

**Kurzzeitversuche zur baupraktischen Einstufung
des Langzeitverhaltens
diffusionsoffener Polymerfolien
für Dachkonstruktionen**

Von der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Normen Langner

aus Wiesbaden

Erster Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.W. Liersch
Zweiter Gutachter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. R. Frey
Dritter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. H. Stopp

Tag der Disputation: 26. Januar 2005

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Baukonstruktion und Bauphysik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus. Sie wurde teilweise von der Firma Dörken GmbH & Co. KG, Herdecke gefördert, wofür ich mich bedanken möchte.

Für die Anregung und Betreuung dieser Arbeit bedanke ich mich ganz herzlich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.W. Liersch. Seine Diskussionsbereitschaft und wohlwollende Unterstützung, seine wertvollen Ratschläge und kritischen Anmerkungen haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Dank gebührt auch Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat., habil. R. Frey und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. H. Stopp für die Übernahme der Korreferate und der damit verbundenen Mühen, für die intensiven fachlichen Gespräche, kritischen Gedanken und die vielen Anregungen.

Für die vielfältigen Ratschläge, das Korrekturlesen sowie die Hilfe bei Bau des Freibewitterungsmodells sei Herrn Dipl.-Ing. (FH) St. Orgas ganz herzlich gedankt. Für das Erstellen der röntgendiffraktometrischen Aufnahmen möchte ich mich bei Herrn Dr. rer. nat. K. Hüniger bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	VI
Kurzfassung	VIII
Abstract	IX
1 Einleitung.....	1
1.1 Dachkonstruktionen.....	1
1.2 Unterspannbahnen in Dachkonstruktionen.....	4
1.2.1 Diffusionsoffene Polymerfolien als Unterspannbahnen.....	5
1.2.2 Dachkonstruktionen ohne chemischen Holzschutz.....	6
1.3 Dauerhaftigkeit und Alterung	8
1.4 Stand der Wissenschaft und Technik	9
1.4.1 Allgemeine Untersuchungen an Unterdeck- und Unterspannbahnen.....	10
1.4.2 Alterungsversuche an Unterspannbahnen.....	11
1.4.3 Alterungsuntersuchungen an Kunststoffen.....	13
1.4.4 Natürliche und künstliche Bewitterungsmodelle.....	14
1.5 Problematik und Zielsetzung der Forschungsarbeit.....	15
1.5.1 Natürliche Beanspruchung und künstliche Alterung	16
1.5.2 Problematik beschleunigter Alterungsversuche	17
1.5.3 Ziel der Forschungsarbeit	17
1.5.4 Vorgehensweise.....	19
1.5.5 Grenzen der Forschungsarbeit	21
2 Kunststoff-Folien.....	23
2.1 Grundbegriffe von Kunststoff-Folien.....	23
2.2 Polymere.....	24
2.2.1 Polymerisation.....	24
2.2.2 Polykondensation.....	25
2.2.3 Polyaddition.....	25
2.3 Eigenschaften von Polymeren.....	25
2.3.1 Thermoplastizität.....	25
2.3.2 Molmasse, Viskositätszahl, K-Wert	26
2.3.3 Feinstruktur der Makromoleküle	27
2.4 Folieneigenschaften.....	29

2.4.1	Dichte.....	29
2.4.2	Mechanische Eigenschaften.....	29
2.4.3	Thermische Eigenschaften.....	30
2.4.4	Durchlässigkeit.....	30
2.5	Kunststoffe für die Folienproduktion von Unterspannbahnen.....	33
2.5.1	Polyethylen.....	33
2.5.2	Polypropylen.....	35
2.6	Additive.....	36
2.6.1	Antioxidantien.....	36
2.6.2	Lichtschutzmittel.....	37
3	Alterung und Degration von Kunststoffen	38
3.1	Autooxidation.....	39
3.1.1	Thermische Alterung	43
3.1.1.1	Physikalische Wirkungen erhöhter Temperatur.....	43
3.1.1.2	Chemische Wirkungen erhöhter Temperatur.....	44
3.1.2	Photodegradation.....	45
3.1.2.1	Spektrale Energieverteilung und Bestrahlungsstärke der Sonne	45
3.1.2.2	Auswirkung der Sonnenstrahlung auf Kunststoffbauteile	48
3.2	Atmosphärische Einflüsse auf die Alterung	53
3.2.1	Wasser.....	53
3.2.1.1	Erscheinungsformen sowie Art und Umfang der Einwirkung	53
3.2.1.2	Transportvorgänge.....	54
3.2.1.3	Physikalische Wirkungen von Wasser	55
3.2.1.4	Chemische Wirkungen von Wasser.....	56
3.2.2	Sauerstoff.....	56
3.2.2.1	Physikalische Vorgänge.....	57
3.2.2.2	Chemische Vorgänge (Oxidation).....	57
3.3	Mechanische Beanspruchungen.....	57
4	Diffusionsoffene Unterspannbahnen für Dachkonstruktionen.....	61
4.1	Herstellung von hochdiffusionsoffenen Unterspannbahnen.....	61
4.1.1	Flash-Spun-Bond-Technologie	61
4.1.2	Bahnen mit mikroporösen Filmen	62

