aber zu beachten, dass die FEP- und PVF-Proben durch die Reinigung mit Ethanol auch nach 20 Jahren wieder dieselben Transmissionswerte wie im Neuzustand erreichten, siehe Fig. 40. Somit ist also bei diesen Materialien eine Transmissionsverschlechterung durch Materialdegradation auszuschliessen. Die ETFE-Proben erwiesen sich hingegen als nicht so leicht zu reinigen. Bei einer in Rapperswil exponierten Probe wurde die ursprüngli-

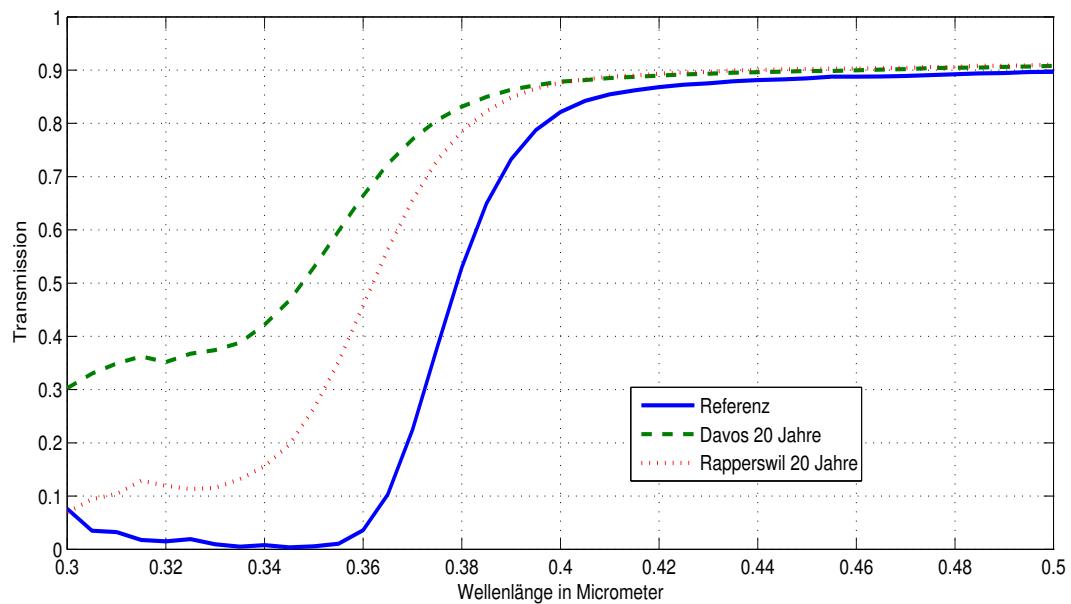
che Transmission durch das Reinigen mit Ethanol wieder hergestellt, bei den anderen fünf ETFE-Proben blieben jedoch beachtliche Transmissionsverluste erhalten. Da die dünnen ETFE-Folien viel vorsichtiger gereinigt werden mussten als beispielsweise die robusten Gläser oder Plattenmaterialien, konnte der Schmutz möglicherweise auch nicht vollständig entfernt werden. Dies führte zu einer Unterschätzung der Verschmutzung und einer Überschätzung der Degradation.



**Fig. 40** Vergleich verschiedener fluorierter Kunststoffe. FEP: Fluoriertes Ethylen-Polypropylen, PVF: Polyvinylchlorid, ETFE: Tetrafluorethylen-Ethylen. Dabei werden die unterschiedlich lange exponierten Proben mit der Referenz und der 20 Jahre exposierten Probe verglichen.

Für die mit Ethanol gereinigte PVF-Probe wurde nach 20 Jahren Exposition eine geringfügig höhere solare Transmission als im Neuzustand gemessen. Betrachtet man die Transmissionsspektren der PVF-Proben, so kann man, analog zur PMMA-Probe ohne UV-Schutz, eine Transmissionszunahme im UV-Bereich erkennen. In Fig. 41 wird ein Ausschnitt des Spektrums der Referenz mit den Spektren der mit Ethanol gereinigten, 20 jährigen Proben verglichen. Im Neuzustand wurde die UV-Strahlung etwa bis  $0.37 \mu\text{m}$  fast vollständig abgeblockt. Nach 20 Jahren Exponierung wurde eine Verschiebung des Absorptionsbereiches um  $0.1 \mu\text{m} - 0.2 \mu\text{m}$  zu kürzeren Wellenlängen gemessen. Zusätzlich wurde die Transmission im absorbierenden Bereich unterhalb von  $0.35 \mu\text{m}$  deutlich erhöht. Diese Materialdegradation trat im höher gelegenen Davos mit höherer UV-Dosis deutlich stärker auf als in Rapperswil. Dies legt den Schluss nahe, dass diese Transmissionsänderung mit der UV-Strahlendosis

zusammenhängt.



**Fig. 41** Veränderung der UV-Transmission bei PVF. Das Spektrum der Referenz wird mit denen der mit Ethanol gereinigten, 20 jährigen Proben verglichen.

