

Chimia 52 (1998) 182–192  
© Neue Schweizerische Chemische Gesellschaft  
ISSN 0009–4293

# Freibewitterung von Lichtplatten aus Kunststoffen. Eine Langzeitstudie während elf Jahren

Christiane Löwe\*

## Natural Weathered Transparent Double-Skin Sheets Made of Polymers

**Abstract.** Due to their numerous advantages such as low weight, high transparency and impact resistance, transparent multiple-skin plastic sheets (e.g., PVC, PMMA, PC, GF-UP) are widely used in applications such as greenhouses, windows, roofs etc. Since degradation due to sunlight and humidity is a critical behaviour inherent to most polymeric materials, it is necessary to determine the influence of prolonged weathering. With this aim, nineteen different sheets were exposed over a period of eleven years at Dübendorf. Test methods as visual inspection, average light transmittance and resistance to hail impact turned out to characterise the influence of weathering on the sheets very well. On the base of the mentioned test methods, the four different materials could be classified in the following range. Because of moderate changing of mechanical behaviour and appearance, the GF-UP materials were most suitable for the application followed by PC sheets. PMMA materials do have an advantage because of their excellent optical properties, but the mechanical behaviour is unsuitable from the beginning. Sheets from PVC showed strong changes of their optical and mechanical behaviours after short-time period and aren't well applicable for long-term exposure.

## 1. Einleitung

Lichttransparente Kunststoff-Platten haben Dank ihrer zahlreichen Vorteile wie z.B. niedriges Gewicht, hohe Transparenz und gute mechanische Eigenschaften (z.B. Schlagfestigkeit) ein breites Anwendungsgebiet als Gewächshäuser, Wintergärten, Dächer oder Oberlichter gefunden. Bei Aussenanwendungen werden hohe Alterungs- und Wetterbeständigkeit an die Kunststoff-Lichtplatten gestellt. Unter dem Einfluss von Licht, Temperatur und Feuchtigkeit verändern sich jedoch die meisten organischen polymeren Materialien und werden abgebaut [1]. Deshalb ist es notwendig ihr Langzeitverhalten bezüglich Bewitterung zu kennen. Häufig werden daher Kunststoffe im Labor künstlich bewittert, um eine Beschleunigung gegenüber der freien Bewitterung zu erreichen. Dabei müssen die Bedingungen bei der künstlichen Bewitterung so gewählt werden, dass die Ergebnisse einer

\*Korrespondenz: Dr. C. Löwe  
EMPA Eidgenössische Materialprüfungs-  
und Forschungsanstalt  
Abteilung Kunststoffe/Composites  
Überlandstrasse 129  
CH-8600 Dübendorf



Fig. 1. Bewitterungsstände

Tab. 1. Übersicht über die verwendeten Materialien

Materialtyp	Form <sup>a)</sup>	Farbe/Aussehen	Dicke [mm]	Profil-Abm. [mm]	Stegabstand [mm]	Materialstärke [mm]
PMMA 1	SDP	opak	22		45	2
PMMA 2	SDP	klar	22		45	
PMMA 3	SDP	braun	22		45	
PVC 1	SDP	klar	20		30	
PVC 2	SDP	natur	40	125	30	
PVC 3	SDP	hell	20	250	23	1
PVC 4	SDP	opak	20	100	23	1
PVC 5	SDP	opak	20	100	26	
PVC 6	SDP	hell	20	100	26	
PC 1	SDP	klar	10	100	10	ca. 0.6–0.8
PC 2	HP	opak	60			ca. 1.2
PC 3	SDP	klar	11		ca. 8–9	ca. 0.5
PC 4	SDP	klar	5		6	ca. 0.5
PC 5	SDP	klar	10		6	ca. 0.5
GF-UP 1	WDP	natur	ca. 8–10	177/51		ca. 1.0
GF-UP 2	RP	natur	27	100/60		ca. 2.0
GF-UP 3	WDP	natur	ca. 8–9	177/51		1
GF-UP 4	WDP	blau	ca. 5–8	177/51		ca. 1.2
GF-UP 5	WDP	natur	ca. 4–8	177/51		ca. 1.0

<sup>a)</sup> SDP = Stegdoppelplatte; HP = Hohlprofil; WDP = Welldoppelplatte; RP = Rostplatte

künstlichen Bewitterung mit den Ergebnissen der Freibewitterung hinreichend gut übereinstimmen [1]. Die Exposition im Freien bietet gegenüber der künstlichen Bewitterung verschiedene Vorteile. Bei der Bewitterung im Freien werden die Materialien den tatsächlichen Einflüssen wie Sonne, Wind, Temperatur, Niederschläge (Regen, Schnee, Hagel) aber auch Umwelteinflüssen wie Verschmutzungen der Luft usw. ausgesetzt. Die Tag-/Nachtzyklen und Jahreszeiten werden berücksichtigt. Durch die Bewitterung im Freien werden ausschliesslich relevante Abbau- und Schadensmechanismen angeregt, was bei der künstlichen Bewitterung nicht immer sichergestellt ist.

Für die Alterung von polymeren Werkstoffen ist im wesentlichen der UV-Anteil der Strahlung verantwortlich [1]. Unter dem Einfluss von UV-Licht und Feuchtigkeit werden die Materialien auf molekularer Ebene geschädigt und abgebaut. Deshalb ist es notwendig, das Alterungsverhalten von freibewitterten Kunststoff-Lichtplatten über einen möglichst langen Zeitraum zu beobachten und die Veränderungen der für die Anwendung spezifischen Eigenschaften wie

- 1) Transparenz (Lichtdurchlässigkeit)
- 2) Widerstand gegen Einwirkung von
  - Schneelasten
  - Hagelunwetter

- Sonne
  - Regen und Wind
- zu erfassen.

Ziele dieser Untersuchungen, über die hier berichtet wird, waren:

- Natürliche Bewitterung von Kunststoff-Lichtplatten über einen Zeitraum von elf Jahren
- Suche nach einfachen Untersuchungsmethoden zur Erfassung und Beschreibung des Alterungsverhaltens
- Korrelation eines Materialparameters mit dem Alterungsverhalten
- Vergleich von unterschiedlichen Materialien.

## 2. Prüfverfahren

Neunzehn verschiedene handelsübliche Plattenmaterialien wurden während elf Jahren auf dem Dach der EMPA natürlich bewittert und über die Jahre in verschiedenen Abständen unterschiedliche Eigenschaften der Materialien untersucht.

### 2.1. Materialien

Eine Übersicht der verwendeten Materialien und Informationen zu deren Aussehen und Aufbau ist in Tab. 1 gegeben. Es wurden drei Kunststoff-Lichtplatten aus Polymethylmethacrylat (PMMA, gut bekannt als Plexiglas), sechs Polyvinyl-

chlorid (PVC)-Platten, fünf Platten aus Polycarbonat (PC) und fünf Platten auf der Basis von ungesättigten Polyesterharzen, mit Glasfasern verstärkt, von verschiedenen Herstellern und Lieferanten der EMPA zur Verfügung gestellt. Für die Bewitterung im Freien wurden Proben mit Gesamtabmessungen von ca. 500 × 500 mm und einer Fläche von mindestens 400 × 400 mm im Licht eingesetzt.

### 2.2. Natürliche Bewitterung

Die Bewitterung der Kunststoff-Lichtplatten erfolgte in Anlehnung an die Norm DIN 53386 in Dübendorf (geographischer Längengrad 47°20') mit einem Expositionswinkel von 45°, nach Süden ausgerichtet, während elf Jahren auf Bewitterungsständen wie sie in Fig. 1 zu sehen sind.

### 2.3. Prüfmethode [2]

Mit Hilfe verschiedener Prüfmethode lassen sich spezifische Eigenschaften der Kunststoff-Platten überprüfen. Es gibt jedoch keine Prüfmethode, welche alle Unterschiede der verschiedenen Materialien bzw. alle Veränderungen der Materialien gleichzeitig erfasst. Die Kombination von Ergebnissen aus verschiedenen Prüfungen erlaubt jedoch, die wesentlichen Änderungen der Eigenschaften insbesondere unter Berücksichtigung des Verwen-

dungszweckes der Kunststoff-Lichtplatten zu charakterisieren.

Methoden, die zum Einsatz kommen sollten, wurden nach den Kriterien

- einfach
- kostengünstig
- praxisnah
- Erfassung der wesentlichen Eigenschaften (mechanische Festigkeit, Lichtdurchlässigkeit) ausgewählt.