4.1.3	Bahnen mit monolithischen Filmen.....	64
4.1.4	Bahnen aus nicht gewebten Spinnvliesen mit einer mikroporösen Beschichtung	65
4.1.5	Laminat aus Spinnvlies/Melt-Blown-Vlies/ Spinnvlies.....	66
4.1.6	Bahnen aus mikroperforierten Filmen.....	66
4.2	Anforderungen an Unterspannbahnen.....	67
4.2.1	Widerstand gegen Wasserdurchgang	68
4.2.2	Wasserdampfdurchlässigkeit	68
4.2.3	Zugfestigkeit und Nagelausreißfestigkeit	69
4.2.4	Alterungsbeständigkeit.....	69
5	Vorbereitung der Alterungsprüfungen	71
5.1	Auswahl der Unterspannbahnen.....	71
5.2	Freibewitterung und Laborversuche	73
5.2.1	Aufbau von Prüfständen zur Freibewitterung	74
5.2.2	Zeitlich beschleunigte Laborversuche	76
5.3	Ermittlung realer Belastungsgrößen.....	78
5.3.1	Auswertung der Wetterdaten	78
5.3.2	Temperaturmessungen an Unterspannbahnen	81
5.4	Prüfprogramm	82
5.4.1	Alterung infolge natürlicher Belastungen	84
5.4.2	Alterung infolge künstlicher Wärmebelastung	85
5.4.3	Alterung infolge künstlicher UV-Belastung	86
5.4.4	Alterung infolge künstlicher Wärme- und UV-Belastung	87
5.5	Praxisrelevante Prüfungen an Unterspannbahnen.....	87
5.5.1	Bestimmung des Widerstandes gegen Wasserdurchgang	88
5.5.2	Bestimmung der wasserdampfdiffusions- äquivalenten Luftschichtdicke	89
5.5.3	Prüfung des Zug-Dehnungsverhaltens	91
5.5.4	Bestimmung der Luftdurchlässigkeit.....	93
5.5.5	Chemisch-analytische Untersuchungen	94
6	Versuchsergebnisse aus natürlicher und künstlicher Bewitterung	97
6.1	Bestimmung des Widerstandes gegen Wasserdurchgang	97
6.1.1	Widerstand gegen Wasserdurchgang neuer Unterspannbahnen.....	97
6.1.2	Widerstand gegen Wasserdurchgang natürlich gealterter Unterspannbahnen.....	99

6.1.3	Widerstand gegen Wasserdurchgang künstlich gealterter Unterspannbahnen.....	102
6.1.4	Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den Versuchen zum Widerstand gegen Wasserdurchgang nach natürlicher und künstlicher Alterung	106
6.2	Bestimmung der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke.....	107
6.2.1	Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke neuer Unterspannbahnen.....	107
6.2.2	Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke natürlich gealterter Unterspannbahnen	109
6.2.3	Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke künstlich gealterter Unterspannbahnen.....	112
6.2.4	Gegenüberstellung der Ergebnisse der wasserdampfäquivalenten Luftschichtdicke nach natürlicher und künstlicher Alterung	116
6.3	Prüfung des Zug-Dehnungsverhaltens	117
6.3.1	Zug-Dehnungsverhalten neuer Unterspannbahnen.....	117
6.3.2	Zug-Dehnungsverhalten natürlich gealterter Unterspannbahnen.....	122
6.3.3	Zug-Dehnungsverhalten künstlich gealterter Unterspannbahnen.....	125
6.3.4	Gegenüberstellung der Ergebnisse des Zug-Dehnungsverhaltens nach natürlicher und künstlicher Alterung	130
6.4	Bestimmung der Luftdurchlässigkeit.....	135
6.4.1	Luftdurchlässigkeit neuer Unterspannbahnen.....	136
6.4.2	Luftdurchlässigkeit natürlich gealterter Unterspannbahnen.....	137
6.4.3	Luftdurchlässigkeit künstlich gealterter Unterspannbahnen.....	140
6.4.4	Gegenüberstellung der Ergebnisse der Luftdurchlässigkeit nach natürlicher und künstlicher Alterung	143
6.5	Strukturanalytische Untersuchungen durch Röntgendiffraktometrie (XRD)	144
6.6	Vergleich der Ergebnisse aus unterschiedlichen Eigenschaftsprüfungen	151