Die getesteten Folien aus fluoriertem Kunststoff waren zum Teil sehr dünn, von 25 µm bis 120 µm. Trotzdem war auch nach 20 Jahren keine dieser Folien vollständig zerstört. Bei den meisten Proben liess aber die Spannung deutlich nach. Gelegentlich waren auch Dellen oder sogar Löcher zu beobachten, die vermutlich durch Hagel verursacht wurden. Die getesteten Proben waren nur 15x15 cm gross, daher war die Belastung an den Rändern durch Schnee oder Windstöße deutlich geringer als bei grösseren Flachkollektoren.



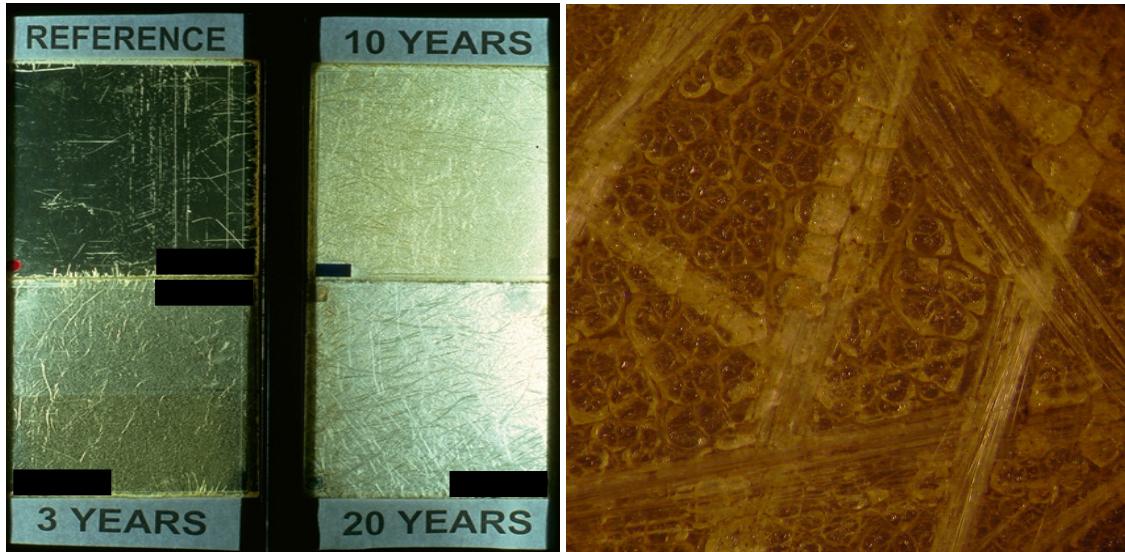
**Fig. 42** Hagelschäden bei einer in Rapperswil exponierten FEP-Folie (FEP 1).

Die getesteten Folien aus fluoriertem Kunststoff wiesen entgegen den Erwartungen hohe Transmissionsverluste auf, die auch in Davos im Bereich von 10 % lagen. Bei den PVF- und den FEP-Proben konnte durch Reinigung mit Ethanol die ursprüngliche Solare Transmission wiederhergestellt oder sogar übertroffen werden, bei den ETFE-Folien blieben, bis auf eine Ausnahme, auch nach der Reinigung mit Ethanol deutliche Transmissionsverluste erhalten. Eine deutliche Transmissionszunahme im UV-Bereich wurde bei den PVF Proben gemessen.

#### 4.5.5 Ungesättigtes Polyester (UP)

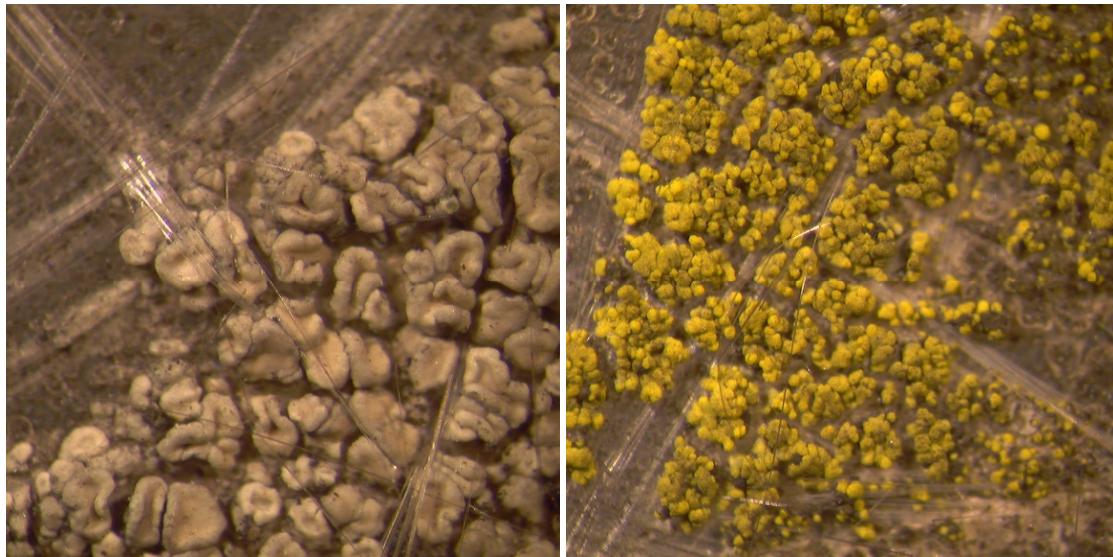
Ähnlich wie beim faserverstärkten PMMA konnte auch bei den getesteten Polyester (UP) Proben, alle ebenfalls faserverstärkt, eine starke Materialdegradation festgestellt werden. Mit zunehmendem Alter wurden die Glasfasern als weisse Struktur sichtbar, siehe Fig. 43. Bei dieser Probe war auch sehr deutlich zu beobachten, wie die UP-Matrix spröde wurde und vor allem über den Fasern aufbrach. Dabei traten die Glasfasern an die Oberfläche. Es ist auch zu beachten, dass die UP-Proben unabhängig von der Expositionsduer einen sehr hohen YI aufwiesen. Die Referenzen dieser Proben wurden nach 20 Jahren hoch aufgelöst nachgemessen. Dabei wurde

