

Langzeit-Alterungsuntersuchungen an Abdeckungs- materialien für thermische Sonnenkollektoren

U. Frei, Stefan Brunold, Thomas Häuselmann
Institut für Solartechnik Prüfung Forschung SPF
ITR, Ingenieurschule
8640 Rapperswil

1. Einführung, Ziel und Zweck

Jeder thermische Kollektor für die Brauchwassererwärmung und die Heizungsunterstützung hat üblicherweise denselben Aufbau. Die massgebenden Komponenten sind:

- Absorber mit wärmeträgerführendem Rohrsystem zur Abfuhr der Energie
- Abdeckung
- Rahmen
- Wärmedämmung

Für die Leistungsfähigkeit ist neben dem Absorber die Abdeckung von grösster Bedeutung. Der optische Wirkungsgrad zeigt dies sehr deutlich auf:

$$\eta_0 = F^* (\tau \cdot \alpha)_e$$

η_0 : optischer Wirkungsgrad (-)

F^* : Kollektorstufenwirkungsgradfaktor (-)

τ : solarer Transmissionsgrad (-)

α : solarer Absorptionsgrad (-)

e : Index e besagt, dass die Mehrfachreflektion zwischen Absorber und Abdeckung berücksichtigt wurde

Daraus wird klar ersichtlich, dass die Reduktion des Transmissionsgrades – sei es im Neuzustand oder erst durch Degradation oder Verschmutzung im Laufe der Zeit – sich linear in der Reduktion des Kollektorstufenwirkungsgrades auswirkt.

Neben dem Einsatz von Glas sind moderne Kunststoffe mögliche Kandidaten für effiziente Abdeckungen. Eine Fülle von Materialien und Ausführungen bieten sich an. Allerdings stehen dem Anwender nur die technischen Daten der Hersteller zur Verfügung, die bezüglich Aussagen der Langzeitstabilität sehr dürftig sind. Für viele Anwendungen genügt die Aussage, die häufig in Hersteller-Prospekten zu finden ist: *keine signifikante Aenderung innerhalb von 5 Jahren*. Für den Einsatz des Materials in einem thermischen Kollektor ist diese Aussage allerdings völlig unbrauchbar. Von Bedeutung ist vielmehr die zu erwartende Abnahme des solaren Transmissionsgrades innerhalb der minimalen Lebensdauer des Kollektors. Die minimale Lebensdauer – darin sind sich Experten einig – liegt bei 15 Jahren.

Um die Anwendbarkeit von Kunststoffen aufzuzeigen, muss eine Langzeitexponierung durchgeführt werden. Eine möglichst grosse Anzahl von Kandidaten sollen realistischen Bedingungen unter unterschiedlichen Klimata sowie Umweltbelastungen exponiert werden.

Beschleunigte Alterungsuntersuchungen werden gerade für die vorliegende Fragestellung der Langzeitstabilität, häufig eingesetzt. Leider fehlt es bei den zur Zeit normierten Verfahren am Realitätsbezug d.h. der Übereinstimmung zwischen Degradationseffekten im Labor zu Degradationseffekten in realem Einsatz. Doch gerade für die Entwicklung von beschleunigten Alterungsuntersuchungen ist eine Datenbank von Degradationen verschiedenartiger Materialien die notwendige Grundlage.

Neben den Veränderungen des Materials sind die Verschmutzung der Abdeckung ein möglicher Grund für die Reduktion des Transmissionsgrades. Die Auswirkung der Verschmutzung ist auch bei Abdeckungen aus Glas von Bedeutung. Viele der heutigen eingesetzten Gläser sind einseitig strukturiert. Die Strukturen im Bereich von zehntel Millimeter Grösse reduzieren die Blendwirkung. Ob nun die Verschmutzung bei aussenliegender Struktur grösser ist als bei innenliegender ist unklar und soll im Rahmen der vorliegenden Studie untersucht werden.

Die ersten Resultate der vorliegenden Langzeitstudie werden nachfolgend diskutiert. Der grösste Nutzen liegt aber klar im Potential zur Entwicklung adäquater beschleunigter Alterungsuntersuchungen mit denen künftige Materialien mit grösserer Sicherheit bereits vor Ablauf einer 15 jährigen Testphase eingesetzt werden können.

Es ist selbstverständlich, dass die meisten Resultate nicht auf die Anwendung in der thermischen Solartechnik beschränkt sind. Vielmehr weisen verwandte Anwendungen, in Wintergärten oder Treibhäusern, vergleichbare Randbedingungen auf. Mit der Publikation der Rohdaten, in Form einer Datenbank auf CD-ROM, ist die wissenschaftliche Weiterverwendung jederzeit möglich.

2. Vorgehen

Start der Untersuchung 1984 mit dem Ziel der Evaluierung geeigneter Materialien. Eine Marktanalyse bei allen grösseren Herstellern ergibt eine Fülle von Kandidaten.

Kunststoffe : 42 Hersteller, 8 verschiedene Materialien
 Gläser : 6 Hersteller

Als Exponierungsorte wurden Rapperswil und Davos gewählt. Rapperswil bzw. insbesondere der Standort der Ingenieurschule, repräsentiert eine typisch städtische Umgebung bezüglich Luftschadstoffen und Schwebestoffen. Die solare Einstrahlung entspricht dem für das schweizerische Mittelland üblichen Wert. Davos hingegen liegt in den Alpen. Hohe jährliche, solare Einstrahlung, tiefe mittlere Umgebungstemperatur und deutlich weniger Luftschadstoffe bzw. Schwebestoffe, im Vergleich zu Rapperswil, charakterisieren das Klima.

2.1 Meteorologische Daten der Standorte

Die meteorologischen Daten wurden dem Programm Polysun 2.0^{/1/} entnommen. Polysun enthält Meteonorm 95^{/2/}.

Ortschaft : Rapperswil (SG)
 Höhe : 417 Meter über Meer
 Längengrad : -8.82 °
 Breitengrad : 47.20 °

Globalstrahlungssumme horizontal G_H , Diffusstrahlungssumme G_D

	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr
G_H kWh/m ²	26.9	44.5	90.0	114.0	148.0	152.0	168.0	142.0	99.2	59.9	28.5	20.4	1093.0
G_D kWh/m ²	19.3	30.3	51.2	64.2	93.6	88.1	92.1	82.1	55.3	38.9	19.4	15.0	649.4

Aussentemperatur T_A

	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr
T_A [°C]	1.3	1.4	5.0	7.9	12.3	15.1	18.9	18.4	15.3	10.8	5.0	2.8	9.5

Ortschaft : Davos
 Höhe : 1556 Meter über Meer
 Längengrad : -9.83 °
 Breitengrad : 46.80 °

Globalstrahlungssumme horizontal G_H , Diffusstrahlungssumme G_D

	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr
G_H kWh/m ²	52.0	74.6	125.0	150.0	173.0	171.0	182.0	155.0	119.0	86.0	51.7	41.4	1381.0
G_D kWh/m ²	21.6	29.2	43.2	62.3	95.7	85.5	99.4	79.4	49.4	37.1	24.8	20.4	648.0

Aussentemperatur T_A

	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr
T_A [°C]	-6.4	-5.6	-1.5	1.6	6.1	9.0	12.9	12.2	9.2	5.2	-1.3	-4.7	3.1

2.2 Exponierung der Proben

Die Exponierung der Proben erfolgt mittels Ersatzkollektoren, das heisst: jede Probe dient als Abdeckung eines kleinen Kollektorgehäuses. Das belüftete Gehäuse besteht aus solarselektivem Edelstahlblech. Die Temperatur im Luftraum zwischen Abdeckungsprobe und Gehäuse entspricht in etwa der typischen Luftraumtemperatur eines Flachkollektors, eingesetzt in einer solaren Brauchwasseranlage.