7	Mathematische Auswertung der Versuchsergebnisse	158
7.1	Allgemeine Ansätze zur Beschreibung von Abbaumechanismen	158
7.2	Mathematische Bewertung der Folieneigenschaften nach dem Freibewitterungsversuch.....	160
7.2.1	Festlegung von Grenzwerten der Materialeigen- schaften von Unterspannbahnen und Definition von Alterungskennziffern.....	161
7.2.2	Alterungskennziffern d und Frühalterungsfaktoren a_F der natürlich gealterten Unterspannbahnen	166
7.2.3	Prognose des Langzeitverhaltens der natürlich gealterten Unterspannbahnen mit Hilfe des Alte- rungsfaktors a	167
7.3	Überprüfung der Korrelation der Ergebnisse aus künstli- cher Alterung und prognostiziertem Langzeitverhalten.....	172
7.3.1	Künstlich gealterte Unterspannbahnen durch Wärmelagerung	174
7.3.2	Künstlich gealterte Unterspannbahnen durch UV- Bestrahlung bei gleichzeitiger Wärmeeinwirkung	175
7.4	Bewertung der Ergebnisse	178
8	Zusammenfassung	182
8.1	Ausgangspunkt und Problemstellung	182
8.2	Ziel der Forschungsarbeit	183
8.3	Versuchsdurchführung	183
8.4	Ergebnisse	184
8.5	Folgerungen aus den Forschungsergebnissen.....	187
8.6	Ausblick	188
	Literatur- und Quellenverzeichnis	190
Anhang		
A	Übersicht am Markt erhältlicher Unterspann-/Unterdeck- bahnen (Stand Juni 2003)	200
B	Eigenschaftsmatrix am Markt erhältlicher Unterspann- /Unterdeckbahnen.....	207
C	Ergänzende Daten einzelner Untersuchungen.....	213
D	Alterungskennziffern d_t	239

Nomenklatur

Formelzeichen		Einheit	Begriff	Bemerkung
neu	alt			
a, a_n	a, a_n	$m^3/(mhdaPa^{2/3})$	Fugendurchlasskoeffizient	
a		-	Alterungsfaktor	
$a(l)$		-	Spektraler Absorptionsgrad	
a_F		-	Frühalterungsfaktor (nach 3 Monaten Freibewitterung)	
b		d^{-1}	Alterungsexponent	
d	s	m	Schichtdicke	
d		-	Alterungskennziffer	
d_h		-	Alterungskennziffer der Wasserdruckhöhe h	
d_{sd}		-	Alterungskennziffer der Wasser- dampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke s_d	
d_σ		-	Alterungskennziffer der Folienzug- festigkeit s	
d_{vL}		-	Alterungskennziffer des Luftdurchgangs v_L	
d_t		-	Alterungskennziffer zum Zeitpunkt t	
E		$W/(m^2nm)$	Strahlungsenergie	
E_0		kW/m^2	Solarkonstante	$E_0 = 1,35 kW/m^2$
E_T		kW/m^2	Gesamtbestrahlungsstärke der Globalstrahlung	$E_T = 1,12 kW/m^2$
e	e	1	Emissionsgrad, Emissivität	$E = e \cdot E_s$
H		MJ/m^2	Strahlungsbeanspruchung	
h		cm, m	Wasserdruckhöhe	
I		cps	Röntgenintensität	
L	L	$W/(m^2K)$	Wärmedurchlasskoeffizient	
l	l	$W/(mK)$	Wärmeleitfähigkeit	
l	l	nm	Wellenlänge der optischen Strahlung	
R	$1/L$	m^2KW	Wärmedurchlasswiderstand	$R = d / I$
R_s	$1/a$	m^2KW	Wärmeübergangswiderstand	$R_s = 1/h$
R_T	$1/k$	m^2KW	Wärmedurchgangswiderstand	
r	r	1	Strahlungsreflexionsanteil	