bei der vor Licht geschützten und temperaturstabil gelagerten flachen Probe ein sehr hoher YI von 23.6 gemessen. Es hat also auch bei der geschützt aufbewahrten Referenzprobe eine deutliche Vergilbung stattgefunden. Der "gelbliche" Eindruck der Referenzprobe in Fig. 43 entspricht nicht dem Virginalzustand.



**Fig. 43** Foto von exponierten UP-Proben die mit Glasfaserverstärkung (UPfl 1). Links; Proben nach unterschiedlicher Expositionsduer in Davos. Rechts; Vergrösserung der Oberfläche der 20 Jahre in Rapperswil exponierten Probe.

Die in Rapperswil exponierten UP-Proben wiesen Befall von Flechten und Schimmel-pilzen auf. Diese fanden offensichtlich auf der aufgerauten Oberfläche der verwit-terten Probe guten Halt. In Fig. 44 ist sichtbar wie sich die Flechten teilweise unter herausstehenden Glasfasern festgesetzt haben.



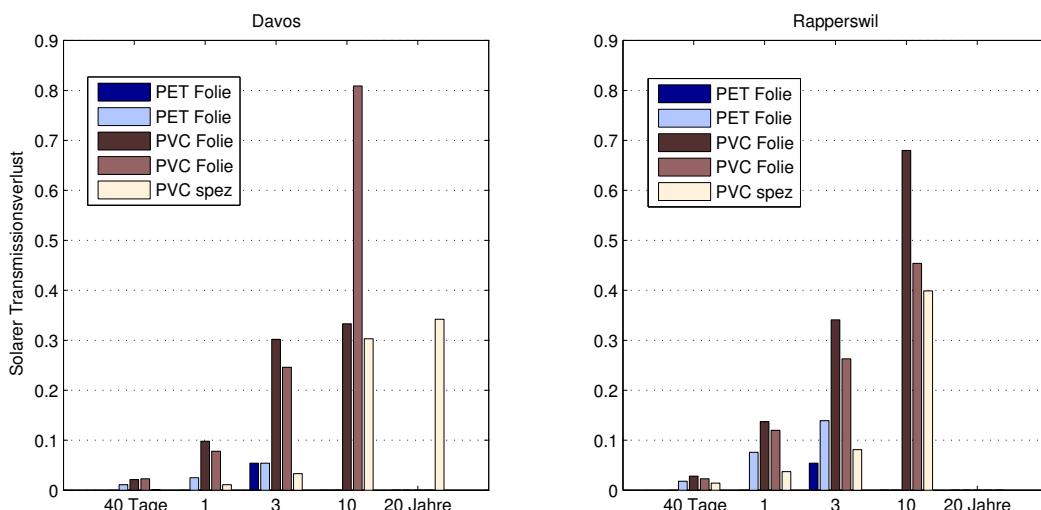
**Fig. 44** Flechtenbefall auf einer in Rapperswil während 20 Jahren exponierten UP-Probe (UPfl 1).

#### 4.5.6 Polyvinylchlorid (PVC) und Polyethylen Terephthalat (PET)

Alle getesteten PVC- und PET-Folien wurden im Verlauf der 20 jährigen Exposition zerstört. Wie in Fig. 45 dargestellt wird, zeigten die beiden getesteten PET-Proben in den ersten 3 Jahren eine eher geringe Transmissionsabnahme, etwa vergleichbar mit den getesteten Fluor-Kunststoff-Folien. Nach 10 Jahren waren sie, sowohl in Davos als auch in Rapperswil, mechanisch zerstört.

Die PVC-Folien erlitten schon in den ersten drei Jahren einen stetigen Transmissionsverlust und waren nach 10 Jahren stark verfärbt. Da sie aber noch nicht vollständig zersetzt waren, konnten optische Messungen noch durchgeführt werden. Auch die getestete PVC-Spezialplatte zeigte starke Transmissionsverluste, aber nur die in Rapperswil exponierte Probe war nach 20 Jahren mechanisch zerstört. Die Transmissionsverluste sind sicherlich zu einem grossen Teil auf thermische Belastung zurückzuführen, da sie auch in beschleunigten Alterungsversuchen erhöhten Temperaturen beobachtet wurden.