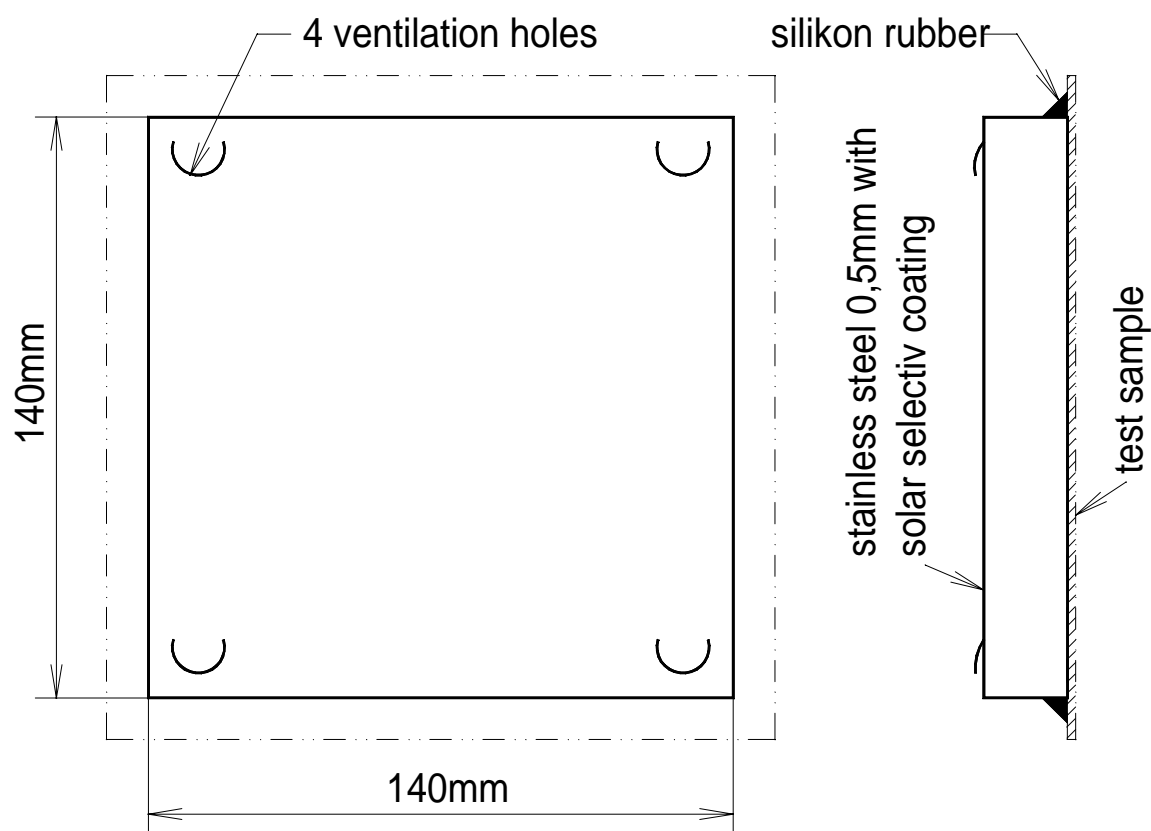


Abb. 1: Ersatzkollektor mit Abdeckungsprobe

60 verschiedene Proben wurden an beiden Standorten in je 5 Exemplaren exponiert. Zusätzlich wurden 12 verschiedene Proben unter einem UV-Filter (Glas) exponiert. Dies bedeutet, 720 Proben wurden für die Langzeitstudie bereitgestellt. Damit allfälliger Schnee abrutscht, wurde der Anstellwinkel mit 60° sehr steil gewählt.

Die Belastung durch die solare Einstrahlung in die Probenebene wurde mit Polysun 2.0^{1/1} berechnet.

Hemisphärische Einstrahlung in die Probenebene H_G (Südorientierung, Anstellwinkel 60°),
Diffusstrahlungssumme H_D in Davos

	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr
H_G kWh/m ²	129.0	144.0	187.0	166.0	148.0	136.0	149.0	146.0	147.0	142.0	108.0	105.0	1706.0
H_D kWh/m ²	39.3	48.5	66.9	73.6	87.7	76.9	89.1	76.7	55.3	48.1	37.1	35.7	734.9

Hemisphärische Einstrahlung in die Probenebene H_G (Südorientierung, Anstellwinkel 60°),
Diffusstrahlungssumme H_D in Rapperswil

	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr
H_G kWh/m ²	45.1	64.2	112.0	111.0	124.0	120.0	137.0	131.0	113.0	81.6	45.3	35.0	1120.0
H_D kWh/m ²	22.3	33.5	53.5	60.5	81.8	75.7	81.4	76.5	55.6	41.0	21.0	17.3	620.2

Die Expositionsdauer wurde folgendermassen gewählt:

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	geplant August 2005	20 Jahre



Abb. 2: Prüfstand in Rapperswil



Abb. 3: Prüfstand in Davos

2.3 Beurteilung der optischen Eigenschaften der Proben:

Die Leistungsfähigkeit, dementsprechend der solare Transmissionsgrad der Abdeckungsmaterialien, steht im Vordergrund. Die Referenz, sowie die ersten 3 Entnahmen wurden mit einem Zeiss-Spektrometer mit Ulbricht-Kugel vermessen^{3/}. Beim Zeiss-Spektrometer wird jede Wellenlänge einzeln von Hand angefahren und die Messung durchgeführt. Die Anzahl der gemessenen Wellenlängen wurde, um den Aufwand nicht ins Unermessliche zu erhöhen, auf 34 beschränkt. Damit kann der solare Transmissionsgrad genügend genau bestimmt werden. Für die Messung der Proben nach 10 Jahren Exposition stand ein Fouriertransform-Spektrometer, ebenfalls gekoppelt mit einer Ulbricht-Kugel, zur Verfügung^{4/}. Die Anzahl Messpunkte konnte damit, ohne Mehraufwand während der Messung, drastisch erhöht werden. Der spektrale Vergleich der Messdaten beider Apparate ist infolge der unterschiedlichen spektralen Auflösung schwierig oder gar unmöglich. Dies gilt insbesondere für Kunststoffe im Bereich von 0.8 bis 2.5 μm . Die integralen Werte, d.h. die solaren Transmissionsgrade stimmen, unabhängig davon, sehr gut überein. Im weiteren werden die Proben mittels einer speziellen Vorrichtung fotografisch dokumentiert. Der Vergleich mit der Referenz gibt einen guten visuellen Eindruck der Veränderungen.

2.4 Beurteilung der Verschmutzung:

Die Proben nach 3 und nach 10 Jahren Exposition wurden zusätzlich hinsichtlich des Einflusses der Verschmutzung analysiert. Die eine Hälfte der Proben wurde abgedeckt und die zweite Hälfte mit reiner Seife und einem weichen Schwamm sorgfältig gereinigt. Beide Seiten, d.h. die gereinigte und die ungereinigte wurde gemessen. Die Verschmutzung ist auf den Fotos gut sichtbar.

3. Vorstellung der Proben

Die durchgeführte Marktübersicht hat zu einer Fülle von möglichen Kandidaten geführt. Die Auswahl der nachfolgend präsentierten Materialien erhebt keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit. Es wurde vielmehr versucht den diversen Zielen der Studie, soweit möglich, gerecht zu werden. Ein Teil der Ziele sollen an dieser Stelle noch einmal aufgeführt werden:

- Welche Materialien eignen sich für den Einsatz in thermischen Kollektoren?
- Wie verhält sich ihre Leistungsfähigkeit im Ursprungszustand und im Laufe der Zeit?
- Was ist generell der Einfluss der Verschmutzung? Müssen und können Abdeckungen von thermischen Kollektoren in regelmässigen Intervallen gereinigt werden?
- Sind Kunststoffe grundsätzlich einsetzbar (insbesondere PMMA und PC)? Wenn ja welche und mit welchen Veränderungen ist in welcher Zeit zu rechnen?
- Sind Kunststoffe von unterschiedlichen Herstellern mit derselben Bezeichnung tatsächlich gleichwertig?
- Sind bei Kunststoffen die Herstellerangaben bezüglich Langzeitstabilität verlässlich?
- Ist die Verschmutzung von Gläsern deren Struktur nach aussen liegt stärker, als Gläser mit unstrukturierter Oberfläche (Struktur im Sinne von z.B. Prismen mit einer Kantenlänge von einigen Zehntel Millimeter)?
- Hat die Oberfläche bei Floatgläsern einen Einfluss (Float-Seite oben / Float-Seite unten)?
- Was ist der Einfluss des Klimas (erhöhte UV-Strahlung bzw. tiefere Umgebungstemperaturen)?
- Ist die Verschmutzung in städtischer Umgebung ausgeprägter als in ländlicher?
- usw.

Erklärungen zu den Abkürzungen in Tabelle 1:

Gl.	:	Glas
o.Fe	:	eisenfreies Glas
sec.	:	Gehärtetes Glas
n. sec.	:	nicht gehärtetes Glas
Str. o.	:	Struktur oben
Str. u.	:	Struktur unten
SdP	:	Stegdoppelplatte
S3P	:	Mehrfachstegplatte (3 Platten)
Sin	:	sinusförmige Wellabdeckung
AR	:	Antireflex-Beschichtung

PMMA	:	Polymethylmetracylat
PC	:	Polycarbonat
PET	:	Polyethylen Terephthalat
FEP	:	Fluoriertes Ethylen-Propylen
PVC	:	Polyvinylchlorid
UP	:	Polyester
PVF	:	Polyvinylfluorid
ETFE	:	Mischpolymerisat: Tetrafluorethylen-Ethylen