Formelzeichen		Einheit	Begriff	Bemerkung
neu	alt			
T	T	K	thermodynamische Temperatur	$T = q + 273$
q	J	°C	Celsius-Temperatur	$q = T - 273$
q		°	Braggscher Beugungswinkel	
Dq, DT	DJ, DT	K	Temperaturdifferenz	
t	t	1	Strahlungsdurchlassanteil	
U	k	W/(m ² K)	Wärmedurchgangskoeffizient	$U = 1/R_T$
	Dp	Pa	Wasserdampfteildruckdifferenz	
μ	μ	1	Diffusionswiderstandszahl	
P		-	Polymerisationsgrad	
	p	Pa	Druck, Wasserdampfteildruck	
p_e	p_a	Pa	Wasserdampfteildruck der Außenluft	
p_d	p_d	Pa	Partialdruck des Wasserdampfes, Wasserdampfteildruck	
p_i	p_i	Pa	Wasserdampfteildruck der Innenraumluft	
	p_s	Pa	Wasserdampfsättigungsdruck	
f	j	%	relative Luftfeuchtigkeit	
r		g/cm ³ , kg/m ³	Foliendichte	
s	s	N/50 mm	Zugspannung der Unterspannbahnen	
s_d	s_d	m	Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke	$s_d = \mu \cdot d^{1)}$
	V_l	m/s	Belüftungsstromgeschwindigkeit	
	v_L	m ³ /(m ² h)	Luftvolumenstrom	
WDD		g/(m ² d)	Wasserdampfdurchlässigkeit	

- 1) für einen hohen s_d -Wert gilt: hoher Diffusionsdurchlässigkeitswiderstand, niedriger Diffusionsdurchlässigkeitswert

Kurzfassung

Dächer haben sich in den vergangenen 30 Jahren von einfachen Schutzschilden zu komplexen Bauteilen entwickelt. Die Einhaltung gewisser Konstruktionsregeln ist zur Vermeidung von Bauschäden daher unabdingbar. Dies gilt insbesondere für Dächer mit Vollsparrendämmung, die ohne chemischen Holzschutz ausgeführt werden sollen.

Die in diesen Konstruktionen zum Einsatz kommenden diffusionsoffenen Unterspannbahnen müssen einerseits wasserdicht sein, andererseits aber auch ausreichend wasserdampfdurchlässig (diffusionsoffen) sein. Da es bisher in Deutschland kein Verfahren gibt, mit dem das Langzeitverhalten insbesondere dieser speziellen Materialeigenschaft eingestuft werden kann, wurde in der vorliegenden Arbeit eine umfangreiche natürliche und künstliche Alterung ausgewählter Unterspannbahnen durchgeführt.

Dabei wurden nach den Alterungsversuchen die wesentlichsten baupraktischen Eigenschaften der Folien durch geeignete Prüfungen bestimmt. Mit diesen konnte für die natürliche Alterung eine Langzeitfunktion gefunden werden, welche eine Abschätzung des Alterungsverhaltens der Unterspannbahnen bereits auf Basis einer 3-monatigen Freibewitterung ermöglicht.

Eine künstlich beschleunigte Alterung sollte durch Wärme- und/oder UV-Lagerung erreicht werden. Um den durch die jeweilige Belastung erreichten Alterungszeitraum bestimmen zu können, wurden die Ergebnisse der Prüfungen mit denen der Freibewitterung verglichen. Dabei stellten sich bei gleicher künstlicher Belastung der Unterspannbahnen sehr unterschiedliche Alterungserscheinungen ein. Eine Korrelation mit der natürlichen Alterung konnte durch die Laborversuche unter den angenommenen Randbedingungen nicht erzielt werden.

Um für eine bestimmte künstliche Belastung bzw. Belastungskombination den Unterspannbahnen einen definierten Alterungszeitraum, welcher aus der in dieser Arbeit entwickelten Langzeitfunktion entnommen werden kann, zuordnen zu können, müssen in künftigen Forschungsvorhaben die künstlichen Alterungsversuche modifiziert und neben Wärme- und UV-Belastungen weitere Einwirkungen (z.B. Feuchtigkeit und Frost-Tau-Wechsel) berücksichtigt werden.

Abstract

In the last 30 years roofs evolved from simple shields to very complex constructional elements, which have to obey certain construction rules to avoid building deficiencies. That applies especially for warm pitched fully insulated roofs accomplished without a chemical wood protection.

The water vapour open underlay systems used for these constructions have to be water proof on the one hand but on the other hand they have to have an adequate water vapour openness (diffusion openness). Till now, Germany has no method which could revise the longevity of these special material properties. Therefore, the present research work carries out extensive natural und artificial ageing tests of selected underlay systems.