Während bei den PVC-Proben bereits visuell eine starke Vergilbung bis zur gänzlichen Schwärzung der Probe beobachtet werden konnte, war bei den PET-Folien hingegen dies von Auge nicht sichtbar, siehe Fig. 46.



**Fig. 45** Solarer Transmissionsverlust der getesteten PET- und PVC-Proben. Bei 10 und 20 Jahren bedeutet das Fehlen eines Wertes mechanische Zerstörung.

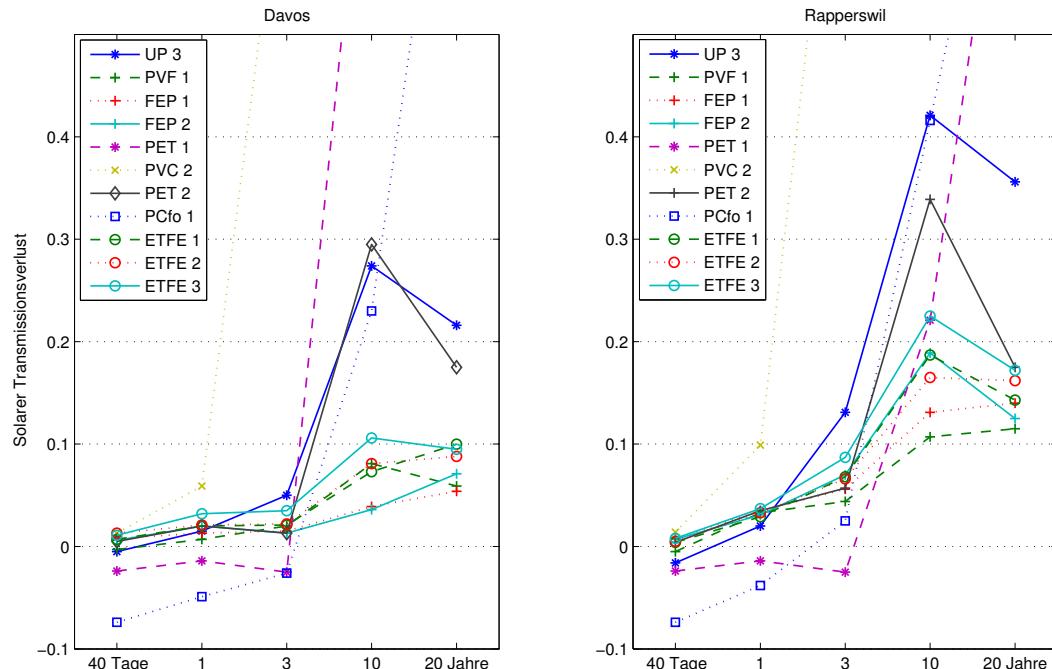


**Fig. 46** Zerstörung von Kunststofffolien durch Wetterexponierung, Links: PVC, Rechts: PET

## 4.6 Zweitabdeckungen

Beim einfach verglasten Flachkollektor stellt der Energietransport durch Konvektion zwischen Absorber und Abdeckung, den grössten Wärmeverlustmechanismus dar. Um diese Verluste zu reduzieren, kann eine transparente Zweitabdeckung, einge-fügt als Konvektionsbremse zwischen Absorber und Abdeckung, eingesetzt werden. Einige Materialien (vor allem dünne Folien), die zur Verwendung als Zweitabde ckung geeignet schienen, wurden unter einer Schutzscheibe aus low Fe Glas mit hohem Transmissionsgrad exponiert. Der Rückgang der solaren Transmission dieser Proben wird in Fig. 47 dargestellt. Die PVC-, PC- und eine der PET-Folien wurden trotz Schutzscheibe mechanisch zerstört. Bei einer weiteren PET-Folie und der fa- serverstärkte UP-Platte waren bereits nach 10 Jahren sehr hohe Transmissionsab nahmen zu verzeichnen, sie wurden aber nicht vollständig mechanisch zerstört. Wie in Fig. 48 gezeigt wird, vergilbte die PC-Folie bereits nach 3 Jahren, und nach 10 Jahren war sie bereits matt und mit Rissen durchzogen. Auch wenn die in Fig. 48 gezeigte PET-Probe nicht vollständig zerstört wurde, so wies sie doch nach 20 Jah- ren deutliche Risse auf. Diese Probe wurde durch die Exponierung getrübt und wirk te weisslich milchig, tendierte aber nicht zu einem gelben Erscheinungsbild. Auch die PVC-Probe vergilbte bereits nach 3 Jahren stark, sie verfärbte sich aber schon nach 10 Jahren bis zu einen undurchsichtigen Schwarz und war mit Rissen durchzo gen. Diese Verfärbung trat unter der Schutzscheibe schneller und stärker auf als bei der offen exponierten Probe. Es ist zu vermuten, dass unter der Schutzscheibe hö here Temperaturen auftraten, und dass die beschleunigte Degradation dadurch zu stande kam. Die oben erwähnten Proben erwiesen sich also zur Verwendung als Zweitabdeckung in Flachkollektoren als ungeeignet, zumindest wenn, wie bei die-