Nr.	Bezeichnung	Hersteller	Abkürzung	Dicke	Lieferant	Bemerkungen
1	Gl. o. Fe 5 sec.Str.o.	Albarino	Glas	5	JHB	
2	Gl. o. Fe 5 sec.Str.u.	Albarino	Glas	5	JHB	
3	Gl. o. Fe 5 n.sec.Str.o.	Albarino	Glas	5	JHB	
4	Gl. o. Fe 5 n.sec.Str.u.	Albarino	Glas	5	JHB	
5	PMMA Sin 76 / 18	Suncal	PMMA	1	JHB	
6	PMMA Sin 32 / 9	Suncal	PMMA	1	JHB	
7	PC SdP 6		PC	6	JHB	
8	PC SdP 6	ThermoClear	PC	6	Alphaplast	
9	PC SdP 8	ThermoClear	PC	8	Alphaplast	
10	PC SdP 10	ThermoClear	PC	10	Alphaplast	
11	PC SdP 16	ThermoClear	PC	16	Alphaplast	
12	UP SIN 76/18	Scobalit	UP	1	Scobalit	SGK I
13	UP SIN 76/18	Scobalit	UP	1	Scobalit	SGK III
14	UP 1.5	Scobalit	UP	1.50	Scobalit	
15	Gl.m.Fe. 4 sec.Fl.o.	Floatglas	Glas	4	Temperit	Floatseite markiert
16	Gl.m.Fe. 4 sec.Fl.u.	Floatglas	Glas	4	Temperit	Floatseite markiert
17	Gl.m.Fe. 4 n.sec.Fl.o.	Floatglas	Glas	4	Temperit	Floatseite markiert
18	Gl.m.Fe. 4 n.sec.Fl.u.	Floatglas	Glas	4	Temperit	Floatseite markiert
19	Gl.m.Fe. 4 n.sec.Fl.u.	Floatglas	Glas	4	Flachglas AG	Floatseite markiert
20	Gl.m.Fe. 4 n.sec.Fl.o.	Floatglas	Glas	4	Flachglas AG	Floatseite markiert
21	Gl.m.Fe. 5 n.sec.Fl.o.	Floatglas	Glas	5	Boussois	Floatseite markiert
22	Gl.m.Fe. 5 n.sec.Fl.u.	Floatglas	Glas	5	Boussois	Floatseite markiert
23	PMMA SdP 22 uv n.d.	ECOCAL	PMMA	22	Bacher	UV nicht durchlässig
24	PMMA S3P 22 uv n.d.	ECOCAL	PMMA	22	Bacher	UV nicht durchlässig
25	PMMA SdP 22 uv d.	ECOCAL	PMMA	22	Bacher	UV durchlässig
26	PVF 100 µm	Tedlar	PVF	0.10	DU PONT	
27	FEP 25 µm	Teflon 100	FEP	0.025	DU PONT	
28	FEP 50 µm	Teflon 200	FEP	0.05	DU PONT	
29	PET 125 µm	Mylar	PET	0.125	DU PONT	
30	PC SdP 16	Isolux	PC	16	Notz	
31	PC 4	Macrolon	PC	4	Notz (Röhm)	
32	PMMA GS 4	Plexiglas	PMMA	4	Notz (Röhm)	gegossen
33	PMMA XT 4	Plexiglas	PMMA	4	Notz (Röhm)	extrudiert
34	PVC 1	Duroglas	PVC	1	Gurit-Worbla	
35	PVC 0.75	Duroglas	PVC	0.75	Gurit-Worbla	
36	PET 0.1	Hostaphan	PET	0.10	Hoechst	BN 100
37	PC 4	Lexan	PC	4	Wachendorf (GE)	alter Typ
38	PC 0.375 AR o.	Lexan	PC	0.375	Wachendorf (GE)	
39	PMMA 4	Perspex	PMMA	4	Wachendorf (ICI)	
40	PMMA SdP 16	Perspex	PMMA	16	Wachendorf (ICI)	
41	PMMA 3	Altuglas	PMMA	3	Pestalozzi (Altulor)	
42	PMMA 3 AR o.	Plexiglas	PMMA	3	Röhm	extrudiert
43	PC 3 AR o.	Makrolon	PC	3	Röhm	
44	PMMA SIN 76 / 18	Plexiglas	PMMA	3	Röhm	extrudiert
45	PMMA SdP 16	Plexiglas	PMMA	16	Röhm	
46	PMMA S3P 16	Plexiglas	PMMA	16	Röhm	
47	PMMA 3 AR u.	Plexiglas	PMMA	3	Röhm	extrudiert
48	PC 3 AR u.	Makrolon	PC	3	Röhm	
49	Gl.o.Fe. 3.1 Str.u.	VS-Glas	Glas	3.1	Arbonia	
50	Gl.o.Fe. 3.1 Str.o.	VS-Glas	Glas	3.1	Arbonia	
51	Gl.o.Fe. 3.4 Str.u.	Solite	Glas	3.4	Eusoglas	
52	Gl.o.Fe. 3.4 Str.o.	Solite	Glas	3.4	Eusoglas	nicht getestet
53	Gl.o.Fe. 3.4 sec.Str.u.	Solite	Glas	3.4	Eusoglas	
54	Gl.o.Fe. 3.4 sec.Str.o.	Solite	Glas	3.4	Eusoglas	nicht getestet
55	ETFE 60 µm	Hostafflon	ETFE	0.06	Nowofol (Hoechst)	
56	ETFE 80 µm	Hostafflon	ETFE	0.08	Nowofol (Hoechst)	
57	ETFE 120 µm	Hostafflon	ETFE	0.12	Nowofol (Hoechst)	
58	PVC spez.	-	PVC	-	Oetiker	
59	PC 4	Lexan	PC	4	Wachendorf (GE)	neuer Typ
60	PC 0.375 AR u.	Lexan	PC	0.375	Wachendorf (GE)	

Tab. 1: Vorstellung der Proben

4. Präsentation und Diskussion von ausgewählten Messdaten

Tabelle 2 gibt einen Auszug der Messdaten, welche in den nachfolgenden Diagrammen (Abbildung 4 bis 22) diskutiert werden, im Überblick. Angegeben ist das solare Transmissionsvermögen der Proben im Ausgangszustand (ref), nach einer Expositionszeit von 10 Jahren ungereinigt (10y) sowie nach erfolgter Reinigung (10y "clean"). In den Diagrammen hingegen ist die Einbusse des solaren Transmissionsvermögens bezogen auf den Ausgangszustand nach einer Expositionsdauer von 40 Tagen, 1 Jahr, 3 Jahren und 10 Jahren (ungereinigt) dargestellt.

Abbildung	Material	Rapperswil			Davos		
		ref	10y	10y "clean"	ref	10y	10y "clean"
4	2	0.907	0.852	0.889	0.907	0.894	0.901
	1	0.906	0.808	0.864	0.906	0.864	0.883
5	4	0.910	0.810	0.855	0.910	0.903	0.909
	3	0.909	0.860	0.906	0.909	0.852	0.902
6	49	0.911	0.733	0.908	0.911	0.860	0.912
	50	0.911	0.770	0.894	0.911	0.862	0.897
7	16	0.837	0.688	0.808	0.837	0.837	0.841
	15	0.838	0.775	0.819	0.838	0.825	0.832
8	18	0.835	0.681	0.744	0.835	0.838	0.842
	17	0.835	0.746	0.807	0.835	0.816	0.826
9	19	0.857	0.737	0.793	0.857	0.835	0.846
	20	0.857	0.786	0.858	0.857	0.850	0.861
10	22	0.835	0.633	0.838	0.835	0.830	0.838
	21	0.835	0.818	0.840	0.835	0.819	0.839
11	42	0.843	0.738	0.822	0.843	0.829	0.846
	47	0.842	0.748	0.833	0.842	0.840	0.851
12	32	0.837	0.747	0.800	0.837	0.848	0.849
	33	0.838	0.779	0.845	0.838	0.842	0.855
13	39	0.842	0.785	0.842	0.842	0.841	0.854
	41	0.842	0.709	0.841	0.842	0.837	0.849
14	5	0.866	0.541	0.572	0.866	0.592	0.609
	6	0.860	0.526	0.584	0.860	0.653	0.666
15	38	0.884	0.000	0.000	0.884	0.665	0.719
	38F	0.883	0.384	0.468	0.883	0.566	0.602
16	60	0.809	0.000	0.000	0.809	0.000	0.000
	60F	0.809	0.375	0.459	0.809	0.566	0.610
17	37	0.801	0.534	0.676	0.801	0.699	0.742
	59	0.801	0.604	0.719	0.801	0.740	0.769
18	43	0.804	0.523	0.736	0.804	0.718	0.791
	48	0.803	0.610	0.730	0.803	0.764	0.792
19	56	0.934	0.674	0.738	0.934	0.781	0.802
	56F	0.933	0.764	0.869	0.933	0.849	0.885
20	26	0.896	0.717	0.897	0.896	0.806	0.892
	26F	0.896	0.775	0.866	0.896	0.800	0.886
21	29	0.795	0.000	0.000	0.795	0.000	0.000
	29F	0.795	0.560	0.000	0.795	0.000	0.000
22	28	0.956	0.745	0.956	0.956	0.843	0.955
	28F	0.956	0.766	0.957	0.956	0.919	0.957

Tab. 2: Resultatübersicht der in den nachfolgenden Abbildungen diskutierten Materialproben. Die Tabelle enthält die solaren Transmissionsgrade des Ausgangszustandes, nach der Exponierungsdauer von 10 Jahren, ohne Reinigung, sowie nach der Reinigung. Die Zahl '0.000' bedeutet, dass die Probe zerstört wurde.