Ausgewählt und eingesetzt wurden:

- 1) **Visuelle Begutachtung** nach 0, 1, 2.5, 5, 7.5 und 11 Jahren Bewitterung (Beschreibung der Veränderung und Dokumentation durch Fotos)
- 2) **Bestimmung der Lichtdurchlässigkeit** [3] nach 0, 1, 2.5, 5, 7.5 und 11 Jahren Bewitterung (Bestimmung der Lichtdurchlässigkeit in Prozent nach der Norm NF 38511)
- 3) **Simulierter Hagelschlag** [5] nach 0, 2.5, 5 und 7.5 Jahren Bewitterung (Bestimmung der angenäherten kleinsten Schädigungsgeschwindigkeit in m/s in Anlehnung an die Norm SIA 280)
- 4) **Zugfestigkeit** [6] nach 0, 2.5, 5 und 7.5 Jahren Bewitterung (Bestimmung von Spannung und Dehnung bei  $F_{max}$  gemäss DIN 53455)
- 5) **Kugeldruckhärte** [7] nach 0 und 2.5 Jahren Bewitterung (Bestimmung der Härte nach DIN 53456)
- 6) **Torsionsschwingpendel** [8] nach 0 und 7.5 Jahren Bewitterung (Bestimmung von Schubmodul und Glasübergang nach DIN 53445 B)

### 3. Resultate

#### 3.1. Visuelle Begutachtung

Bei der visuellen Begutachtung wurden die äusserlichen Veränderungen wie Farbe, Transparenz, Rauigkeit, Glanz, sonstige Veränderungen der Oberfläche, z.B. Rissbildung, qualitativ beurteilt. Auf eine Darstellung der Veränderungen jedes einzelnen Materials wird verzichtet, dafür aber die charakteristischen Veränderungen im Aussehen nach Materialklassen vorgestellt.

Die **PMMA**-Materialien zeigen Tendenz zum Milchigwerden. Die äusseren Veränderungen sind jedoch auch nach elf Jahren Bewitterung in der Regel gering.

Bei den **PVC**-Produkten konnten teilweise nach relativ kurzen Bewitterungszeiten (zweieinhalb Jahre) starke Veränderungen beobachtet werden, die sich im Laufe der Bewitterung noch verstärkten. Typischerweise beobachtet man eine Farbänderung zu schwarz oder gelb.

Platten aus **PC** weisen vergleichbar wie die **PMMA**-Produkte nur wenig Ver-

änderungen im Aussehen nach elf Jahren Freibewitterung auf, tendenziell beobachtet man Vergilben.

Bei den **GF-UP**-Produkten waren die auffälligsten äusseren Veränderungen das zum Teil ganzflächige Freilegen von Glasfasern und in der Folge Bewuchs durch Mikroorganismen (Algenbildung, Pilze usw.) bzw. Festsetzen von Schmutz.

#### 3.2. Lichtdurchlässigkeit

Die Werte der Lichtdurchlässigkeit [2] in Prozent sind in *Tab. 2* dargestellt. In *Fig. 2* ist die relative prozentuale Abnahme der Lichtdurchlässigkeit (bezogen auf den Anfangswert) gezeigt.

Nach elf Jahren Freibewitterung weisen vier von fünf Kunststoff-Platten aus **PC** eine relative prozentuale Abnahme der Lichtdurchlässigkeit von 17–25% auf und sind bezüglich der Lichtdurchlässigkeit die am besten geeigneten Materialien verglichen mit den vier untersuchten Materialtypen. Nur das Material **PC 2** schneidet mit einer Abnahme von 34% deutlich schlechter ab.

Beim Materialtyp **PMMA** ist die relative prozentuale Abnahme der Lichtdurchlässigkeit zwischen 15 und 50% gestreut.

Mit einer Streuung der relativen pro-

zentualen Abnahme zwischen 40 und 75% sind die Eigenschaften der **GF-UP**-Materialien eher in der unteren Hälfte bezüglich Lichtdurchlässigkeit anzuordnen.

Die **PVC**-Materialien zeigen mit einer Streuung der relativen prozentualen Abnahme zwischen 54 und 100% ein deutlich schlechteres Verhalten bezüglich der Lichtdurchlässigkeit. Insbesondere ist die Abnahme der Lichtdurchlässigkeit nach relativ kurzen Bewitterungszeiten zu bemerken (vgl. *Tab. 2* und *Fig. 2*).

#### 3.3. Verhalten unter simuliertem Hagelschlag

Die Messungen der Hagelschlagbeständigkeit [5] in Anlehnung an die Norm SIA 280 zeigt, dass die vier unterschiedlichen Materialtypen schon im Anfangszustand gravierende Unterschiede aufweisen (vgl. *Tab. 3*).

So blieben die **PMMA**-Platten nur bis zu einer Schädigungsgeschwindigkeit von 3–4.5 m/s unbeschädigt. Mit einer angenäherten kleinsten Schädigungsgeschwindigkeit zwischen 15 und 19 m/s zeigten die **PVC**-Materialien bessere Eigenschaften bezüglich schlagender Beanspruchung als die **PMMA**-Materialtypen. Mit einer deutlich höheren Geschwindigkeit (60–

Tab. 2. Lichtdurchlässigkeit in Prozent nach NF 38511

Materialtyp	Bezeichnung der Form	Anlieferung	1 Jahr bewittert	2.5 Jahre bewittert	5 Jahre bewittert	7.5 Jahre bewittert	11 Jahre bewittert
		0 [%]	1 [%]	2.5 [%]	5 [%]	7.5 [%]	11 [%]
PMMA 1	SDP	80.5	78.1	70.4	60.5	47.5	40.4
PMMA 2	SDP	79.3	76.2	71.4	69.4	65.6	66.7
PMMA 3	SDP	37.9	37.1	36.6	32.6	27.8	24.6
PVC 1	SDP	71.3	68.2	62.0	43.2	0.2	0.04
PVC 2	SDP	51.7	47.2	24.3	21.5	17.7	14.0
PVC 3	SDP	60.9	59.1	48.2	40.0	32.2	28.1
PVC 4	SDP	42.5	42.5	39.0	23.6	18.6	10.5
PVC 5	SDP	60.9	56.1	50.9	28.4	0.38	0.26
PVC 6	SDP	68.4	59.4	41.4	21.8	4.4	1.2
PC 1	SDP	83.9	80.9	77.3	74.8	70.1	
PC 2	HP	79.3	78.1	73.2	61.4	47.5	52.6
PC 3	SDP	80.5	78.3	77.2	77.7	70.4	60.4
PC 4	SDP	85.1	81.9	80.4	79.5	72.6	70.1
PC 5	SDP	85.1	84.8	80.2	79.5	70.6	70.2
GF-UP 1	WDP	76.2	69.2	65.1	59.2	49.9	43.0
GF-UP 2	RP	80.5	79.4	71.4	71.8	60.5	45.6
GF-UP 3	WDP	75.2	69.4	67.8	58.7	45.1	45.6
GF-UP 4	WDP	71.4	63.3	55.4	34.9	26.4	18.4
GF-UP 5	WDP	75.2	68.5	64.4	57.4	47.2	41.2

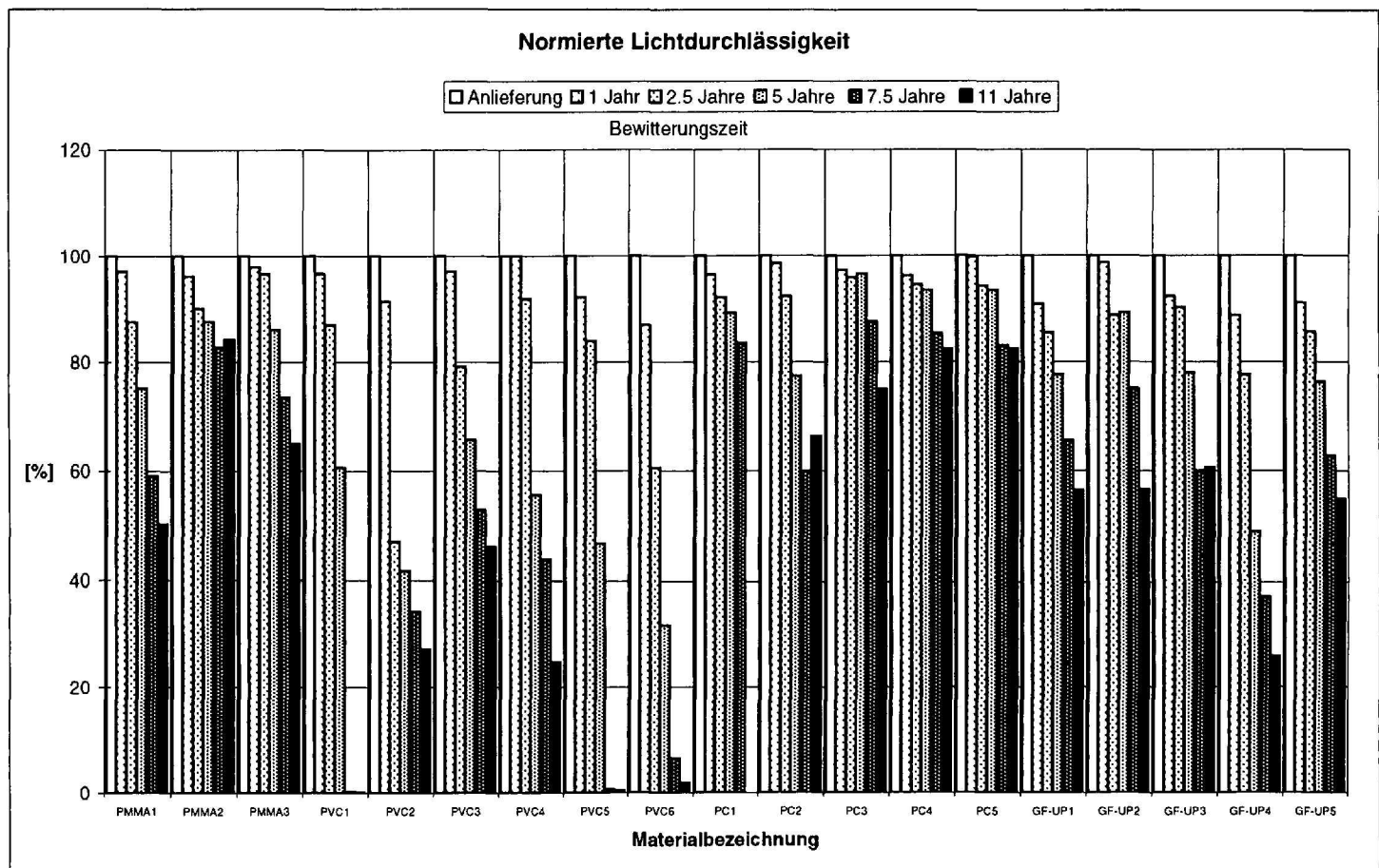


Fig. 2. Normierte Lichtdurchlässigkeit

Tab. 3. Hagelschlagbeständigkeit nach SIA 280, angenäherte kleinste Schädigungsgeschwindigkeit [m/s]