After the ageing tests the relevant building properties of the membranes were evaluated with appropriate examinations. With this, a long-time function for the evaluation of the natural ageing process was found on the basis of a three-month outdoor exposure.

The artificial ageing should be accomplished with thermal and/or UV-loads in the laboratory. To determine the obsolescence rate of the used artificial load, the results were compared with the natural ageing tests. Thereby, the appearances of one and the same artificial load were very different for the rooflining membranes. Under the assumed boundary conditions a correlation between the results of the natural and artificial ageing tests were not possible.

To allocate a definite obsolescence rate (which can be determined with the developed long-time function) for an assigned artificial load or combination of loads, future research works have to modify the artificial ageing tests. Beside the thermal and UV-loads the effects of further loads (e.g. moisture and frost/dew-changes) have to be considered.

1 Einleitung

Werkstoffe im Bauwesen müssen dauerhaft sicher sein und eine hohe Langlebigkeit aufweisen. Für traditionelle Baumaterialien, wie zum Beispiel Mauersteine, Beton, Stahl oder Holz, kann die geforderte Langlebigkeit vor allem durch deren über mehrere Jahrzehnte dokumentierten erfolgreichen baupraktischen Einsatz nachgewiesen werden.

Anders verhält es sich dagegen bei neuen und in der Praxis bezüglich der Dauerhaftigkeit noch nicht ausreichend erforschten Produkten. Hier liegen Erfahrungsdaten teilweise noch nicht über die volle Nutzungsdauer vor, so dass Planer, Bauherrn und Verarbeiter auf Produktbeschreibungen angewiesen sind.

Vor allem bei der Anwendung von Kunststoff-Produkten sind im Bauwesen Fragen der Dauerhaftigkeit und des Langzeitverhaltens von zentraler Bedeutung, da die Kunststoffeigenschaften in einem qualitativ anderem Maße zeitabhängigen Veränderungen (vornehmlich hervorgerufen durch witterungsbedingte Beanspruchungen) unterliegen, als die klassischen Baustoffe.

Betrachtet man in diesem Zusammenhang geneigte Dachkonstruktionen, so trifft dies insbesondere auf die im Dachaufbau zum Einsatz kommenden Unterspannbahnen zu. Diese polyolefinen Kunststoff-Folien sind aufgrund ihrer exponierten Lage als erste Schicht nach der Dachdeckung während der Bauphase, also noch bevor die endgültige Dachdeckung fertiggestellt ist, manchmal für mehrere Wochen oder Monate als so genannte Noteindeckung Wind, Regen, Schnee oder Hagel ausgesetzt.

Aber auch nach der Fertigstellung entstehen für die Unterspannbahnen unter der Dachdeckung erhebliche Belastungen aus extrem hohen Temperaturen, Frost-Tau-Wechseln und Feuchteeinwirkungen.

1.1 Dachkonstruktionen

Ein Dach soll das Gebäude und seine Bewohner vor den vielfältigen Umwelteinflüssen und Belastungen schützen. Aus diesem Grund erfordern die am Dach wirkenden Beanspruchungen eine Reihe von baukonstruktiven Maßnahmen, um eine schadensfreie Konstruktion zu erhalten. Die Anforderungen gliedern sich in:

1 Einleitung

- Wärmeschutz
- Feuchteschutz
- Schallschutz
- Brandschutz
- Tragfähigkeit
- Dauerhaftigkeit

Waren Dächer früher lediglich Schutzschilde gegen Regen, Schnee, Hagel, Wind und direkte Sonneneinstrahlung, so werden heute vom Dach noch zusätzliche Aufgaben, wie

- Regulierung eines behaglichen Raumklimas
- Reduzierung des Heizwärmebedarfs

verlangt.

Dies hängt vor allem mit dem in den letzten Jahren stark zunehmenden Ausbau von Bodenräumen zu Wohnräumen zusammen, wodurch auch eine stärkere Beachtung der bauphysikalischen Anforderungen unter den Gesichtspunkten des Wärme- und Feuchteschutzes erforderlich wird. Waren bei der Nutzung der Dachböden als Kalträume die Ansprüche eher gering, so muss ein bewohnter Dachraum bestimmten wärme- und feuchteschutztechnischen Bedingungen genügen.