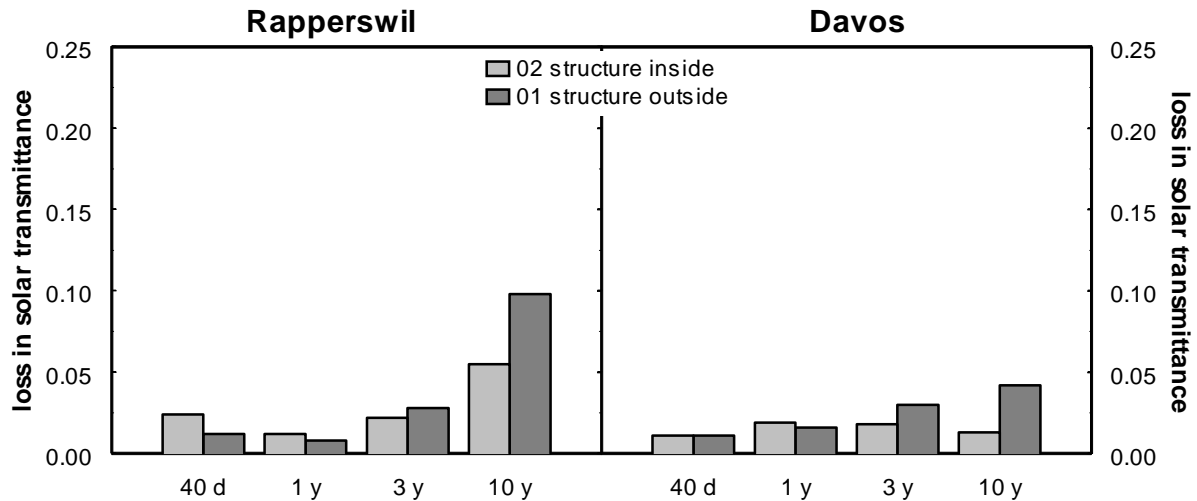


Abb.4: Albarino (JHB), 5mm eisenfreies Glas, gehärtet, strukturiert

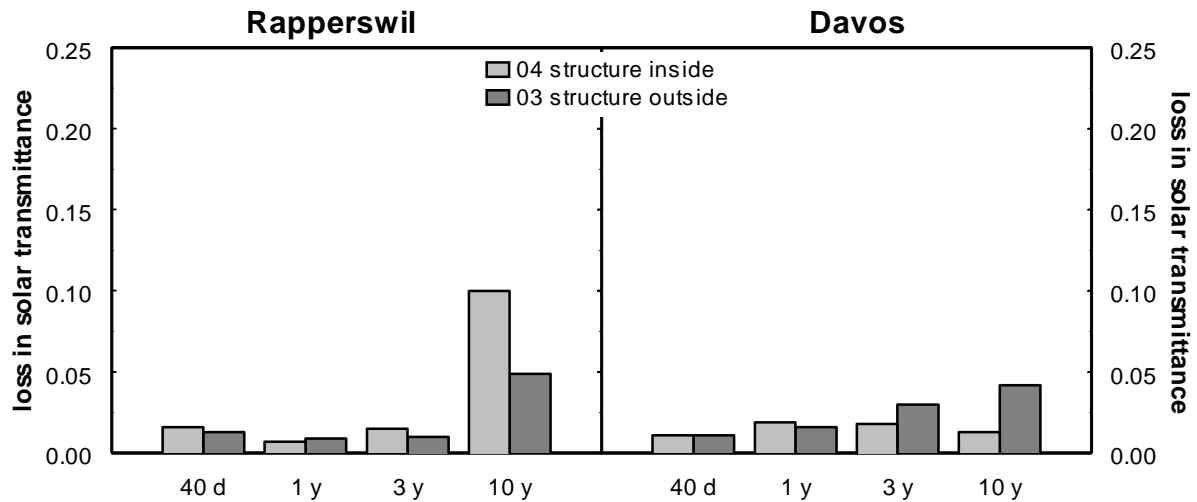


Abb. 5: Albarino (JHB), 5mm eisenfreies Glas, strukturiert

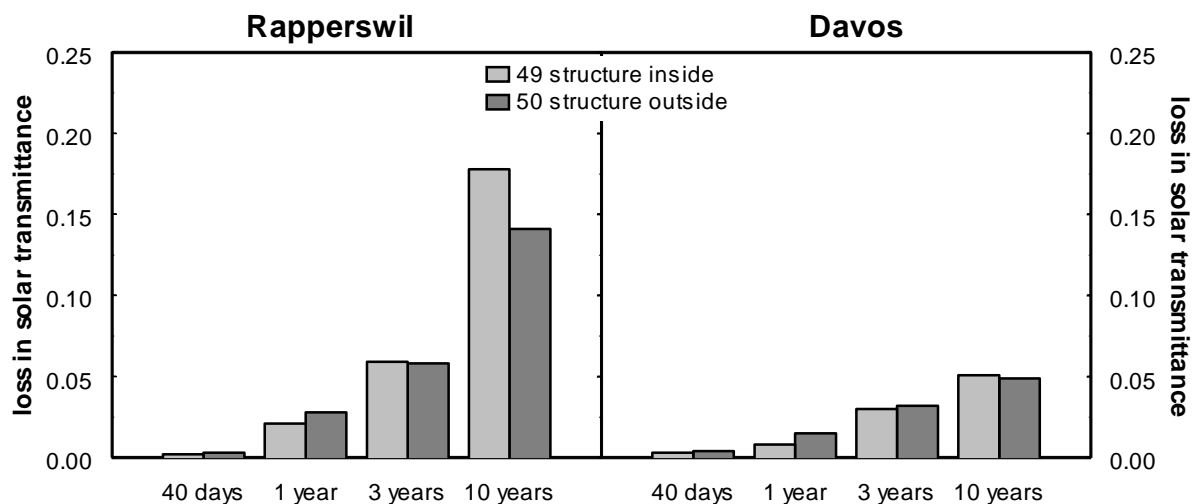


Abb. 6: US-Glas (Arbonia), 3.1mm eisenfrei, strukturiert

Die Abbildungen 4, 5 und 6 zeigen die Transmissionsverluste eisenfreier Gläser, nach den verschiedenen Exponierungszeiten, im ungereinigten Zustand. Die Gläser sind einseitig strukturiert. Es wurde je eine Probe mit der strukturierten Seite nach aussen und nach innen exponiert. Die

Proben, dargestellt in Abbildung 4, sind gehärtet, dagegen zeigt Abbildung 5 die Resultate desselben Glases

ohne Härtung. Es ist entgegen der üblichen Meinung kein eindeutiger Trend feststellbar, dass Gläser mit strukturierter Seite nach aussen stärker verschmutzen, als solche mit der strukturieren Seite nach innen. Auch die Härtung scheint keinen Einfluss auf die Verschmutzung zu haben. Die exponierten Glasproben weisen nach der Reinigung wieder in etwa dieselben Transmissionsgrade auf, wie beim Ausgangszustand.

Die Verschmutzung in Rapperswil scheint einen klaren Zusammenhang zu haben mit der nahegelegenen Eisenbahn. Ablagerungen von Schwebestoffen durch Abrieb an metallischen Werkstoffen (Eisen, Kupfer) tragen sicherlich zur Bildung der Schmutzablagerungen bei.