Material	Bezeichnung der Form	Anlieferung	2.5 Jahre bewittert	5 Jahre bewittert	7.5 Jahre bewittert
		0 [m/s]	2.5 [m/s]	5 [m/s]	7.5 [m/s]
PMMA 1	SDP	4.5	4.5	2	2.5
PMMA 2	SDP	3	3	2	2
PMMA 3	SDP	3	3	2	2
PVC 1	SDP	17	11	3	6.5
PVC 2	SDP	19	6	2	2
PVC 3	SDP	15	6.5	5	2.7
PVC 4	SDP	17	12	2.5	2
PVC 5	SDP	15.5	7.5	2	2
PVC 6	SDP	15	4	2	2
PC 1	SDP	48	8.5	8.2	
PC 2	HP	48	40.2	31.2	25
PC 3	SDP	48	15.5	14.5	11
PC 4	SDP	48	10.5	8	8
PC 5	SDP	48	15	4	5
GF-UP 1	WDP	26	25	25	24
GF-UP 2	RP	20	15	17	16
GF-UP 3	WDP	21	20	-	19
GF-UP 4	WDP	24	23	-	22
GF-UP 5	WDP	25	23	23	20

70 m/s, PC; 20–26 m/s, GF-UP) liessen sich die beiden anderen Kunststoff-Typen PC und GF-UP behageln bevor sie Schädigungen aufwiesen.

Bedingt durch das unterschiedliche Alterungsverhalten veränderte sich die Reihenfolge der Materialien bezüglich Hagelbeständigkeit nach siebeneinhalb Jahren Freibewitterung. Im Verlauf der Jahre nahm die Hagelbeständigkeit bei den GF-UP-Kunststoff-Platten deutlich weniger (8–20%) ab als bei den übrigen Materialien. Die PMMA-Produkte zeigten einen Verlust der Hagelbeständigkeit von mindestens 33–44%. PVC-Platten verloren 62–89% ihrer anfänglichen Hagelbeständigkeit. Die PC-Kunststoff-Platten, die sich durch eine sehr hohe Beständigkeit im Anlieferungszustand auszeichneten, wiesen nach siebeneinhalb Jahren Freibewitterung einen Verlust von 51–93% auf. Die relative Abnahme der Hagelbeständigkeit ist insbesondere in Fig. 3 ersichtlich (auf Anfangswerte normierte Hagelbeständigkeit).

3.4. Zugfestigkeit [6]

Mit den Kenngrößen ‘Streck-/Bruchdehnung’ und ‘Streck-/Bruchspannung’ lassen sich Aussagen über die mechanischen Eigenschaften von Materialien machen. Neben der Änderung der Spannung und Dehnung bei Maximalkraft ist das Bruch-

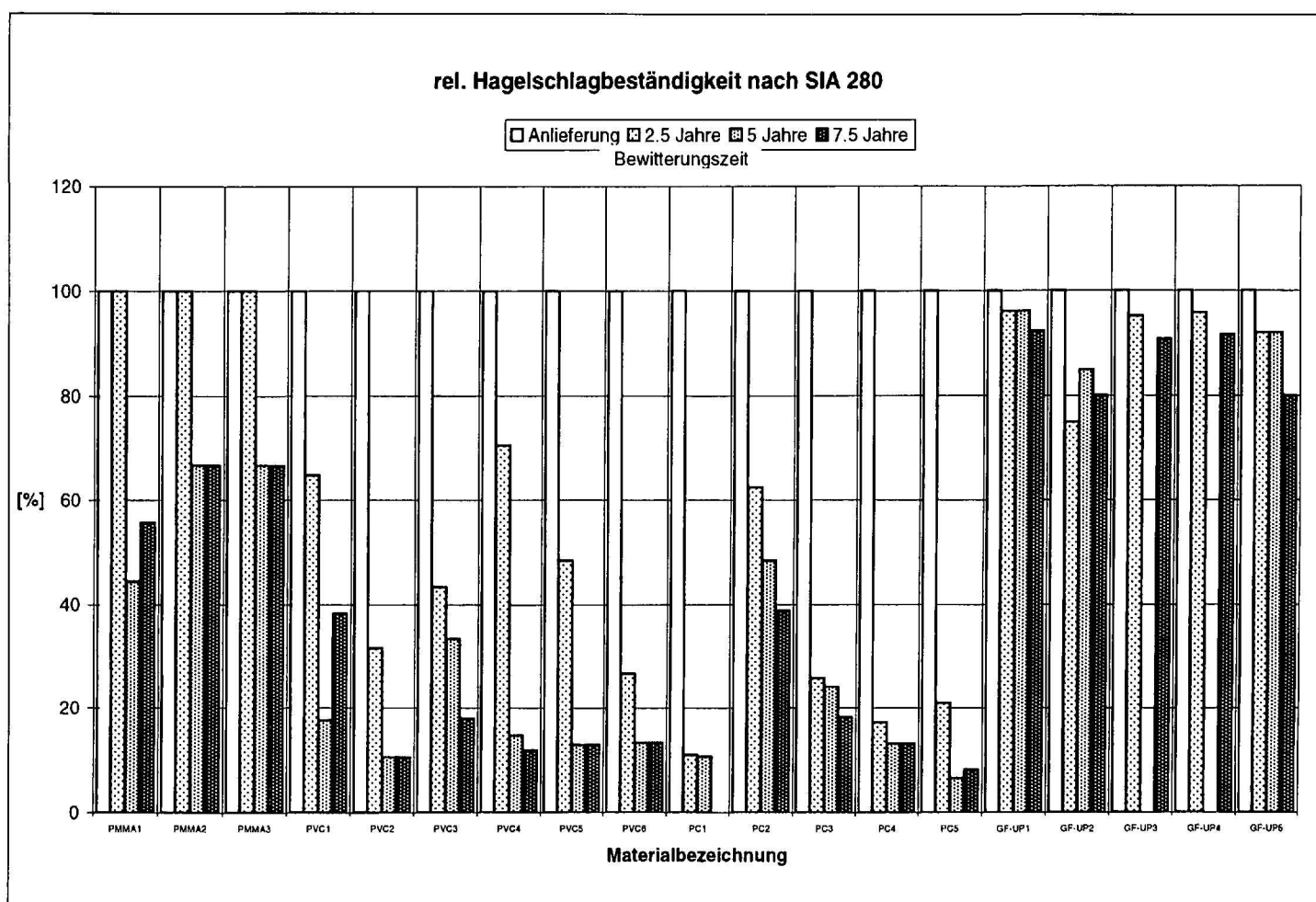


Fig. 3. Relative Hagelschlagbeständigkeit nach SIA 280

Tab. 4. Beschreibung des Bruchverhaltens nach 0 und 7.5 Jahren

Materialtyp	0 Jahre	7.5 Jahre
PMMA 1	spröde	spröde
PMMA 2	spröde	spröde
PMMA 3	spröde	spröde
PVC 1	Verstreckung (leichter Weissbruch), spröde	spröde
PVC 2	Verstreckung (Weissbruch), duktil	eher spröde
PVC 3	Verstreckung (Weissbruch), spröde	leichte Verstreckung (Weissbruch), spröde
PVC 4	Verstreckung (Weissbruch), duktil	leichte Verstreckung, spröde
PVC 5	Verstreckung (Weissbruch), spröde	Verstreckung, ohne Bruch
PVC 6	spröde	Verstreckung (Weissbruch), spröde
PC 1	Verstreckung, spröde	spröde
PC 2	Verstreckung (Weissbruch), spröde	leichte Verstreckung, spröde
PC 3	Verstreckung, spröde	spröde
PC 4	Verstreckung, spröde	spröde
PC 5	Verstreckung, spröde	spröde
GF-UP 1	spröde	spröde
GF-UP 2	spröde	spröde
GF-UP 3	spröde	spröde
GF-UP 4	spröde	spröde
GF-UP 5	spröde	spröde

verhalten der Kunststoff-Lichtplatten von Bedeutung. In Tab. 4 ist das Bruchverhalten im Anfangszustand demjenigen nach siebeneinhalb Jahren Bewitterung gegenübergestellt.

Die Mittelwerte für die Spannungen (N/mm<sup>2</sup>) und Dehnungen (%) bei Maximalkraft sind in den Tab. 5 und 6 gezeigt.