So bestehen die Dachdeckungen geneigter Dächer in der Regel aus kleinformatischen, sich gegenseitig schuppenförmig überdeckenden Dachwerkstoffen. Diese Dachdeckungen können jedoch nicht als wasserdicht sondern nur als „regensicher“ bezeichnet werden. Bei entsprechenden Wetterbedingungen, wie Schlagregen oder Flugschnee, kann Feuchtigkeit die Dachdeckung durchdringen und in die darunter liegende Dachkonstruktion gelangen. Aus diesem Grund muss, zum Schutz der tragenden Konstruktion, der Wärmedämmung und der darunter liegenden Wohnräume vor Feuchtigkeit von außen, eine zusätzliche Maßnahme unterhalb der Dachdeckung angebracht werden. Die Ausbildung dieser zusätzlichen Maßnahme reicht von einer einfachen Unterspannung bis zum wasserdichten Unterdach.

Die konstruktiven Ausführungen sind im „Merkblatt für Unterdächer, Unterdeckungen und Unterspannungen“ des ZVDH (Zentralverband des Deutschen Dachdeckerhandwerks – Fachverband Dach-, Wand- und Abdichtungstechnik – e.V.) vom September 1997 [49] beschrieben. Sie unterscheiden sich durch die Art des verwendeten Bahnenmaterials, der Verbindung der Bahnen untereinander und der Befestigung der Bahnen auf der Dachkonstruktion. Die Anforderungen an die konstruktive

Ausführung der zusätzlichen Maßnahme hängen z.B. von der Dachkonstruktion, der Dachneigung oder von den klimatischen Verhältnissen ab.

Betrachtet man die zur Zeit im Bereich der Bautechnik zum Einsatz kommenden Dachsysteme, so gibt es die unterschiedlichsten, mehrschichtigen Dachaufbauten, die in belüftete und nicht belüftete Konstruktionen eingeteilt werden können (auch als Kalt- bzw. Warmdach bezeichnet).

Aufgrund ihrer traditionellen Herkunft wurde in der Vergangenheit meist den belüfteten Systemen der Vorzug gegeben, die, bedingt durch ihre über Jahrzehnte bewährte Konstruktion, als Stand der Technik festgeschrieben waren. Das in Abb. 1.1-1 (links) dargestellte Konstruktionsprinzip des geneigten, belüfteten Daches war zunächst für eine Nutzung der Dachböden als Kalträume, zum Beispiel als Materiallager, konzipiert und zum Teil auch ohne Dämmung ausgeführt. Durch die harte Bedachung erwies sich die Konstruktion den geringen Ansprüchen eines Dachbodens (Schutz vor Schlagregen, Flugschnee, Wind etc.) als ausreichend geeignet.

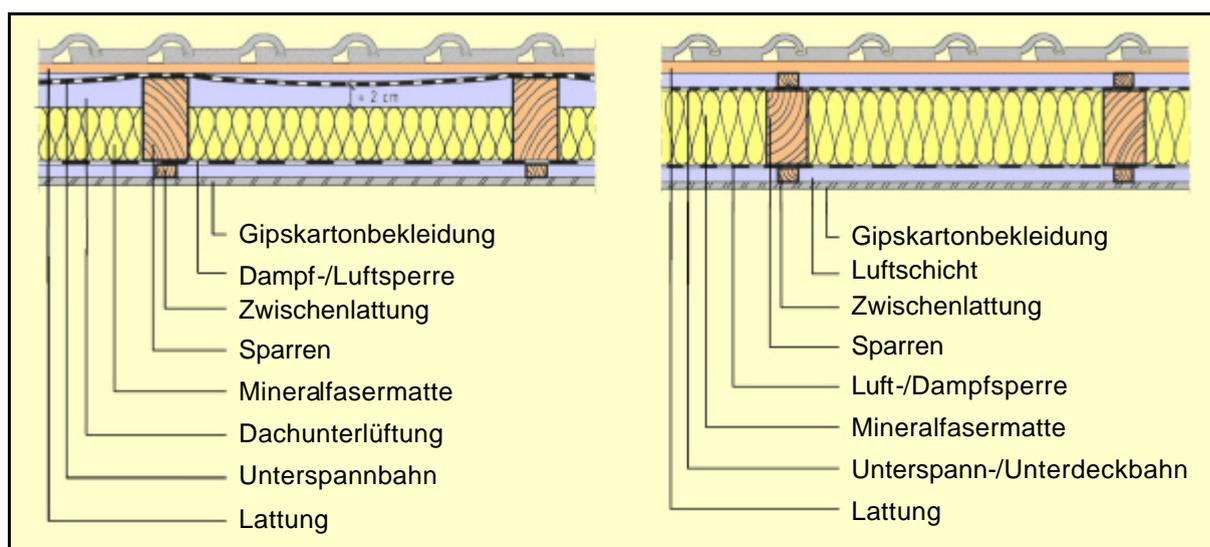


Abb. 1.1-1

Bei wärmedämmten Dächern mit Zwischensparrendämmung (links) wurde infolge der gestiegenen Anforderungen an den Wärmeschutz eine Wärmedämmung über die gesamte Sparrenhöhe erforderlich (so genannte „Vollsparrendämmung“, rechts) [48].