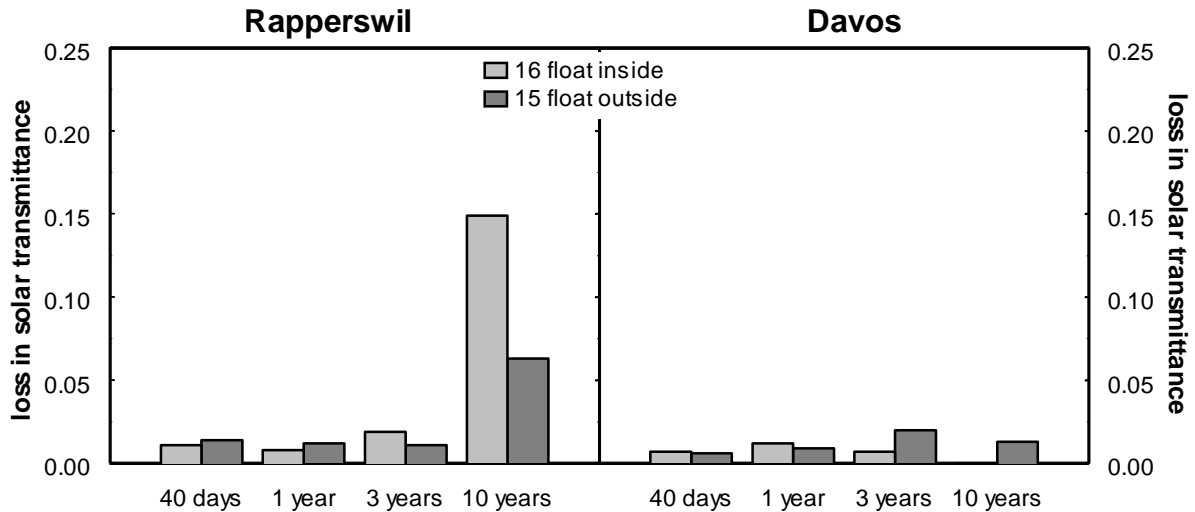


Abb. 7: Floatglas Temperit), 4mm gehärtet

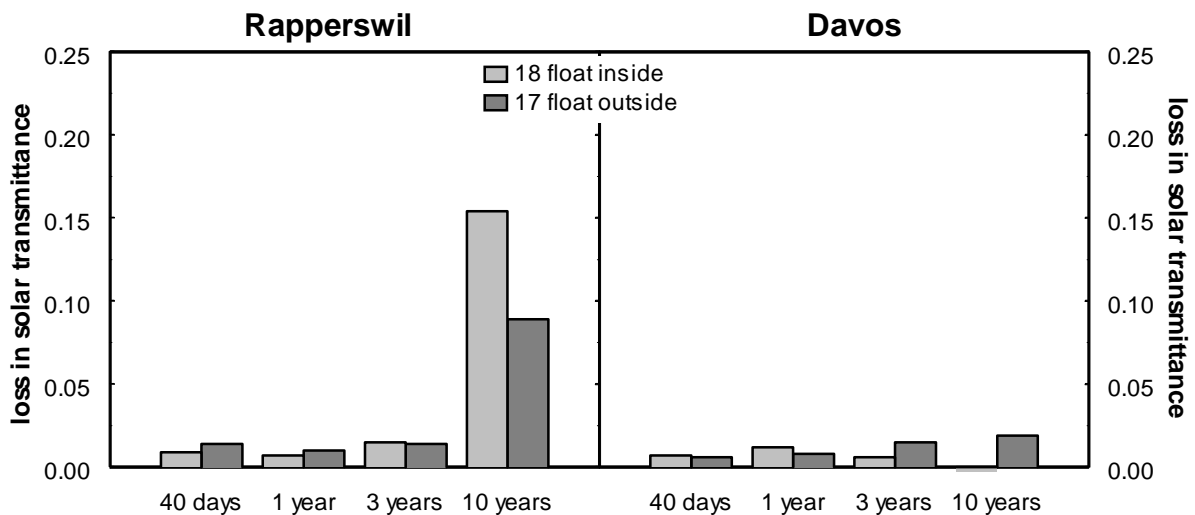


Abb. 8: Floatglas (Temperit), 4mm

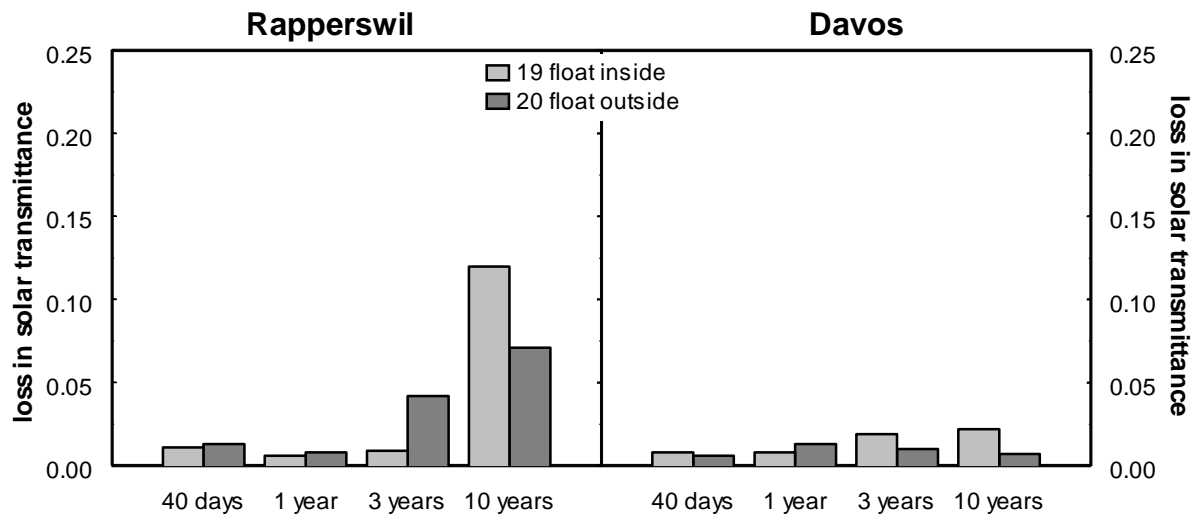


Abb. 9: Floatglas (Flachglas AG), 4mm

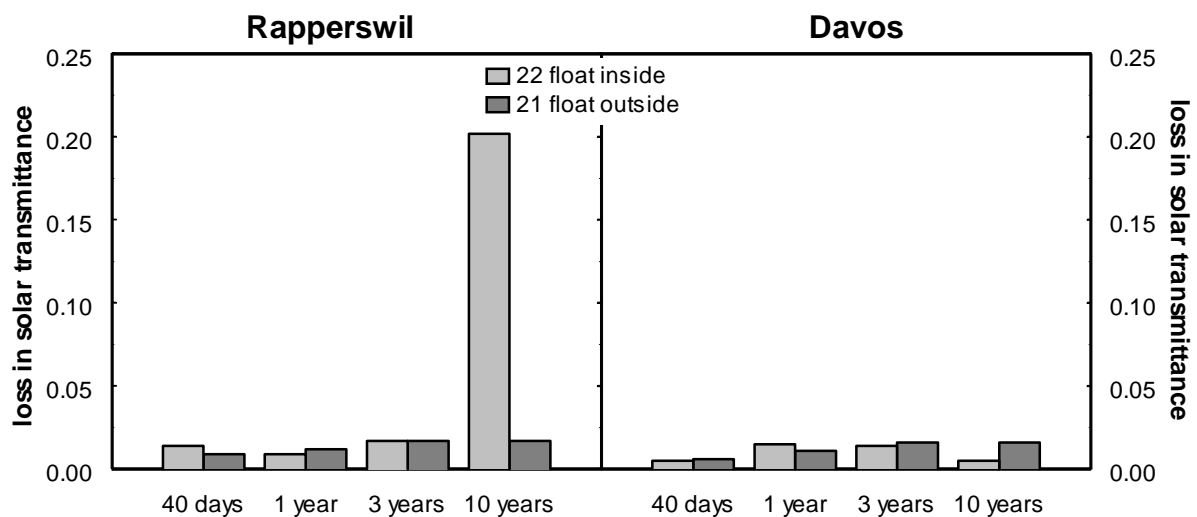


Abb. 10: Floatglas (Boussois), 5mm

Alle Proben, dargestellt in Abbildung 7 bis 10, sind eisenhaltige Floatgläser unterschiedlicher Hersteller. Die Exponierung jedes Glases der verschiedenen Hersteller, erfolgte einerseits mit der Float-Seite nach aussen und andererseits mit der Float-Seite nach innen. Die Resultate nach 10 Jahren zeigen deutlich, dass die Float-Seite nach aussen zu massiv tieferen Verschmutzung der Proben führt. Auch in diesem Fall scheint die Härtung keinen Einfluss auf die Verschmutzung zu haben (siehe Abbildung 7 und 8). Die exponierten Glasproben weisen, zumindest für den Standort Davos, nach der Reinigung wieder in etwa dieselben Transmissionsgrade auf wie beim Ausgangszustand. Zudem wurde deutlich, dass sich die Float-Seite besser reinigen lässt.

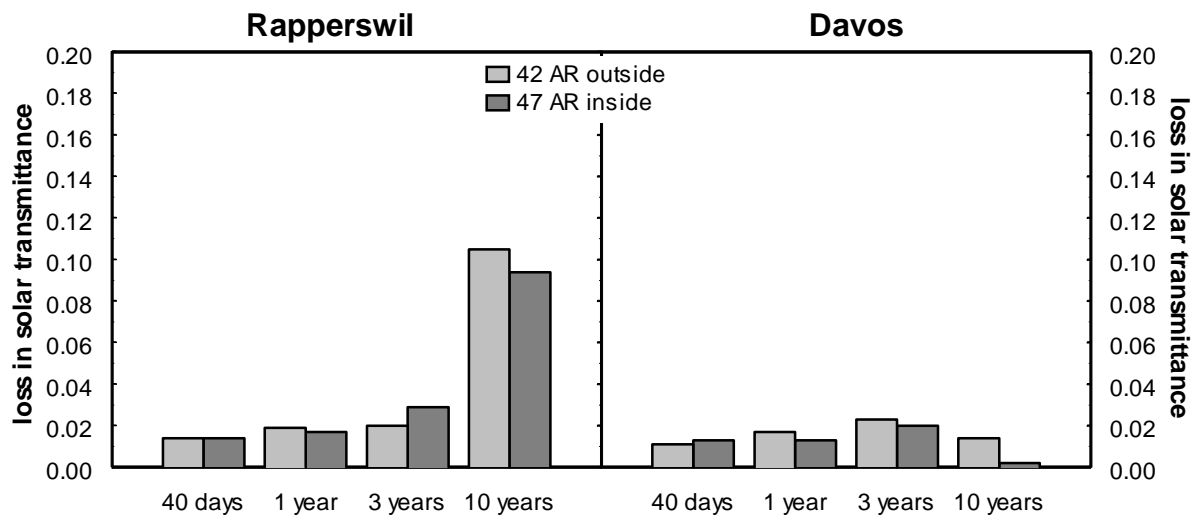


Abb. 11: PMMA (Röh), 3mm, einseitig entspiegelt

Es wurden eine Reihe von PMMA Materialien in die Untersuchung einbezogen. Die vorliegende Probe weist eine Antireflex-Schicht auf. Diese Antireflex-Schicht reduziert die Spiegelung durch eine "grobe" Struktur, sie hat keinen positiven Einfluss auf den solaren Transmissionsgrad. Die Exponierung der Antireflex-Schicht nach aussen oder innen hat keinen wesentlichen Einfluss auf das Verhalten der Probe bezüglich Abnahme des solaren Transmissionsgrades.

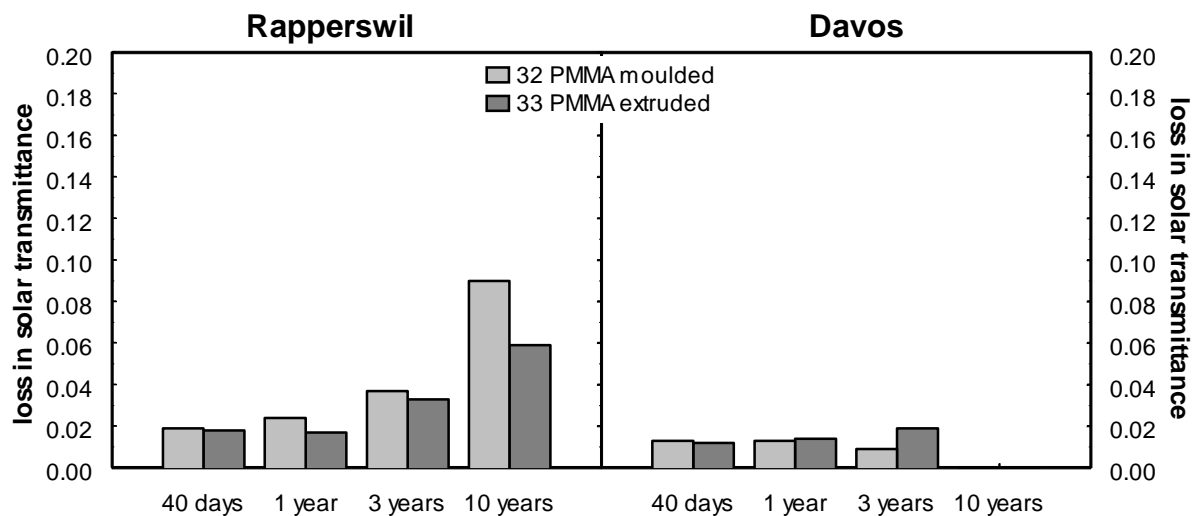


Abb. 12: PMMA (Notz/Röh), 4mm

In Abbildung 12 werden 2 PMMA Proben mit unterschiedlicher Herstellungsweisen, nämlich extrudiert, beziehungsweise gegossen, miteinander verglichen. Die extrudierte Probe zeigt in Rapperswil eine deutlich geringere Abnahme des solaren Transmissionsgrades.