Die PMMA-Materialien ändern ihr Bruchverhalten wenig, die Spannung (bis auf PMMA 3) wie die Dehnung nehmen ab. Bei allen drei Materialien beobachtet man einen Sprödebruch im Anlieferungszustand wie nach siebeneinhalb Jahren Freibewitterung.

Bei den PVC-Platten schlägt sich das Alterungsverhalten sehr unterschiedlich in den Werten für die Spannung und Dehnung nieder. So nimmt die Spannung bei gleichzeitiger Zunahme der Dehnung für PVC 1 leicht zu. Für PVC 2, PVC 3 und PVC 5 nimmt die Spannung tendenziell zu, die Dehnung dabei aber deutlich ab. Bei PVC 4 ist die Spannung unverändert, dafür ist aber eine stärkere Abnahme der Dehnung zu beobachten. Im Falle von PVC 6 sind die Werte der Spannung erhöht, die der Dehnung gleich geblieben. Materialien, die ein duktiler Bruchverhalten zeigten, brechen nach siebeneinhalb

Jahren Bewitterung spröde. Beim PVC 5 konnte unter den gewählten Prüfbedingungen kein Bruch nach siebeneinhalb Jahren Bewitterung induziert werden.

Die PC-Proben weisen nach der Alterung ein deutlich unterschiedliches Verhalten zum Neuzustand auf. So zeigten alle PC-Materialien zwar ein sprödes Verhalten, jedoch eine Verstreckung im Neuzustand. Nach siebeneinhalb Jahren sind kaum Verstreckungen zu beobachten, das Spröbruchverhalten bleibt erhalten. Die PC-Platten zeigten bis auf PC 2, was quasi unverändert blieb, sowohl eine Abnahme der Spannung als auch der Dehnung.

Bei den GF-UP-Materialien finden sich die geringsten Änderungen für Spannung und Dehnung, lediglich GF-UP 3 zeigt für beide Werte eine deutliche Abnahme. Das anfänglich spröde Bruchverhalten ist auch nach siebeneinhalb Jahren Bewitterung unverändert.

**3.5. Kugeldruckhärte**

Auf eine detaillierte Aufstellung der Kugeldruckhärte-Messungen [7] nach DIN 53456 wird im Rahmen dieser Veröffentlichung verzichtet, da die Messungen keine reproduzierbaren Daten ergaben. Die Ursache hierfür liegt in den im allgemeinen für diese Prüfung zu dünnen Plattenmaterialien. Es wurden Messungen bei Anlieferung und nach zweieinhalb Jahren Bewitterung durchgeführt, auf weitere Messungen wurde verzichtet.

**3.6. Torsionsschwingversuche**

Die Torsionsschwingversuche [8] wurden an neun ausgewählten Materialien im Anfangszustand und nach siebeneinhalb Jahren Freibewitterung durchgeführt. Auf eine Darstellung der exakten Werte in Fig. und Tab. wird verzichtet. Es wird nur eine qualitative Beurteilung der Veränderungen der Schubmodulkurven für die neun gemessenen Materialien nach siebeneinhalb Jahren Bewitterung abgegeben.

- PMMA 1 keine charakteristischen Veränderungen sichtbar
- PMMA 3 keine charakteristischen Veränderungen sichtbar
- PVC 1 Verschiebung des Glasübergangs  $T_g$  um 10 K von 71° auf 81°
- PVC 2 Anstieg des Schubmoduls vor  $T_g$  um ca. 20%
- PVC 4 keine charakteristischen Veränderungen sichtbar
- PC 2 Erniedrigung des Glasübergangs  $T_g$  um ca. 3 K von 155° auf 152°
- PC 5 Erniedrigung des Glasübergangs  $T_g$  um ca. 4 K von 152° auf 148°

Tab. 5. Spannung bei  $F_{max}$  [N/mm<sup>2</sup>] nach DIN 53455 (nur Mittelwerte)

Materialtyp	Bezeichnung der Form	Anlieferung	2.5 Jahre bewittert	5 Jahre bewittert	7.5 Jahre bewittert
		0 [N/mm <sup>2</sup> ]	2.5 [N/mm <sup>2</sup> ]	5 [N/mm <sup>2</sup> ]	7.5 [N/mm <sup>2</sup> ]
PMMA 1	SDP	71.8	71.3	62.06	60.01
PMMA 2	SDP	72.6	71.5	61.46	65.18
PMMA 3	SDP	67.5	71.8	65.57	67.71
PVC 1	SDP	63	68.6	46.72	70.75
PVC 2	SDP	48.2	51	51.84	53.13
PVC 3	SDP	54	60	57.82	61.09
PVC 4	SDP	46.8	49.5	45.91	46.17
PVC 5	SDP	53	56.2	52.14	59.91
PVC 6	SDP	50.4	52.2	55.95	60.35
PC 1	SDP	62.4	57.9	–	56.01
PC 2	HP	61.5	67.3	63.46	64.66
PC 3	SDP	58.7	60	54.57	37.99
PC 4	SDP	59.1	59.9	44.99	42.19
PC 5	SDP	58.1	59.3	48.35	50.6
GF-UP 1	WDP	102.2	93.3	–	103.13
GF-UP 2	RP	39.6	45.6	–	37.56
GF-UP 3	WDP	86.5	73.9	–	72.88
GF-UP 4	WDP	77.3	72.8	–	60.46
GF-UP 5	WDP	110.3	82.1	–	104.59

Tab. 6. Dehnung bei  $F_{max}$  [%] nach DIN 53455 (nur Mittelwerte)

Materialtyp	Bezeichnung der Form	Anlieferung	2.5 Jahre bewittert	5 Jahre bewittert	7.5 Jahre bewittert
		0 [%]	2.5 [%]	5 [%]	7.5 [%]
PMMA 1	SDP	3.81	3.89	2.88	2.81
PMMA 2	SDP	3.67	3.87	2.87	3.42
PMMA 3	SDP	3.38	3.71	3.62	2.9
PVC 1	SDP	3	2.89	1.58	3.46
PVC 2	SDP	3.3	2.91	2.75	2.65
PVC 3	SDP	4.5	2.8	2.76	3.09
PVC 4	SDP	4.7	2.86	2.76	2.74
PVC 5	SDP	3.6	3.22	2.93	3.28
PVC 6	SDP	3.2	2.58	2.91	3.23
PC 1	SDP	6.8	5.28	nicht ermittelt	5.29
PC 2	HP	5.9	6.27	5.77	5.79
PC 3	SDP	6.7	6.7	5.65	2.96
PC 4	SDP	6.4	5.3	4.14	3.16
PC 5	SDP	7.3	5.3	3.98	4.93
GF-UP 1	WDP	1.22	1.1	–	1.34
GF-UP 2	RP	0.98	1.04	–	0.94
GF-UP 3	WDP	1.86	0.85	–	1.07
GF-UP 4	WDP	1.28	1.21	–	1.22
GF-UP 5	WDP	1.08	0.88	–	1.21

GF-UP 1 Anstieg des Schubmoduls vor dem  $T_g$  um ca. 20 %, Anstieg des Glasübergangs um ca. 4 K von 84° auf 88°

GF-UP 4 Praktisch völlig anderer Verlauf der Kurven; sowohl für den Schubmodul als auch für die Dämpfung. Abfall des Schubmoduls vor dem  $T_g$  um ca. 10%, stark verringerte Steigung der Schubmodulkurve beim Abfall zum Glasübergang  $T_g$ .

Der Einfluss der Alterung zeigte sich im Torsionsschwingversuch nicht in charakteristischen Veränderungen der Materialeigenschaften, teilweise nicht einmal innerhalb einer Materialklasse. Mit dem Torsionsschwingversuch konnte die Veränderung der Materialien bei Alterung nur schlecht erfasst werden.

## 4. Diskussion

### 4.1. Beurteilung der eingesetzten Prüfmethode

Die wichtigsten Eigenschaften von Kunststoff-Platten, die als Lichtplatten zur Anwendung kommen, sind eine möglichst hohe Lichtdurchlässigkeit über einen langen Zeitraum und Beständigkeit gegen schlagende Beanspruchungen (z.B. Hagel) zu gewähren.

Um die optischen Eigenschaften der Kunststoff-Platten erfassen und beschreiben zu können, wurden die visuelle Begutachtung und die Lichtdurchlässigkeit bestimmt.

Die mechanischen Eigenschaften der Kunststoff-Platten sollten mit Hilfe der übrigen Prüfungen (Zugversuch, Kugeldruckhärte, Hagelsimulation, Torsionsschwingversuch) erfasst werden.

#### 4.1.1. Visuelle Begutachtung

Die visuelle Begutachtung ist im Prinzip eine einfache und schnelle Methode um Schädigungen und Verfärbungen an den Plattenmaterialien, die im Verlauf der Versuchsdurchführung entstanden sind, qualitativ und halbquantitativ abzuschätzen. Sie ermöglicht eine ästhetische Beurteilung der Veränderungen wie Verfärbungen, Oberflächen-Veränderungen oder Änderung der Transparenz, Glanzverlust und Rauigkeit, die durch natürliche Bewitterung hervorgerufen wurden. Die Veränderungen lassen sich durch Photographien einfach dokumentieren. Nachteile der visuellen Begutachtung sind 1) keine absolute Bewertung (kein quantitatives Kriterium), 2) subjektiver Einfluss durch die bewertende Person und 3) sind keine

Informationen über mechanische Eigenschaften möglich.