sem Test, eine UV-durchlässige Erstabdeckung verwendet wird. Alle 6 getesteten Folien aus fluoriertem Kunststoff (PVF, FEP, und ETFE) zeigten ähnliche Transmissionsabnahmen, die für Davos zwischen 0.05 und 0.1 lagen und in Rapperswil 0.1 durchgehend überschritten, und zwar bereits nach 10 Jahren. Zumindest bei PVF und FEP können diese Verluste eindeutig der Verschmutzung zugeordnet werden, da bei diesen Proben nach der Reinigung mit Ethanol wieder dieselbe Transmission wie im Neuzustand gemessen wurde. Die Transmissionsverluste durch Verschmutzung lagen bei den abgedeckten Proben im ähnlichen Bereich wie bei den offen exponierten. Dies ist jedoch auf die Art der Versuchsdurchführung zurück zu führen, da diese Proben nicht (wie in einer realen Kollektoranwendung) in einen relativ abgeschlossenen Raum eingebaut wurden, sondern lediglich unterhalb einer Schutzscheibe exponiert wurden.



**Fig. 47** Transmissionsverlust der ungereinigten Proben die unter einer Scheibe exponiert wurden um ihre Eignung als Zweitabdeckung zu untersuchen.



**Fig. 48** Fotos von Expositionsreihen einiger Proben die unter einer Glasscheibe exponiert wurden. Oben links: PVC (PVC 2), oben rechts: PET (PET 2), unten links: PC(PCfo 1), unten rechts: FEP (FEP 2).

## 5 Schlussfolgerungen

Die Proben wurden vor 1985 nach dem damals aktuellen Stand des Marktes möglichst repräsentativ ausgewählt. Die gewonnenen Resultate beziehen sich auf die einzelnen getesteten Proben und können nur bedingt generalisiert werden. Wenn bestimmte Effekte bei allen getesteten Proben einer Materialgruppe auftraten, bedeutet das nicht unbedingt, dass auch alle heutigen Vertreter dieser Gruppen denselben Effekt zeigen. Trotzdem konnten Erkenntnisse gewonnen werden, die für den Kollektorbau von grossem Nutzen sind. In den nachfolgenden Tabellen werden die gemessenen Transmissionsverluste für die verschiedenen Materialgruppen und die beiden Standorte zusammengefasst. Um Form-Effekte auszuschliessen, wurden bis auf erwähnte Ausnahmen nur flache Proben in den Vergleich mit einbezogen.

**Tabelle 8** Abnahme der Transmission von verschiedenen Materialien nach 20 Jahren Wetterexposition in Davos.

| Gruppe          | Anzahl Proben  | Verschmutzung [%]       | Degradation [%]          | Total [%]   |
|-----------------|--|-------------------------|--------------------------|-------------|
| Low Fe Glas     | 8  | 0.7 – 2.1               | -0.6 – 2.9               | -0.2 – 4.5  |
| Float Glas      | 8  | 0.0 – 1.1               | 0.0 – 2.0                | 0.7 – 2.7   |
| PMMA            | 6  | 0.7 – 1.2               | -1.2 – 0.5               | -0.2 – 1.4  |
| PC              | 5 <sup>1</sup>   | -2.8 – 2.3 <sup>2</sup> | 0.7 – 10.5 <sup>2</sup>  | 3.3 – 7.7   |
| ETFE            | 3  | -2.5 – 4.5 <sup>3</sup> | 14.1 – 18.3 <sup>3</sup> | 15.7 – 18.7 |
| FEP             | 2  | 9.0                     | 0.0                      | 9.0         |
| PVF             | 1  | 1.6                     | -2.6                     | -1.0        |
| UP <sup>4</sup> | 3  | -                       | -                        | 26.8 – 41.7 |
| PET und PVC     | 4  | Zerstört                | zerstört                 | zerstört    |
| <hr/>           |  |                         |                          |             |
| <sup>1</sup> :  | Nur PC-Platten miteinbezogen, zwei zusätzliche PC-Folien wurden während der Exposition zerstört.   |                         |                          |             |
| <sup>2</sup> :  | Beeinträchtigung der exponierten Proben durch Reinigung mit Ethanol; Unterschätzung der Verschmutzung und Überschätzung der Degradation.                                     |                         |                          |             |
| <sup>3</sup> :  | Reinigung der dünnen Folien nur mit grosser Vorsicht möglich ; Unterschätzung der Verschmutzung und Überschätzung der Degradation.   |                         |                          |             |
| <sup>4</sup> :  | Composite Material mit Glasfasern verstärkt, Auch zwei Wellenplatten mit einbezogen. Oberflächen der exponierten Proben stark aufgeraut; keine gründliche Reinigung möglich. |                         |                          |             |