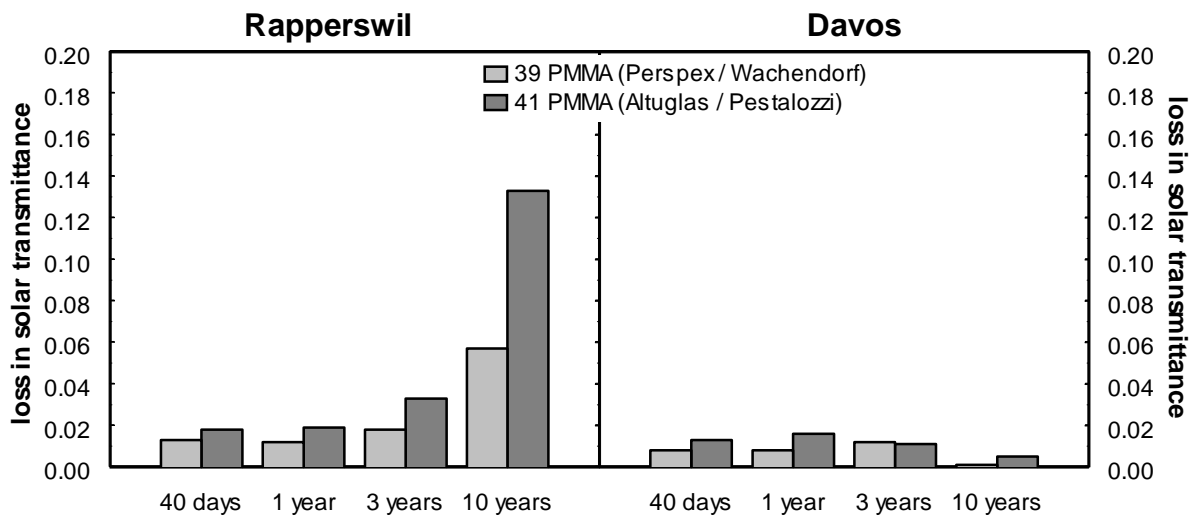


Abb. 13: PMMA unterschiedlicher Hersteller

In Abbildung 13 werden 2 PMMA Proben unterschiedlicher Hersteller miteinander verglichen. Die beiden vergleichbaren Produkte führen zu sehr unterschiedlichen Resultaten. Probe Nummer 41 zeigt in Rapperswil eine rund doppelt so grosse Abnahme des solaren Transmissionsgrades.

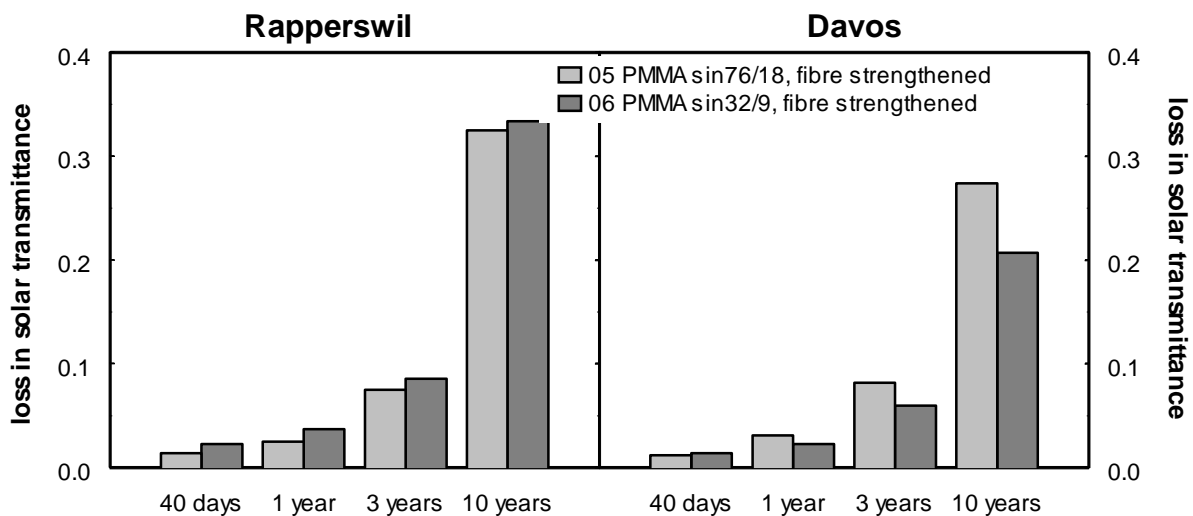


Abb. 14: PMMA (Suncal / JHB), Sinus, Faserverstärkt

Abbildung 14 zeigt 2 PMMA Proben mit Glasfaserverstärkungen. Die beiden Produkte, mit lediglich unterschiedlicher Geometrie der Wellung, führen erwartungsgemäss zu ähnlichen Resultaten. Die massgebende Degradation findet in der Zeitspanne zwischen 3 und 10 Jahren statt. Der Grund dafür ist nach der visuellen Prüfung der Probe klar: die Glasfasern treten deutlich stärker in Erscheinung. Deren Veränderung bzw. die Veränderung des Materials unmittelbar um die Fasern, führt zu den enormen Degradationen. Die Reinigung der Proben hat nur einen untergeordneten Einfluss auf die Resultate.

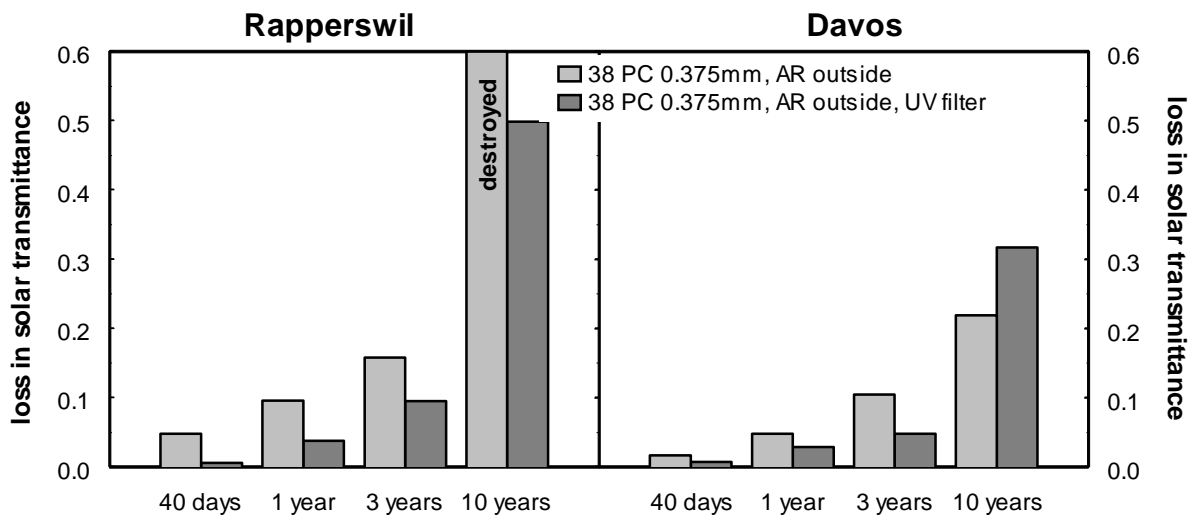


Abb. 15: PC (Lexan/Wachendorf), 0.375mm, Entspiegelung aussenseitig, mit und ohne UV Filter

Abbildung 15 zeigt das Verhalten von Polycarbonat Proben mit einer Entspiegelungs-Schicht (Herstellerbezeichnung), exponiert auf der Aussenseite. Die eine der beiden Proben wurde unter dem UV-Filter exponiert. In Rapperswil wurde die Probe ohne Filter zerstört, das heisst die Probe ist in unmessbare Brösel zerfallen.

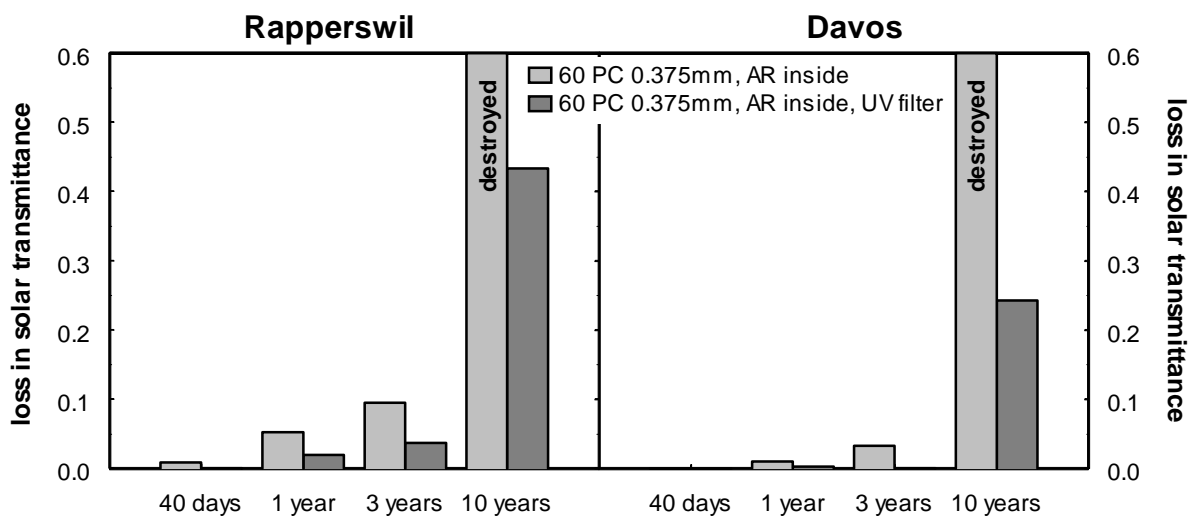


Abb. 16: PC (Lexan/Wachendorf), 0.375mm, Entspiegelung innenseitig, mit und ohne UV Filter

Einziger Unterschied der Abbildung 16 zur Abbildung 15 ist die Exponierung der Entspiegelungs-Schicht auf der Innenseite anstelle der Aussenseite. Die auftretenden Veränderungen sind eher geringer als bei der Darstellung mit aussenliegender Entspiegelungs-Schicht. Eine Ausnahme ist die Exponierung in Davos nach 10 Jahren, wo die Probe zerstört wurde.