#### 4.1.2. Lichtdurchlässigkeit

Die Messung der Lichtdurchlässigkeit ist eine äusserst sinnvolle und aussagekräftige Methode, um die Veränderungen der Plattenmaterialien bezüglich ihrer Lichtdurchlässigkeit zu beschreiben. Dabei wird zunächst die Menge Licht ohne Platte und anschliessend mit Platte gemessen. So wird die absolute Menge Licht, welche durch die Platte hindurchdringt, in Prozent bestimmt. Die Messung der Lichtdurchlässigkeit ermöglicht eine quantitative Bestimmung der Abnahme und lässt einen Vergleich verschiedener Materialien zu. Farbliche Veränderungen der Kunststoff-Lichtplatten werden nicht erfasst, da gemittelte Werte über den gesamten Spektralbereich der Lichtquelle gemessen werden. Die Anforderung an transparente Kunststoffmaterialien möglichst über einen langen Zeitraum Beleuchtung durch Tageslicht zu gewährleisten, lässt sich mit Hilfe der Messung der Lichtdurchlässigkeit gut überprüfen.

#### 4.1.3. Hagelschlagsimulation

Mit der Hagelprüfung steht eine Methode zur Verfügung, welche die Veränderungen des Materials bezüglich der dynamisch-mechanischen Eigenschaften durch Freibewitterung gut erfasst. Mit der Bestimmung der angenäherten kleinsten Schädigungsgeschwindigkeit ( $v_{as}$  = Geschwindigkeit, bei der keine Schäden (Delle, Beule, Riss etc.) mit dem Auge beobachtet werden) lässt sich die Änderung des Materials auf schlagende Beanspruchung quantitativ erfassen, waseinen Vergleich unterschiedlicher Materialien ermöglicht. Die tatsächliche Beanspruchung im Einsatz (Hagelunwetter) kann gut simuliert werden. Die Hagelprüfung ist nicht allzu aufwendig, bedingt aber Proben von einer bestimmten Mindestgrösse, so dass ausreichend Material zur Verfügung stehen muss.

Die Hagelschlagprüfung ist seit über 20 Jahren im Einsatz und international anerkannt. Langjährige Erfahrung mit der Hagelschlagprüfung lehrten uns, dass sich mit einer Simulation des Hagels mit Kugeln vom Durchmesser 40 mm nicht immer die Schadensbilder, welche durch natürlichen Hagel verursacht werden, vergleichbar erzeugen lassen. Man erhält durch Hagelkörner kleineren Ausmasses ebenfalls Schäden, die bislang nicht einwandfrei simuliert werden konnten. Seit ca. drei Jahren ist eine neu konzipierte Hagelkanone im Einsatz, mit der der Einfluss von kleinen Hagelkörnern (z.B. 20,

10 mm Ø) mit hoher kinetischer Energie studiert werden kann. Der prinzipielle geometrische Aufbau einer Lichtplatte beeinflusst neben dem Werkstoff und seinen charakteristischen Eigenschaften die Schädigung wesentlich. Mit der neuen technischen Einrichtung lassen sich diese Einflüsse besser studieren und die Kenntnisse über die Entstehung von Hagelschäden vertiefen. Eine Erweiterung der Hagelprüfung durch Testen mit Kugeln kleineren Durchmessers erscheint daher sehr sinnvoll.

#### 4.1.4. Zugversuch

Der Zugversuch ist eine weitverbreitete Methode, um Materialveränderungen aufzuzeigen. Auch bei dieser Untersuchung zeigte sich, dass die Messung der Zugfestigkeit prinzipiell zur Bestimmung von Änderungen, die durch Freibewitterung verursacht sind, geeignet ist. Sie simuliert im Hinblick auf den Verwendungszweck der untersuchten Materialien eher statische Beanspruchungen der Proben, wie z.B. Schneelast oder Windlast. Materialien können im Verlauf der Alterung härter und spröder oder auch weicher werden; ihr Bruchverhalten wird dadurch beeinflusst. Insbesondere Mikrorisse oder Rissbildung grösseren Ausmasses an der Oberfläche üben Einfluss auf das Bruchverhalten aus. Mit Hilfe eines Zugversuches lassen sich sowohl die mechanischen Kenngrössen 'Streck-/Bruchdehnung' und 'Streck-/Bruchspannung' sowie das Bruchverhalten (duktil/spröde) ermitteln und diese mit den Werten im Neuzustand und den Angaben des Rohstoffes vergleichen.

Die Auswertung der Ergebnisse ergab, dass die veränderten Eigenschaften durch die Prüfung erfasst werden, jedoch spricht die Prüfung auf die Veränderungen im Material durch Freibewitterung nicht so empfindlich an wie z.B. die Prüfung der Hagelschlagbeständigkeit und lässt somit weniger genaue Aussagen zu. Die Interpretation der Messdaten ist schwieriger als bei der Hagelschlagbeständigkeit. Darüber hinaus ist die Messung der Zugfestigkeit aufwendiger als die Bestimmung der Hagelschlagbeständigkeit, sie bietet aber den Vorteil, mit weniger Material für die Prüfung auszukommen.

#### 4.1.5. Kugeldruckhärte

Häufig bestimmt man die Kugeldruckhärte von Kunststoffen, weil sie mit der mechanischen Grösse E-Modul korreliert werden kann. Die Messung der Kugeldruckhärte bietet den Vorteil, dass sie deutlich weniger aufwendig ist als die Bestimmung des E-Moduls durch andere

Tab. 7. Klassierung der optischen Eigenschaften

Klasse	Kategorie OPE	Bewertung	Abnahme LD	Veränderung
1	niedrigste	ungenügend	≥ 50%	sehr starke
2	niedrige	befriedigend	26–49%	starke
3	mittlere	gut	13–25%	deutliche
4	hohe	sehr gut	6–12%	geringfügige
5	höchste	ausgezeichnet	0– 5%	keine

Tab. 8. Klassierung des Hagelwiderstandes

Klasse	Kategorie HWS	Anforderungswiderstand $v_{as}$ [m/s]	Bauteil-Werkstoffzuordnung (z.B. in Materialnorm zu regeln)
1	niedrigste	5	Fensterscheiben
2	niedrige	9	Ziegel, anorganische Werkstoffe, kleine Elemente
3	mittlere	17	Dachdichtungsbahnen (Kunststoffe, Polymer-Bitumen)
4	hohe	25	bei direkter Personengefährdung, einlagige, dünne Elemente
5	höchste	> 30	nach Definition Bauherr oder Hersteller

Tab. 9. Klassierung der Gesamtbeurteilung

Klasse	Kategorie GB	Bewertung	Eignung	Summe OPE + HWS
1	niedrigste	ungenügend	ungeeignet	≤3
2	niedrige	befriedigend	bedingt geeignet	5–4
3	mittlere	gut	geeignet	7–6
4	hohe	sehr gut	gut geeignet	9–8
5	höchste	ausgezeichnet	sehr gut geeignet	10

Methoden und dennoch einen qualitativen Rückschluss auf den E-Modul zulässt.

Jedoch liessen sich die Veränderungen der mechanischen Kenngrösse Härte von bewitterten Materialien mit der Kugeldruckhärte schlecht erfassen. Innerhalb einer Messreihe war die Streuung der Messwerte so hoch, dass eine Interpretation der erhaltenen Ergebnisse nicht möglich war. Ursache hierfür war die zu geringe Dicke der untersuchten Kunststoff-Plattenmaterialien für eine normgerechte Durchführung der Prüfung Kugeldruckhärte. Die Kugeldruckhärte erfasst Veränderungen der Oberfläche gut, so dass sie prinzipiell als Messmethode für orientierende Werte gut geeignet wäre. Ob die Bestimmung der Kugeldruckhärte als Methode zur Erfassung von Einflüssen durch Freibewitterung bei Kunststoff-Materialien einsetzbar ist, konnte anhand der erhaltenen Ergebnisse nicht geklärt werden. Bei den vorliegenden Materialien

war die Kugeldruckhärte nicht geeignet, Unterschiede aufzuzeigen und eine Korrelation mit den abnehmenden Materialeigenschaften herzustellen.

4.1.6. Torsionsschwingversuch

Der Torsionsschwingversuch ermöglicht die Bestimmung des Schubmoduls in Abhängigkeit von der Temperatur als charakteristische Materialkenngrösse. Ebenso kann die für Kunststoffe charakteristische Kenngrösse Glasumwandlungstemperatur  $T_g$  dem Kurvenverlauf entnommen werden. Bestimmte Alterungseffekte, welche die mechanischen Eigenschaften eines Werkstoffes verändern, werden durch den Torsionsschwingversuch prinzipiell gut wiedergegeben.

Die Auswertung der Torsionsschwingversuche ergab jedoch, dass die verwendete standardisierte Auswertemethode zur Beurteilung der durch Freibewitterung veränderten Materialeigenschaften der

Lichtplatten nicht tauglich war. Neuere Methoden, Variation der Versuchsdurchführung und Auswertung erlauben möglicherweise eine bessere Korrelation der Daten mit der Alterung. In einzelnen Fällen waren die Torsiogramme verändert, in den meisten Fällen liess sich jedoch keine charakteristische Änderung des Kurvenverlaufs beobachten. Für die beiden ausgewerteten Grössen liessen sich keine klaren Änderungen feststellen, welche eine Korrelation zwischen Bewitterung und Veränderung der Grössen zulassen. Um die Aussagekraft der Torsionsschwingversuche zu erhöhen, wäre es erforderlich, neue Auswertemethoden zu definieren.