**Tabelle 9** Abnahme der Transmission von verschiedenen Materialien nach 20 Jahren Wetterexposition in Rapperswil.

| Gruppe          | Anzahl Proben  | Verschmutzung [%]       | Degradation [%]          | Total [%]   |
|-----------------|----------------|-------------------------|--------------------------|-------------|
| Low Fe Glas     | 8              | 4.8 - 8.3               | 0.1 - 8.8                | 6.3 - 17.3  |
| Float Glas      | 8              | 4.2 - 10.3              | 0.7 - 6.7                | 7.7 - 12.1  |
| PMMA            | 6              | 7.0 - 8.3               | 0.6 - 1.7                | 7.3 - 8.6   |
| PC              | 5 <sup>1</sup> | 4.2 - 8.0 <sup>2</sup>  | 2.5 - 9.8 <sup>2</sup>   | 6.7 - 15.0  |
| ETFE            | 3              | 3.3 - 14.1 <sup>3</sup> | -0.3 - 12.9 <sup>3</sup> | 13.7 - 24.8 |
| FEP             | 2              | 9.2 - 15.1              | -0.2 - 0.0               | 9.2 - 15.3  |
| PVF             | 1              | 15.0                    | -2.0                     | 12.9        |
| UP <sup>4</sup> | 3              | -                       | -                        | 36.7 - 43.2 |
| PET und PVC     | 4              | Zerstört                | zerstört                 | zerstört    |

<sup>1</sup> : Nur PC-Platten miteinbezogen, zwei zusätzliche PC-Folien wurden während der Exposition zerstört.

<sup>2</sup> : Beeinträchtigung der exponierten Proben durch Reinigung mit Ethanol; Unterschätzung der Verschmutzung und Überschätzung der Degradation.

<sup>3</sup> : Reinigung der dünnen Folien nur mit grosser Vorsicht möglich ; Unterschätzung der Verschmutzung und Überschätzung der Degradation.

<sup>4</sup> : Composite Material mit Glasfasern verstärkt, Auch zwei Wellenplatten mit einbezogen. Oberflächen der exponierten Proben stark aufgeraut; keine gründliche Reinigung möglich.

Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass unter „Verschmutzung“ derjenige Anteil an der Transmissionsabnahme fällt, welcher durch Reinigen mit Ethanol beseitigt werden konnte. Unter „Degradation“ sind die durch andere Effekte verursachten Einbussen an solarer Transmission zusammengefasst. Darunter fallen etwa Reflexionsverluste an der Oberfläche aufgrund nur schwer entferbarer Schmutzrückstände oder Oberflächenangriffs, aber auch Verluste hervorgerufen durch Veränderungen des Materials.

Die gemessenen solaren Transmissionsabnahmen in Rapperswil waren bei allen Materialien sehr hoch. Transmissionseinbussen der Kollektorabdeckung haben eine Verminderung des Wirkungsgrades eines Kollektors in derselben Grössenordnung zur Folge. Dabei ist zu beachten, dass nach 10 Jahren bei einer Grosszahl der Proben niedrigere Transmissionswerte gemessen wurden als nach 20 Jahren, da starke Niederschläge im Vorfeld der Probenentnahme 2005 eine reinigende Wirkung hatten. Nur in Davos und für die getesteten Glas-, PMMA- und PVF-Proben blieben die Transmissionsabnahmen auch nach 20 Jahren im Bereich weniger Prozentpunkte. Erstaunlicherweise wiesen die getesteten ETFE- und FEP-Proben an beiden Standorten sehr hohe Transmissionsverluste auf. Als Kollektorabdeckung ungeeignet erwiesen sich die getesteten PET- und PVC-Folien, die nach 20 Jahren Exposition zerstört waren.

Glasfaserverstärkte Kunststoffe zeigten sehr starke Transmissionsabnahmen aufgrund starker Streuung hervorgerufen durch Mikrorisse und Brüche der Fasern oder der umgebenden Matrix. Daher erwiesen sich die getesteten composite Materialien als ungeeignet für Kollektorabdeckungen. Stegdoppel- und Dreifachplatten wiesen

schon im Neuzustand eine deutlich niedrigere solare Transmission auf, als flache Scheiben. Zusätzlich zur Degradation und Verschmutzung der Oberfläche verstaubten solche Platten auch inwendig, was eine starke Transmissionsabnahme zur Folge hatte.

## 5.1 Verschmutzung

Die Verschmutzung spielt in städtischen Gebieten eine sehr wichtige Rolle und wurde von Experten bisher unterschätzt. Für die im modernen Kollektorbau am häufigsten eingesetzten low Fe Gläser wurde nach 20 Jahren in Rapperswil eine Verminderung des solaren Transmissionsgrades durch entfernbare Verschmutzung zwischen 4.8 % und 8.5 % gemessen. Entgegen der weit verbreiteten Meinung hatten strukturierte Oberflächen zur Reduktion von Blendewirkung keinen negativen Einfluss auf die Verschmutzung. Bei eisenhaltigem Floatglas wurden ähnliche solare Transmissionsabnahmen durch Verschmutzung gemessen wie bei Low Fe Glas. Einen Einfluss der Floatseite (zinnreiche Seite innen oder aussen) auf die Verschmutzung konnte nicht eindeutig nachgewiesen werden.