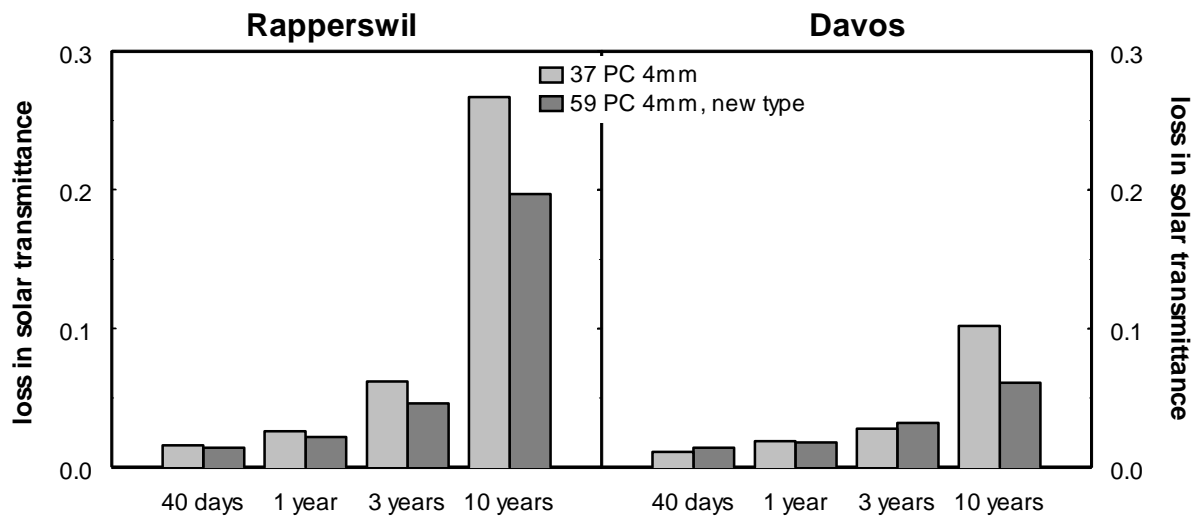


Abb. 17: PC (Lexan/Wachendorf), alter und neuer Typ

Beide Proben Nr. 37 und 59 sind Polycarbonate desselben Herstellers. Nr. 59, ist nach Angaben des Herstellers eine Weiterentwicklung mit verbesserten Eigenschaften. Diese Aussage stimmt, wenn auch nur mit geringfügigem Erfolg, mit unseren Messresultaten überein.

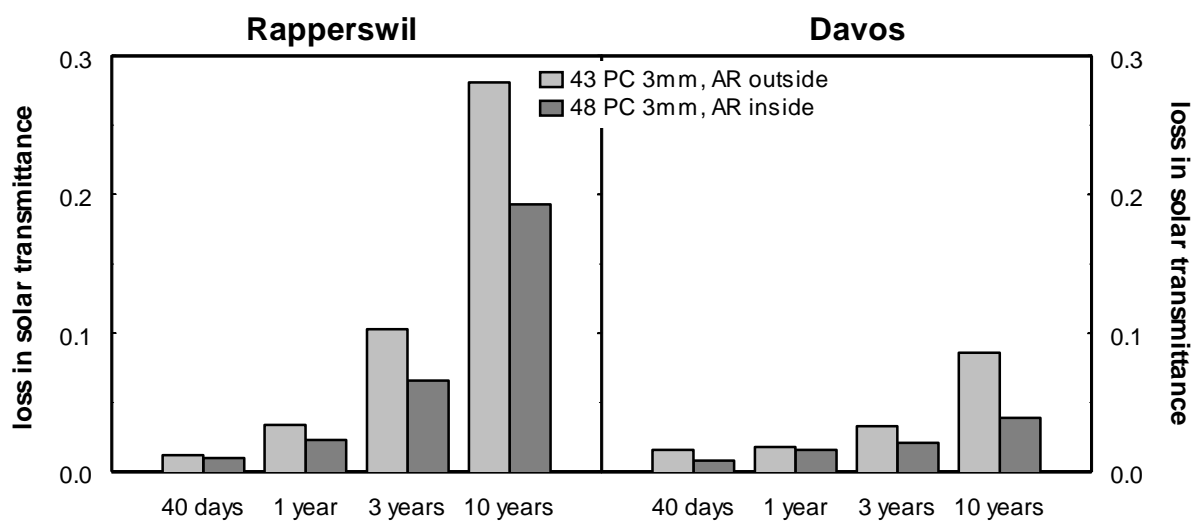


Abb. 18: PC (Makrolon/Röhm), 3mm, mit Entspiegelungsschicht

Einzigster Unterschied der beiden Proben in Abbildung 18 ist die Exponierung der Entspiegelungsschicht; im einen Fall auf der Innenseite und im anderen auf der Aussenseite. Die auftretenden Veränderungen sind, bei den Proben mit innenliegender Entspiegelungsschicht eher geringer als bei der Darstellung mit aussenliegender Entspiegelungsschicht. Die Resultate bestätigen den Sachverhalt analog zu den Proben 38 und 60 in den Abbildungen 15 und 16.

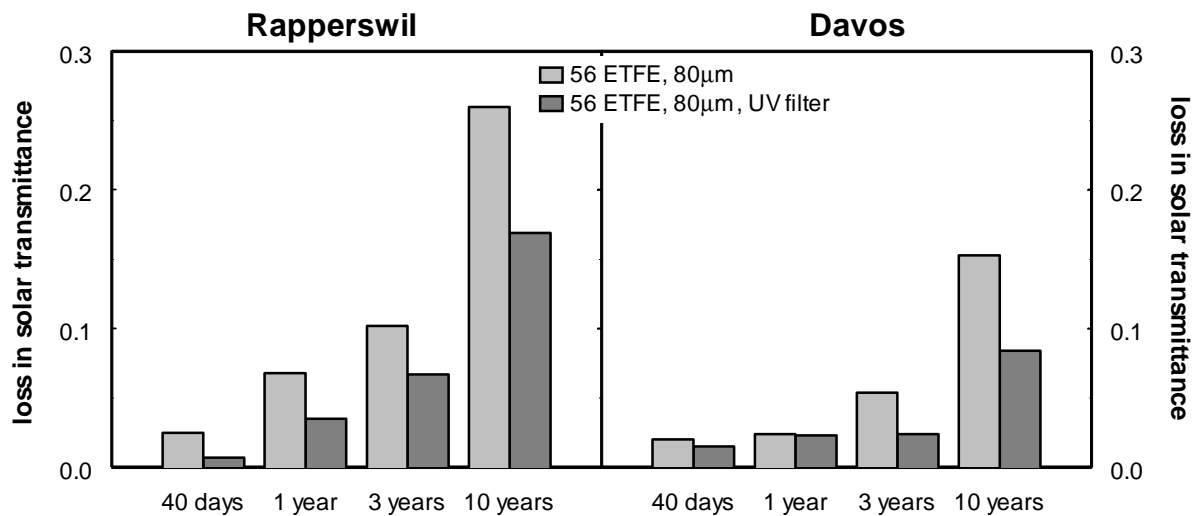


Abb. 19: ETFE (Hostaflon/Nowofol/Hoechst), 80µm, mit und ohne UV Filter

Die ETFE-Folien verändern sich unter dem UV-Filter weniger als ohne Filter. Nach der Reinigung mit Seifenwasser bleibt die Differenz erhalten. Materialänderungen sind neben dem Effekt, dass Verunreinigungen nicht vollumfänglich entfernbar sind, nicht auszuschliessen.

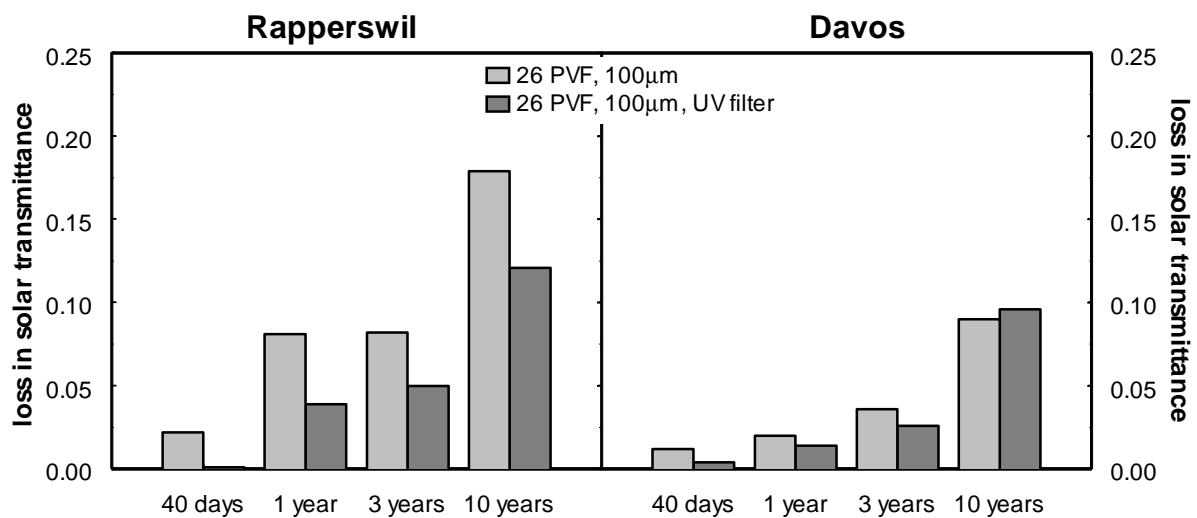


Abb. 20: PVF (Tedlar/DuPont), 100µm, mit und ohne UV Filter

Die Veränderungen des solaren Transmissionsgrades sind für beide Exponierungs-Standorte vergleichbar. Der Unterschied liegt in der ausgeprägteren Verschmutzung in Rapperswil. Nach der Reinigung erreicht die PVF-Probe exakt wieder dieselben Werte wie vor der Exponierung.