Durch die stetige Verteuerung von Wohnraum wurden in der Folge zunehmend Dachgeschosse zu Wohnzwecken ausgebaut. Die erforderliche Dämmung konnte dabei entweder unter oder zwischen die Sparren angeordnet werden, wobei aus Platzgründen der in Abbildung 1.1-1 (links) dargestellte Aufbau vorgezogen wurde.

Es entstand eine Dachkonstruktion mit zwei Lüftungsebenen. Dabei übernimmt die obere Ebene zwischen Dachdeckung und Unterspannbahn die Aufgabe eventuell durch die Deckung eingedrungene Außenfeuchte abzuleiten. Die Lüftungsebene unterhalb der Dachdeckung wird in der Regel durch eine Konterlattung mit einem Mindestquerschnitt von 24/48 mm geschaffen. Die untere Lüftungsebene zwischen Unterspannbahn und Wärmedämmung stellt dagegen die Abfuhr von in den Dachaufbau eingedrungene Raumfeuchte und Holzeinbaufeuchte sicher.

Wird die beschriebene Konstruktion unter Einhaltung bestimmter im „Merkblatt Wärmeschutz bei Dächern“ des ZVDH [50] festgelegter Lüftungsquerschnitte für Dach-, Trauf- und Firstbereich ausgeführt, so ist nach DIN 4108, Teil 2 [11] bei Steildächern über 10° Neigung kein rechnerischer Nachweis des Tauwasserausfalls infolge Dampfdiffusion erforderlich. Bedingt durch diese Aussagen der Norm galten zu diesem Zeitpunkt belüftete Konstruktionen sicherer als die nicht belüfteten, da sie unter Zugrundelegung der dargestellten Randbedingungen ohne Nachweis und unabhängig von der Art und Ausführung der Dampfsperre und den Eigenschaften der Unterspannbahn ausgeführt werden konnten.

Seit der Einführung der Wärmeschutzverordnung 1995 [39] steht die Belüftungsebene zwischen Wärmedämmung und Unterspannbahn zur Disposition. Aufgrund der damals begonnenen und in der seit Februar 2002 geltenden Energieeinsparverordnung fortgeführten Begrenzung der Wärmeverluste, wurde es wegen der gestiegenen Anforderungen an den Wärmeschutz erforderlich, die gesamte Sparrenhöhe mit Dämmstoff auszufüllen (siehe Abbildung 1.1 -1 (rechts)).

Aus dieser so genannten Vollsparrendämmung in geneigten Dächern ohne Hinterlüftung entstand der Bedarf an wasserdampfdurchlässigen, „diffusionsoffenen“ Unterspannbahnen. Diese müssen zum einen wasserdicht sein, gleichzeitig aber eine ausreichend hohe Diffusionsoffenheit besitzen, um die von der Rauminnenseite in die Konstruktion eindringenden Feuchtigkeitsströme und die Feuchtigkeit der eingebauten Hölzer über die unter die Dachdeckung befindliche Lüftungsebene abzuführen. Mittlerweile sind seit einigen Jahren auch nicht belüftete, wärmegeämmte Dächer in Verbindung mit einer diffusionsoffenen Schicht über der Wärmedämmung als „Stand der Technik“ eingeführt.

1.2 Unterspannbahnen in Dachkonstruktionen

Wie bereits aus Abbildung 1.1-1 hervorgeht, werden in geneigten Dächern die Unterspannbahnen oberhalb der Wärmedämmung oder auf einem eventuell vorhan-

denen Unterdach angeordnet. Bevor die abschließende Dachdeckung fertiggestellt ist, erwartet der Verarbeiter von der Unterspannbahn in ihrer Funktion als Noteindeckung einen ausreichenden Widerstand gegen mechanische Beanspruchungen und gegen eine Wasserdurchdringung, um das Gebäude vor Feuchteschäden zu schützen. Hauptaufgabe von Unterspannbahnen ist jedoch, Wasser, welches in flüssiger Form von außen durch die Dachdeckung eindringt, abzuführen und Feuchtigkeit, die in dampfförmigem Zustand von der Raumseite in die Konstruktion gelangt, hindurch zu lassen.