4.2. Beurteilung der Materialien

Aus der Diskussion der Prüfmethoden geht klar hervor, dass die visuelle Begutachtung, die Messung der Lichtdurchlässigkeit und die Bestimmung des Hagelschlagwiderstandes die am besten geeigneten Prüfmethoden sind, um den Einfluss von Freibewitterung auf Kunststoff-Lichtplatten zu erfassen und zu beschreiben. Um die vier Materialklassen vergleichend beurteilen zu können, müssen Beurteilungskriterien festgelegt werden. Für die Einstufung der Platten wurden zwei Kriterien herangezogen: 1) die optischen Eigenschaften, bestehend aus visueller Begutachtung und Bestimmung der Lichtdurchlässigkeit, und 2) die mechanischen Eigenschaften, stellvertretend durch die Hagelschlagbeständigkeit beschrieben.

Definition der Beurteilungskriterien:

*Optische Eigenschaften (OPE):* Eine Kombination aus der Abnahme der Lichtdurchlässigkeit, mit dem quantitativen Kriterium relative Abnahme der Lichtdurchlässigkeit in Prozent (LD), und eine qualitative Bewertung der visuellen Veränderung dient zur Beurteilung der optischen Eigenschaften und ist in Tab. 7 definiert.

*Hagelschlagbeständigkeit (HWS):* Die von P. Flüeler [9] vorgeschlagene Klassierung des Hagelwiderstandes (HWS) wurde in leicht modifizierter Form zur Beurteilung und Klassierung des Verhaltens der Materialien gegenüber simuliertem Hagelschlag verwendet. Es wurden Anforderungswerte definiert (vgl. Tab. 8), welche mit klassischen Baumaterialien korrelieren und somit einen Vergleich zulassen.

*Gesamtbeurteilung (GB):* Um die Materialien gesamt beurteilen zu können, werden die Klasse der optischen Eigenschaften und des Hagelwiderstandes addiert und eine Klassierung gemäss Tab. 9 aufgestellt.



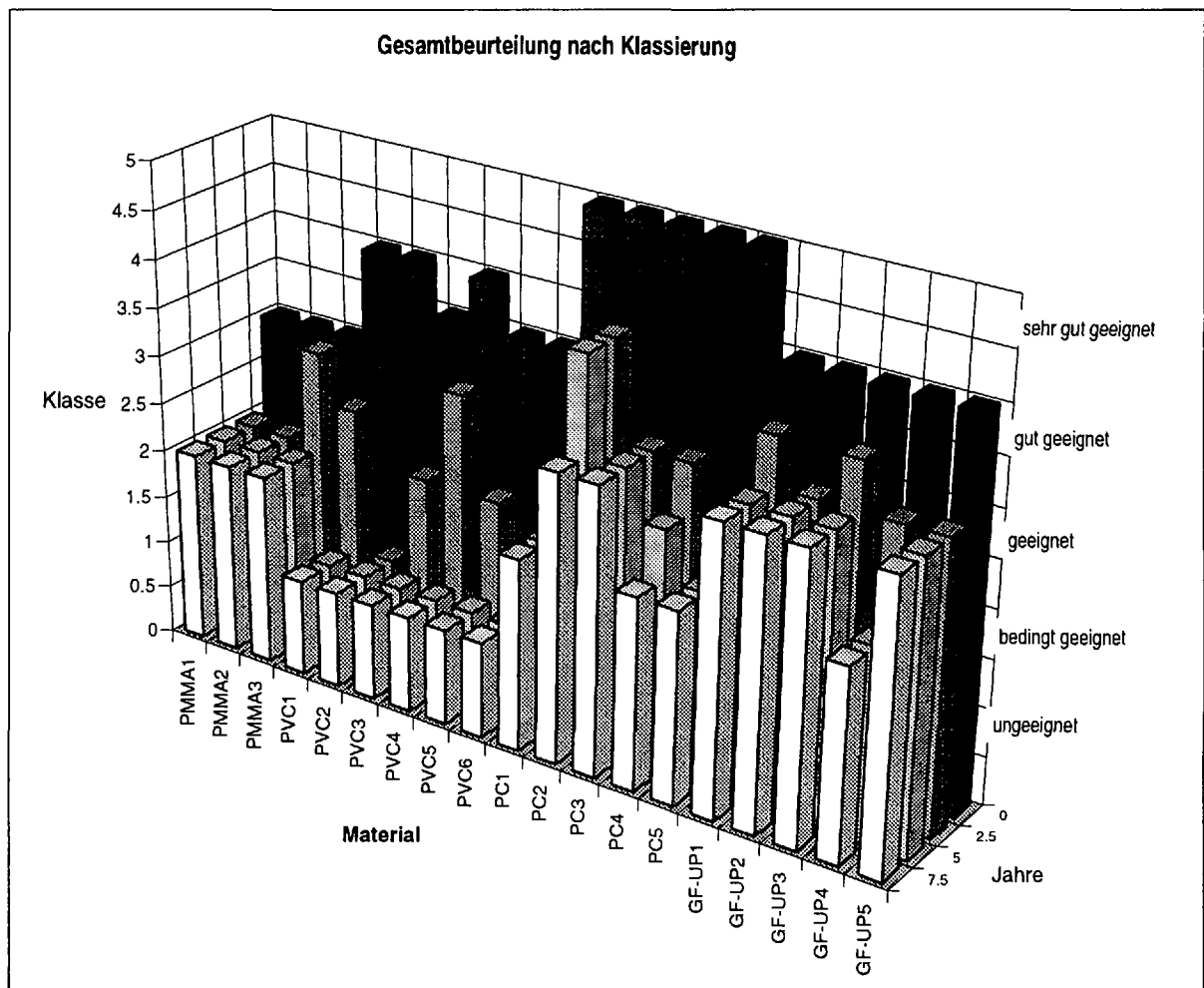


Fig. 4. Gesamtbeurteilung nach Klassierung

4.2.1. Beurteilung der optischen Eigenschaften

Die Beurteilung der einzelnen Materialien erfolgt gemäss den Beurteilungskriterien wie sie in Tab. 7 definiert sind. Da durch die Definition des Kriteriums Lichtdurchlässigkeit als prozentuale Abnahme der Lichtdurchlässigkeit bezogen auf den Anfangswert eines Material eine Unterscheidung der Anfangswerte der unterschiedlichen Materialien nicht berücksichtigt wurde, soll dies an dieser Stelle nachgeholt werden.

Es gilt, dass Licht bei jedem Übergang von Luft zu Glas um ca. 4% reflektiert und absorbiert wird, so dass bei einem doppelt verglasten Fenster etwa 16% Verlust an Lichtintensität auftritt. Vergleicht man nun diesen Wert von Glas mit den Lichtplatten aus Kunststoff, lassen sich folgende Aussagen treffen:

Das Verhalten der Platten aus PC und PMMA mit Anfangswerten von 80–85% entspricht demjenigen von Glas. Mit 75–80% erreichen die GF-UP-Platten nicht ganz so hohe Anfangswerte (bedingt durch ihren Aufbau, unterschiedlicher Brechungsindex von Faser und Harz), sind jedoch den PVC-Platten, welche Werte zwischen 60 und knapp 70% aufweisen, überlegen. Häufig scheint transparentes,

farbloses PVC einen bläulichen Schimmer zu haben, insbesondere wenn man die Schnittkanten einer Probe betrachtet. Die Farbe wird in der Regel von Stabilisatoren hervorgerufen, jedoch kann auch ein anderes Erscheinungsbild auftreten. Mit 85% zeigen PC 4 und PC 5 die höchsten Anfangswerte. Bei PMMA 3, welches einen absoluten Anfangswert von ca. 38% aufweist, handelt es sich um eine eingefärbte Platte, ebenso wie bei PVC 3 mit einem Anfangswert von ca. 43%.

Nach elf Jahren Freibewitterung können PMMA 1, PC 3, PC 4 und PC 5 als gut klassiert, PMMA 3 als gut bis befriedigend, PC 2, GF-UP 1 bis 3 und GF-UP 5 als befriedigend eingestuft werden. Die übrigen Materialien müssen als ungenügend bzw. befriedigend bis ungenügend eingeordnet werden.

Die Lichtdurchlässigkeit lag nach siebeneinhalb Jahren für vier der fünf GF-UP-Materialien noch über 60% des Anfangswertes. Durch die im Verlauf des Versuches aufgetretene Algenbildung und Freilegung der Glasfasern auf der Oberfläche der Platten sind in ästhetischer Hinsicht Einschränkungen zu machen. Die Lichtdurchlässigkeitseigenschaften aller PC-Materialien sind als gut zu bewerten. Die ästhetischen Veränderungen sind eben-

falls nicht gravierend. Der Vorteil von Platten aus PMMA liegt eindeutig in der geringen Abnahme der Lichtdurchlässigkeit über mehrere Jahre hinweg. Die Lichtdurchlässigkeit der PVC-Platten hat im Mittel nach fünf Jahren Freibewitterung um ca. 50% abgenommen und lässt sich bis zu diesem Zeitpunkt als ausreichend klassieren, obschon ästhetische Veränderungen (Dunkelfärbung, Änderung der Farbe nach gelb usw.) den Ansprüchen nicht mehr genügen. Bei längerer Bewitterung (> fünf Jahre) verschlechterte sich die Lichtdurchlässigkeit zunehmend.