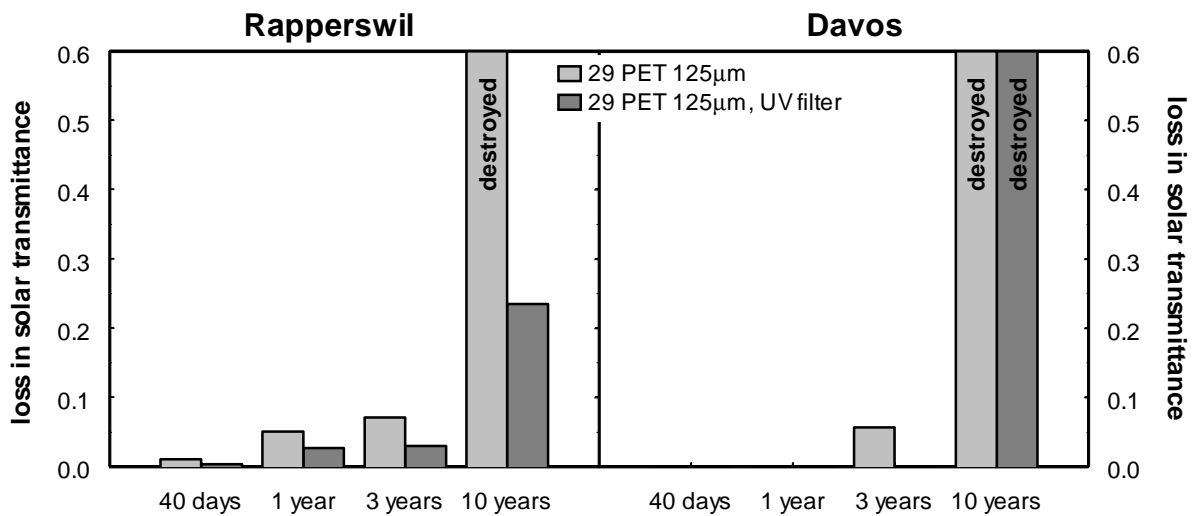


Abb. 21: PET (Mylar/DuPont), 125µm, mit und ohne Filter

Bis zu einer Exponierungsdauer von 3 Jahren liegt die Veränderung des solaren Transmissionsgrades unter 10 %. Danach versprödet das Material und eine Messung ist nicht mehr möglich. Die einzige Probe, die unter dem Filter 10 Jahre Exponierung ausgehalten hat, ist bei der Reinigung zerbrösel.

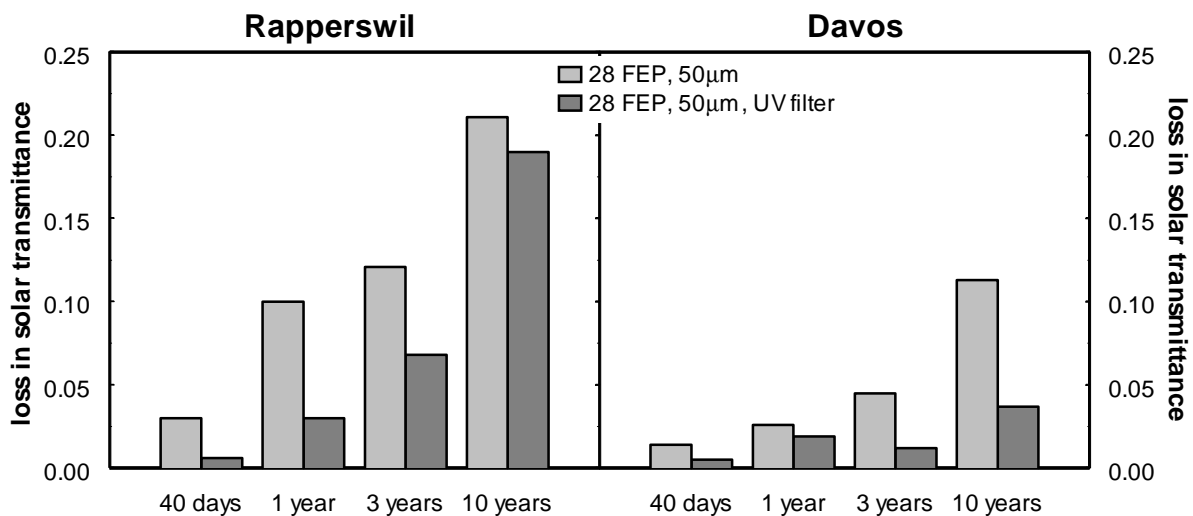


Abb. 22: FEP (Teflon200/DuPont), 50µm, mit und ohne Filter

Die Veränderungen des solaren Transmissionsgrades sind ausschliesslich auf die Verschmutzung zurückzuführen. Nach der Reinigung wurden wieder exakt dieselben Transmissionsgrade erreicht wie im Ursprungszustand.

5. Schlussfolgerungen

Die nachfolgend präsentierten Schlussfolgerungen sind lediglich eine erste Betrachtung und keine detaillierte Analyse der umfangreichen, spektralen und integralen Daten.

Gläser:

Im Gegensatz zur Meinung von Fachleuten haben grobe, nach aussen gerichtete, prismenartige Strukturen zur Reduktion der Blendwirkung, keinen negativen Einfluss auf die Verschmutzung. Hingegen zeigen Floatgläser einen klaren Unterschied ihres Verschmutzungsverhaltens, je nachdem ob die Float-Seite nach aussen oder nach innen gerichtet wird. Die Float-Seite nach aussen bedeutet nach 10 Jahren Exponierung eine um den Faktor 2 geringere Reduktion des solaren Transmissionsgrades durch Verschmutzung. Die Härtung hat keinen Einfluss auf die Verschmutzung der geprüften Gläser.

Kunststoffe:

Wie zu erwarten war, zeigen fluorierte Kunststoffe die beste Alterungsstabilität. Teflon (FEP, Du Pont) Auch nach 10 jähriger Bewitterung ist nach der Reinigung keinerlei Degradation zu verzeichnen. Das häufig für Kollektorabdeckungen eingesetzte Tedlar (PVF, Du Pont), ist nur geringfügig weniger stabil als Teflon, weist aber bereits im Ausgangszustand einen deutlich tieferen solaren Transmissionsgrad auf. Entgegen den Erwartungen, ist Hostaflon (ETFE, Hoechst) deutlich degradiert. Die diversen PMMA-Proben verhalten sich erstaunlich gut, es sind im gereinigten Zustand kaum Abnahmen des solaren Transmissionsgrades zu verzeichnen. Wesentlich ungünstiger verhalten sich die geprüften PC-Proben, es ist mit empfindlichen Einbussen der Leistungsfähigkeit zu rechnen.

Verschmutzung:

Der Einfluss der Verschmutzung von Kollektorabdeckungen wurde bisher auch von Experten stark unterschätzt. In städtischer bzw. anderweitig mit Schwebestoffen belasteter Umgebung ist mit einer empfindlichen Reduktion des solaren Transmissionsgrades und damit auch der Leistungsfähigkeit von Solaranlagen zu rechnen. Je nach Umgebung empfiehlt sich ein Reinigungsintervall zwischen 3 (Rapperswil) und 10 Jahren (Davos). Es erstaunt, dass die fluorierten Kunststoffe trotz ihrer niedrigeren Oberflächenspannung (dazu zählt auch Teflon, Du Pont) eher dazu neigen, mehr zu verschmutzen als eisenfreies Glas. Damit muss eine Beschichtung von Gläsern mit PTFE als "Anti-Soiling-Coating" überdacht werden.

6. Ausblick

Die Exponierung der letzten verbleibenden Proben in Rapperswil und Davos geht weiter. Es ist geplant die Proben im Jahr 2005 zu demontieren. Dies entspräche einer Gesamtexponierungsdauer von 20 Jahren.

Die Weiterführung der Analyse der umfangreichen Daten ist für die nahe Zukunft geplant. Neben der Betrachtung integraler Werte, wie dem solaren Transmissionsgrad, ist auch die Betrachtung der spektralen Daten geplant. Dafür müssen die vorhandenen Proben im Ausgangszustand mittels des hochauflösenden FTIR-Spektrometers nachgemessen werden.

Verschiedene Expertengruppen z.B. im Bereich Polymertechnik, haben ihr Interesse an den Daten bekundet. Die Publikation der Rohdaten auf der SPF-CDROM-1998 ermöglicht den Spezialisten einen tiefen Einblick in die gesammelten Daten. Für die SPF-CDROM-1999 ist zusätzlich die Integration der Bilddatenbank, allfälliger visuell erkennbarer Veränderungen der Abdeckungsmaterialien, geplant. Für die Arbeitsgruppe "Materials in solar thermal collectors", MSTC des Solarprogramms der Internationalen Energieagentur (IEA), bildet die Datenbank die Grundlage für erste Gehversuche im Bereich beschleunigte Alterungsuntersuchungen an Abdeckungsmaterialien.

7. Literaturverzeichnis

- /1/ Polysun 2.0, das Programm zur Auslegung thermischer Solaranlagen; SPF im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft (BEW); 1996; Bezug: Nova Energie in Aarau, CH, Tel.:+ 41 62 834 03 00
- /2/ Meteonorm, Meteorologische Grundlagen für die Sonnenenergienutzung; Meteotest im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft (BEW); 1995; Bezug: NovaEnergie
- /3/ U. Frei, J. Keller; Beständigkeit von Absorberbeschichtungen, 1984
- /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)