Bei einer Untersuchung an PV-Modulen [14] wurde eine verschmutzungsbedingte Zunahme der winkelabhängigen Verluste festgestellt, die bei starker Verschmutzung zusätzlich 6-12% Einbussen im Jahresertrag ausmachen. Anders als bei PV-Modulen ist aber bei verschmutzen Flachkollektoren nur mit geringen zusätzlichen Verlusten durch winkelabhängige Transmissionseinbussen zu rechnen.

Die Transmissionseinbussen durch Verschmutzung lagen auch bei den getesteten PMMA-Proben im ähnlichen Bereich wie bei den Gläsern, die Werte streuten aber weniger stark. Bei PC war der Anteil an Verschmutzung nicht eindeutig identifizierbar, er dürfte aber auch im ähnlichen Bereich liegen. Kunststoff-Proben mit Entspiegelungsschicht wiesen eine leichte Tendenz zu stärkerer Verschmutzung auf als glatte. Die fluorierten Kunststoffe ETFE, FEP und PVF verschmutzten trotz niedriger Oberflächenspannung in Rapperswil sehr stark. Es ist aber zu beachten, dass sich die PVF- und FEP-Proben leicht reinigen liessen und teilweise schon nach der Reinigung mit milder Seife wieder ihre ursprüngliche Transmission aufwiesen.

Elminir et. al. [13] haben eine starke Abhängigkeit der Verstaubung von Glasproben gegenüber Expositionswinkel und Orientierung zur Hauptwindrichtung in Kairo gemessen. Demzufolge wäre für Kollektoren, die normalerweise flacher als in dieser Studie ( $60^\circ$ ) montiert werden, eine deutlich stärkere Verschmutzung zu erwarten. Es ist aber unklar inwiefern die Resultate aus Kairo auf einen Mitteleuropäischen Standort übertragbar sind. Mit der in Rapperswil aufgetretenen Verschmutzung vergleichbare Abnahmen des Transmissionskoeffizienten, nämlich 6.5 %, wurden auch von Peuser et. al. (S.40 ff.) [5] nach zwei Jahren Exposition in Göttingen an Glas-Kollektoren in Bahnhofsnähe gemessen. In den Innenstädten von Düsseldorf und Regensburg liegen die Werte von Peuser et al. nach 16 respektive 8 Jahren, trotz städtischer Lage, unterhalb von 1%, also ähnlich tief wie in Davos. Möglicherweise vermindern metallische Schwebestoffe, wie sie beim Bahnbetrieb entstehen, die solare Transmission von Abdeckungsmaterialien besonders stark.

Die durchgeföhrten Messungen stellen nur Momentaufnahmen dar, die Aufschluss über die Verschmutzung am Tag der Entnahme geben. Der Grad der Verschmutzung hängt jedoch auch von den Wetterverhältnissen, insbesondere der Niederschlagsmenge ab, und kann mit der Zeit stark schwanken. Zum Beispiel wurde nach den heftigen Niederschlägen im Vorfeld der Probenentnahme nach 20 Jahren fast durchgehend eine höhere Transmission als nach 10 Jahren gemessen. Um diese Problematik zu untersuchen, könnte eine Messreihe mit kurzen Intervallen durchgeführt werden, um verlässliche Durchschnittswerte und Informationen zu generellen oder auch jahreszeitlichen Schwankungen zu erhalten.

Vor allem für Standorte mit hoher Schwebstoffbelastung sind für Solarkollektoren im Laufe der Zeit erhebliche Verluste durch Verschmutzung zu erwarten. Es empfiehlt sich also eine regelmässige Reinigung der Kollektorabdeckungen, vor allem bei längeren Zeiten ohne oder mit nur geringem Niederschlag. Bei dieser Studie brachte bereits das Abwischen mit milder Seifenlösung deutliche Transmissionsverbesserungen.

Da PMMA, FEP und PVF nur unwesentlich degradieren und deutlich besser zu reinigen waren als Gläser, könnten diese sich grundsätzlich als Beschichtung zum Schutz gegen Verschmutzung eignen. Dies würde aber nur in Kombination mit regelmässiger Reinigung Sinn machen.

## 5.2 Degradation

Die getesteten Gläser wiesen in Rapperswil nicht nur eine stärkere Verschmutzung auf als in Davos, sondern auch höhere Degradationsverluste. Diese sind vermutlich auf nicht mehr einfach abwaschbare Verschmutzungen oder Oberflächenreaktionen mit Luftscha- oder Schwebestoffen zurückzuföhren.