4.2.2. Beurteilung des Hagelschlagwiderstandes

Die Bewertung des Hagelwiderstandes wurde gemäss Tab. 8 durchgeführt. Nach siebeneinhalb Jahren Freibewitterung konnte nur noch PC 2 in Klasse 4 (sehr gut) eingereiht werden. GF-UP 1 und GF-UP 3 bis 5 werden als mittel bis hoch klassiert (Klasse 4–3, sehr gut bis gut). GF-UP 2 und PC 3 erzielten eine Klassierung zwischen 3 und 2 (gut bis befriedigend). Alle übrigen Materialien müssen als ungenügend oder befriedigend bis ungenügend eingeordnet werden. Stellt man voran, dass natürliche Hagelkörner mit einem Durchmesser von 40 mm im

Mittel eine Geschwindigkeit von *ca.* 25 m/s haben, kann man den HWS der verschiedenen Materialtypen dazu in Relation setzen. GF-UP-Platten sind mit 20–26 m/s im Neuzustand in die Klasse 3–4 (erhöhter bis hoher HWS) einzuordnen und genügen den tatsächlich auftretenden Geschwindigkeiten von Hagelkörnern. Auch nach siebeneinhalb Jahren Alterung durch Freibewitterung ändert sich diese Klassierung nicht wesentlich. Für alle PC-Platten wurde im Neuzustand ein HWS > 60 m/s ermittelt, der höchsten Anforderungen genügt. Vier der fünf untersuchten PC-Platten wiesen jedoch nach zweieinhalb Jahren Freibewitterung nur noch eine HWS der Kategorie normal bis erhöht auf und verschlechterten sich im Verlauf der Untersuchung. Der HWS von PC 2, im Gegensatz zu den übrigen PC-Plattenmaterialien (Stegdoppelplatten) eine Platte mit Hohlprofil, kann nach siebeneinhalb Jahren Freibewitterung in Klasse 4 (hoher HWS) eingestuft werden. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die Materialdicke ebenfalls einen wesentlichen Einfluss auf das Alterungsverhalten und das Hagelschlagverhalten hat. PC 2 wies mit 2 mm Dicke eine doppelt so hohe Dicke als die meisten anderen Stegdoppelplatten auf. Dies erklärt teilweise sein gutes Alterungsverhalten. Platten aus PMMA weisen bereits im Neuzustand mit *ca.* 3–4 m/s einen für die Anforderung ungenügenden HWS auf und könnten bei einem mittleren bis grossen Hagelunwetter schon im Neuzustand geschädigt werden. Die PVC-Stegdoppelplatten zeigten zu Beginn der Untersuchung mit 15–19 m/s einen HWS, der nahezu als ausreichend für die zu erwartende Beanspruchung bezeichnet werden kann. Bereits nach zweieinhalb Jahren Freibewitterung hatte jedoch der HWS im Schnitt über 50% abgenommen und muss mit Werten zwischen 12 und 4 m/s als normal bis niedrig eingestuft werden. Die Anforderung an das Material, über einen langen Zeitraum einen erhöhten HWS aufzuweisen, wurde durch die PVC-Materialien nicht erfüllt.

#### 4.2.3. Gesamtbeurteilung

Die Bewertung der einzelnen Materialien nach optischen und mechanischen Eigenschaften anhand der oben getroffenen Klassierungen ist in *Fig. 4* für 0, 2.5, 5 und 7.5 Jahre natürliche, Bewitterung zusammengefasst.

#### 4.2.4. Beurteilung der Lichtplatten nach Materialklassen

Die verschiedenen Materialien unterscheiden sich im Neuzustand wie auch

nach der Alterung grundsätzlich voneinander. Obwohl auch innerhalb der Materialgruppe Abweichungen vorhanden sind, erfolgt die Beurteilung nach Materialtypen getrennt. Eine Klassierung nach elf Jahren Freibewitterung kann streng anhand der festgelegten Kriterien nicht vorgenommen werden, da der HWS nach elf Jahren Freibewitterung nicht bestimmt wurde.

#### Platten aus PMMA

Diese Stegdoppelplatten weisen, sofern sie nicht eingefärbt sind, eine hohe Lichtdurchlässigkeit im Neuzustand auf, die sich nach siebeneinhalb Jahren Freibewitterung nur wenig verminderte (Klasse 3). Nach elf Jahren Freibewitterung war nur bei PMMA 1 eine deutlichere Abnahme der Lichtdurchlässigkeit (Klasse 2–1) zu beobachten, die beiden anderen PMMA-Platten veränderten sich kaum bis gar nicht. Die PMMA-Platten zeigen zum Teil Tendenz zum milchig werden (Abbau des Polymers auf der Oberfläche). Auffällig ist die schon im Neuzustand geringe Hagelschlagbeständigkeit im Vergleich zu anderen Materialtypen. Die geringe Hagelschlagbeständigkeit ist einerseits durch dünnwandige Produkte bedingt, andererseits charakteristisch für PMMA-Platten. (Einfache PMMA-Platten mit 4 bzw. 8 mm Dicke weisen einen HWS von *ca.* 17 m/s bzw. 21 m/s (Erfahrungswerte EMPA) auf. Stuft man diese Werte in das zugrundeliegende Bewertungssystem ein, so ist der HWS dieser Platten als hoch bis mittel zu bewerten.)

Diese Materialien werden im wesentlichen wegen der ungenügenden Hagelbeständigkeit als bedingt geeignet eingestuft.

#### Platten aus PVC

Dieses Material weist eine relativ hohe Anfangslichtdurchlässigkeit sowie im Durchschnitt eine mittlere HWS (>15 m/s) auf. Allerdings ist eine starke Abnahme der mechanischen Eigenschaften durch die Alterung festzustellen. So wiesen alle geprüften PVC-Platten bereits nach fünf Jahren Bewitterung eine ungenügende HWS (Klasse 1) auf. PVC 2 und PVC 4 bis 6 wurden nach *ca.* zwei Jahren natürlicher Bewitterung durch ein Hagelunwetter beschädigt. Auch die optischen Eigenschaften waren nach fünf Jahren nur noch befriedigend bis ungenügend (Klasse 2 oder 1). Sie zeigten entweder Tendenz zur Dunkelfärbung oder zum Milchigwerden. Die unterschiedlichen Alterungsphänomene lassen sich auf unterschiedliche Stabilisierung zurückführen (Chemie der Abbauprozesse abhängig von den Stabilisa-

toren). Nach fünf Jahren mussten alle PVC-Platten in der Gesamtbeurteilung in Klasse 1 und als ungenügend eingestuft werden.

Der Einsatz von PVC-Platten ist daher eher ungeeignet und nur bedingt empfehlenswert für ost- und nordseitig exponierte Fassaden, sofern eine Nutzungsdauer von mehr als fünf bis zehn Jahren nicht verlangt wird.

#### Platten aus PC

Alle Prüfmuster weisen im Neuzustand eine sehr hohe Lichtdurchlässigkeit und eine ausgezeichnete HWS auf. Doch nahmen die mechanischen Eigenschaften (insbesondere die HWS) bei den meisten Platten mit der Alterung schon nach kurzer Zeit stark ab. Der HWS von PC 5 war bereits nach zweieinhalb Jahren ungenügend. Nach fünf Jahren Bewitterung wies nur noch PC 2 einen ausgezeichneten HWS auf (dickeres Material). Die übrigen PC-Lichtplatten zeigten einen mittleren bis niedrigen HWS, teilweise waren die mechanischen Eigenschaften nur noch befriedigend bis ungenügend. Nach zwei Jahren natürlicher Bewitterung wurde PC 3 und PC 4 bei einem Hagelunwetter beschädigt. Die Lichtdurchlässigkeit verringerte sich wegen leichter Vergilbung in geringem Masse. So konnten die optischen Eigenschaften nach siebeneinhalb Jahren Bewitterung im Durchschnitt mit einer Klassierung in Klasse 3 als gut bewertet werden.

Die PC-Platten erwiesen sich als geeignet bis bedingt geeignet.

Polycarbonat-Platten der neueren Generation sind heute modifiziert. Sie werden oft mit einer koextrudierten Oberflächenschicht aus PMMA und/oder mit einem UV-Stabilisator ausgerüstet. Dies soll die Abnahme der mechanischen Eigenschaften durch Bewitterung verhindern. Diese Materialien müssen sich jedoch insbesondere in bezug auf ihr Langzeitverhalten noch bewähren.

#### Platten aus GF-UP

Diese Platten weisen von allen Materialien die kleinste Abnahme der Hagelbeständigkeit auf und ihr HWS lässt sich nach siebeneinhalb Jahren natürlicher Bewitterung mit Ausnahme von GF-UP 2 (gut bis befriedigend) als sehr gut bis gut bewerten. Die mechanischen Eigenschaften verändern sich infolge der Alterung nur in geringem Masse. Die Lichtdurchlässigkeit nahm etwa im gleichen Umfang (nach siebeneinhalb Jahren Bewertung gut, ausser GF-UP 4, ungenügend) ab wie bei den Materialien aus PC, und es liess sich eine Tendenz zur Vergilbung beobachten.

Als Folge der Bewitterung wurden stellenweise, bei einigen Platten sogar ganzflächig, die Glasfasern an der Oberfläche freigelegt, was wiederum zu Algenbewuchs führte.

Die Plattenmaterialien weisen ein gutes Alterungsverhalten auf und sind geeignet bis bedingt geeignet als Kunststoff-Lichtplatten.

Die Alterung der GF-UP-Platten ist im wesentlichen durch den Gelcoat bestimmt, der obersten Schutz- und Kosmetischicht. Hier ist, wie bei den neueren Typen der PC-Materialien der UV-Stabilisator enthalten. In Abhängigkeit von der unterschiedlichen Stabilisierung des Gelcoats bzw. der Deckschicht tritt die Veränderung des Materials auf. So waren bei manchen GF-UP-Platten die Glasfasern zu einem früheren Zeitpunkt freigelegt, in andern Fällen wurde das Phänomen nur stellenweise beobachtet. Speziell entwickelte Gelcoats bewährten sich am besten. Neben dem Gelcoat spielt die Bildung von Mikrorissen, die bereits bei niedriger Hagelbeanspruchung entstehen können, eine wichtige Rolle. In die Mikrorisse kann z.B. Wasser eindringen und den Alterungsprozess beschleunigen.

#### 4.2.5. Zusammenfassende Beurteilung der Materialien

Vergleicht man die vier Materialtypen untereinander, so hat sich nach elf Jahren Freibewitterung folgende Reihenfolge ergeben. Die GF-UP-Platten erwiesen sich als am besten geeignet, gefolgt von den PC-Platten. Platten aus PMMA waren aufgrund ihres geringen Hagelwiderstandes nur bedingt geeignet, und PVC-Lichtplatten erwiesen sich für eine längere Nutzungsdauer als ungeeignet.

### 5. Ausblick

Informationen über das Langzeitverhalten von Kunststoff-Lichtplatten in der Freibewitterung sind äusserst nützlich. Sie können helfen, die Schwachstellen der einzelnen Materialklassen zu erkennen und zu optimieren. So werden z.B. neuere Plattenmaterialien aus PC entweder an der Oberfläche beschichtet, oder sie sind koextrudiert. Damit sollte sich die zu Anfang hohe Hagelschlagbeständigkeit dieses Materialtyps in weitaus geringerem Masse verschlechtern, und die Materialien sollten als Oberlichter oder Lichtplatten prädestinieren. Durch die Kombination der drei Prüfmethoden (visuelle Begutachtung, Lichtdurchlässigkeit und Hagelschlagbeständigkeit) ist eine Beschreibung der wichtigsten Materialeigenschaften (mög-

lichst hohe Lichtdurchlässigkeit über einen langen Zeitraum und Beständigkeit gegen schlagende Beanspruchung) sowie deren Veränderungen durch natürliche Bewitterungseinflüsse gut möglich. Die Initiierung des Alterungsprozesses kann durch diese Methoden nicht ermittelt werden. Jedoch wäre es möglich die Abbauprozesse, welche im wesentlichen an der Oberfläche ablaufen, zu beschreiben, wenn moderne Analysemethoden wie z.B. Flugzeit-Sekundärionen-Massenspektrometrie (TOF-SIMS), Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie (FT-IR) oder gekoppelte Thermogravimetrie-Massenspektrometrie (TG-MS) eingesetzt werden.

Allen (ehemaligen) Mitarbeitern der Abteilung Kunststoffe/Composites, die bei der Durchführung dieses Versuches beteiligt waren, gilt ein Dank.

Eingegangen am 30. März 1998

- [1] a) A. Davis, D. Sims, 'Weathering of Polymers', Applied Science Publishers, London/New York, 1987; b) J. Wypych, 'Weathering Handbook', Chemtec Publishing, Toronto, 1990.
- [2] a) NF 38511; b) 'Kunststoff-Dichtungsbahnen (Polymer-Dichtungsbahnen) Anforderungswerte und Materialprüfung', Schweizer Ingenieur- und Architekten-Verein SIA 280, Zürich, 1983; c) 'DIN 53455, Prüfung von Kunststoffen, Zugversuch', 1988; d) 'DIN 53456, Prüfung von Kunststoffen, Härteprüfung durch Eindruckversuch', 1973; e) 'DIN 53445, Prüfung von polymeren Werkstoffen, Torsionsschwingversuch', 1986.
- [3] Lichtdurchlässigkeit nach NF 38511: Die durch einen Prüfkörper hindurchdringende Lichtmenge wird im Vergleich zur Messung ohne Prüfkörper bestimmt. Prüfbedingungen [4]: ganze Platte als Prüfkörper, als Messinstrument diente ein Lux-Meter Electronic B405618 Gossen.
- [4] Normklima:  $23 \pm 2/50 \pm 5\%$  relative Luftfeuchte SN-ISO 291.
- [5] Hagelschlagbeständigkeit nach SIA 280 (1983): Simulation des natürlichen Hagelschlags durch Beschuss der bei  $0^\circ$  auf einer festen Unterlage aufgelegten Lichtplatte mit einer Kugel aus Polyamid. Bestimmung der maximalen Kugelgeschwindigkeit, bei der das Material dicht bleibt. Prüfbedingungen [4]: ganze Platte als Prüfkörper, Spezialprüfmaschine zur Bestimmung der Widerstandsfähigkeit von Kunststoffdichtungsbahnen gegen simulierten Hagelschlag gemäss Norm SIA 280 (1983), Prüfung Nr. 8, Kugeldurchmesser 40 mm, mittlere Kugelmasse 38.5 g, Kugelmaterial Polyamid 6; Dichtheitsprüfung erfolgte mit einer Vakuumglocke, 30 mm, Unterdruck 50 kPa, während 30 s gemäss SIA 280 (1983). Wellplatten wurden an drei Orten geprüft (Wellenkamm, Wellental und in der Flanke). Bei Stegdoppelplatten erfolgte die Messung in der Mitte zwischen zwei Stegen.
- [6] Zugfestigkeit nach DIN 53455: Einachsiger Zugversuch mit konstanter Abzugsgeschwindigkeit mit Messung der Kraft und Verformung bis zum Bruch. Bestimmung der Materialkennwertes 'Steck-/Bruchdehnung' und 'Steck-/Bruchspannung'. Prüfbedingungen [4]: mindestens fünf Prüfkörper von der Oberseite der Prüfmuster, Abzugsgeschwindigkeit 10 mm/min, Prüfgerät: Universalprüfmaschine mit einer Maximalkraft von 5000 N, Messzelle 5000 N, Messbereich 0–2000 N, Dehnungsmessung mit einem optischen Wegaufnehmer. Die Zugfestigkeit wurde im Neuzustand und nach zweieinhalb Jahren Bewitterung mit einer Messgeschwindigkeit von 10 mm/min an DIN-3-Probekörpern gemessen. Die Messungen nach fünf und siebeneinhalb Jahren erfolgten mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/min, da die Materialien teilweise stark versprödet waren. Als weitere Massnahme wurden DIN-4-Probekörper verwendet. Vergleichsmessungen zwischen Prüfstäben 3 und 4 aus zwei verschiedenen Materialien im Neuzustand (PC und PVC) zeigten kaum einen Einfluss auf die Ergebnisse. Die gemessenen Abweichungen für die Kraft und Dehnung bei der Streckgrenze lagen innerhalb der Steuung der einzelnen Prüfkörper. Aus Erfahrung sollte die Änderung des Parameters Messgeschwindigkeit keinen besonders grossen Einfluss auf die erhaltenen Daten ausüben. Die Reproduzierbarkeit bei der Bestimmung der 'Streck-/Bruchdehnung' und 'Streck-/Bruchspannung' wird auf 5–10% geschätzt.
- [7] Kugeldruckhärte nach DIN 53456: Ein kugelförmiger Eindringkörper wird mit einer bestimmten Kraft in den Probekörper eingedrückt; gemessen wird die Eindringtiefe der Kugel. Daraus wird dann die Kugeldruckhärte als Quotient aus Prüfkraft und Oberfläche des Eindruckes errechnet. Prüfbedingungen [4]: je ein Probekörper (10 mm  $\times$  60 mm  $\times$  Originaldicke) von der Ober- und Unterseite der Platte, Prüfgerät: Kugeldruckhärteprüfgerät Zwick Typ 3106.
- [8] Torsionsschwingversuch nach DIN 53445 B: Ein Probekörper wird in einer Temperierkammer zu freier, gedämpfter Schwingung angeregt. Aus Schwingungsfrequenz und Amplitude werden Schubmodul und Dämpfung in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt. Das Maximum der Dämpfungskurve wird als Glasktemperatur  $T_g$  bezeichnet. Prüfbedingungen: je ein Prüfkörper (10 mm  $\times$  60 mm  $\times$  Originaldicke) von der Oberseite der Platte, Prüfgerät: Torsionsschwinggerät Myrenne ATM 03.
- [9] P. Flüeler, F. Rupp, EMPA Forschungsbericht 114/3, 'Zum Hagelschlagverhalten von Elementen der Gebäudehülle, insbesondere von solchen aus Kunststoffen', Dübendorf, 1987.