Die getesteten PMMA-, FEP- und PVF-Proben ließen sich nach 20 Jahren sehr gut reinigen. Sie wiesen unabhängig vom Standort nach der Reinigung mit Ethanol nur geringe Transmissionsverluste bis zu leichten Transmissionszunahmen auf. Bei einigen Proben konnte eine Verschlechterung der UV-Absorption gemessen werden, dies ist aber für den Kollektorbau in der Regel unkritisch. Die ETFE-Proben wiesen sehr hohe Degradationswerte auf, diese streuen aber stark zwischen den Proben und wurden wahrscheinlich durch Schwierigkeiten beim Reinigen überschätzt. Die getesteten PC-Proben zeigten allesamt starke Materialdegradationseffekte. Zum einen konnten deutliche Vergilbungen beobachtet und messtechnisch nachgewiesen werden, zum anderen wurde nach 20 Jahren auch eine Verdünnung der Platten um ca. 0.1 mm gemessen. Der Einfluss dieser Materialdegradation auf die solare Transmissionsabnahme war aber nicht extrem hoch, er lag im Bereich der in Rapperswil gemessenen Verschmutzung. Die dünnen PC-Folien wurden während des Versuches zerstört. Auch alle getesteten PVC-Proben zeigten Materialdegradatio-nen. Sie vergilbten ohne Ausnahme stark und zeigten mit der Zeit eine schwarze, lichtundurchlässige Färbung. Die beiden PVC-Folien wurden während des Testes zerstört. Die PET-Folien waren bereits nach 10 Jahren Exposition zerbröselt. Die glasfaserverstärkten Kunststoffe (PMMA und UP) wiesen Risse in der Kunststoff-

Matrix auf, die bis zum Aufspringen des Kunststoffes und zum Austreten der Glasfasern führte.

In Rapperswil konnte bei einigen PC- und faserverstärkten UP-Proben ein Befall mit Schimmelpilzen und Flechten beobachtet werden.

Streng genommen sind die beobachteten Degradationseffekte nur für Proben mit einem Anstellwinkel von etwa 60° korrekt. Kleinere Anstellwinkel führen zu mehr Niederschlag pro Fläche, der (insbesondere im Falle von Schnee) auch länger liegen bleibt. Dies kann, durch den längeren Kontakt mit Wasser, Degradationsvorgänge beschleunigen aber auch einen gewissen Schutz vor Strahlung und hohen Temperaturen bieten. Nach Davis und Sims (S. 48 ff) [12] fällt vor allem der für die Degradation einiger Materialien bedeutende UV-Anteil bei flacher Exposition höher aus, da hierbei der Diffusanteil von grosser Bedeutung ist. Die Degradation an einer während eines Sommers in London exponierten PPO-Film-Probe fiel bei einem Anstellwinkel von 60° weniger als halb so hoch aus im Vergleich mit einem Anstellwinkel von 15°.

## 6 Danksagung

Dieses Projekt wurde finanziert durch das Bundesamt für Energie (BfE), Schweiz. Der Exponierungsstandort in Davos wurde vom PMOD/WRC zur Verfügung gestellt.

## 7 Literatur

- [1] Meteonorm Version 5.1, Meteorologische Grundlagen für die Sonnenenergienutzung; Meteotest im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft (BEW); 2005; Bezug: NovaEnergie
- [2] U. Frei, J. Keller; Beständigkeit von Absorberbeschichtungen, 1984
- [3] U. Frei, M. Köhl; Opical and thermal Evaluation of transparent Materials and Surfaces by FTIR and integrating Spheres; SPIE, 1991 (auf der SPF-CDROM-1998)
- [4] U. Frei, M. Köhl; Opical and thermal Evaluation of transparent Materials and Surfaces by FTIR and integrating Spheres; SPIE, 1991 (auf der SPF-CDROM-1998)
- [5] F. A. Preuser, R. Croy, J. Schumacher, R. Weiss; Langzeiterfahrungen mit thermischen Solaranlagen, ZfS-Rationelle Energietechnik GmbH, Hilden, Deutschland, 1997
- [6] S. Brunold, U. Frei; Zertifizierung von Solarglas: Bestimmung des Winkelgewichtungsfaktors FIAM, SPF-HSR, Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil; Download von [www.solarenergy.ch](http://www.solarenergy.ch).
- [7] J.E. Shelby, J. Vitko Jr., C. G. Pantano; Weathering of glasses for solar applications, Solar Energy Materials 3, 1980, 97-110
- [8] U. Frei, S. Brunold, T. Häuselmann, Langzeit-Alterungsuntersuchung an Abdeckungsmaterialien für thermische Sonnenkollektoren, Institut für Solartechnik Prüfung Forschung SPF, ITR, Rapperswil, Schweiz, 1995
- [9] R. B. Pettit, J. M. Freese, Wavelenght Dependent Scattering Caused by Dust Accumulation on Solar Mirrors, Solar Energy Materials 3, 1980, 1-20
- [10] M. A. Lind, J. S. Hartman, Natural Ageing of Soda-Lime-Silicate Glass in a Semi-Arid Environment, Solar Energy Materials 3, 1980, 81-95
- [11] J. Vitko, Jr, J. E. Shelby, Solarisation of Heliosat Glasses, Solar Energy Materials 3, 1980, 69-80
- [12] A. Davis, D. Sims, Weathering of Polymers, Applied Science Publishers LTD, Essex, England, 1983

- [13] H. K. Elminir, A. E. Ghitas, R. H. Hamid, F. El-Hussainy, M. M. Beheary, K. M. Abdel-Moneim, Effect of Dust on the Transparent Cover of Solar Collectors, Energy Conversion and Management 47, 2006, 3192-3203
- [14] N. Martin, J.M. Ruiz, Calculation of the PV modules angular losses under field conditions by means of an analytical model; Solar Energy Materials & Solar Cells; 70, 2001, 25-38