Nachdem zu Beginn der Entwicklung dieser speziellen Folien für Dachkonstruktionen mit Vollsparrendämmung die niedrigsten Werte der wasserdampfäquivalenten Luftschichtdicke (s_d -Wert) von Unterspannbahnen bei 2,0 m bis 0,3 m lagen, ist der heutige Stand der Technik in der Lage, Unterspannbahnen mit s_d -Werten von 0,02 m und kleiner anzubieten. Diese werden auch als so genannte „extrem diffusionsoffene Folien“ bezeichnet.

1.2.1 Diffusionsoffene Polymerfolien als Unterspannbahnen

Diffusionsoffenes Bauen hat im vergangenen Jahrzehnt immer mehr an Bedeutung gewonnen. Das in den Abschnitten 1.1 und 1.2 beschriebene Prinzip der diffusionsoffenen Abdeckung der Wärmedämmung wird vermehrt auch auf Dächer des Industrie- und Gewerbebaus angewendet. Die Neufassungen der Dachdeckerfachregeln gehen einheitlich von dem Konstruktionsprinzip aus, dass bei allen wärmegeämmten Dächern mit Dachdeckungen zusätzliche Maßnahmen – wie z.B. Unterspannbahnen oder Unterdachplatten – vorzusehen sind. Damit soll sichergestellt werden, dass z.B. rückstauendes Schmelzwasser, sekundäres Tauwasser, Flugschnee oder Schlagregen ohne eine Durchfeuchtung der Dämmschicht abgeführt werden kann.

Zur Sicherstellung einer hohen Wasserdampfdiffusionsoffenheit sind die verwendeten Materialien entweder fein gesponnene Gewebe oder dünne, perforierte Folien. Diese haben die Eigenschaft, Wasser in dampfförmigem Zustand hindurch zu lassen, Wasser in flüssiger Form jedoch nicht.

Bei den für die Herstellung der Folien verwendeten Kunststoffen handelt es sich üblicherweise um Polyolefine, wie zum Beispiel Polypropylen (PP) oder Polyethylen (PE). Diese werden ohne Bindemittel oder Füllstoffe nur durch Hitze und Druck zu einem hochfesten Spinnvlies verarbeitet, welches einerseits größerer Wasserbelastung standhält, andererseits aber extrem wasserdampfdiffusionsoffen ist (Abbildung 1.2.1-1).

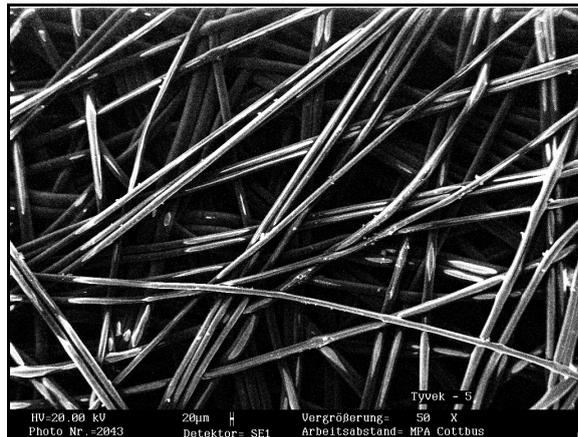
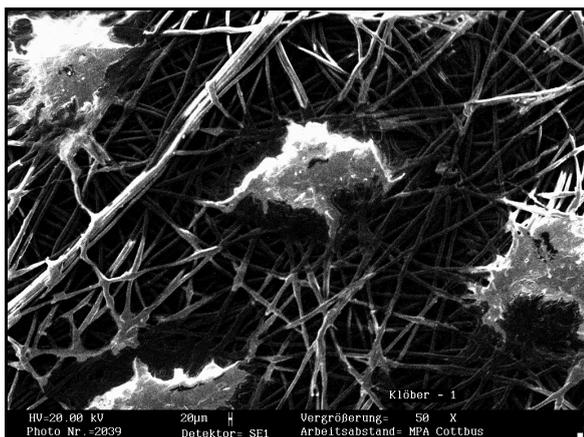


Abb. 1.2.1-1

Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme zweier unterschiedlicher hochdiffusionsoffener Unterspannbahnen

1.2.2 Dachkonstruktionen ohne chemischen Holzschutz

Hauptsächlich im Holzbau nimmt die diffusionsoffene Bauweise hinsichtlich der Vermeidung eines chemischen Holzschutzes eine außerordentlich wichtige Stellung ein. War beim Holzschutz der Sparren aufgrund der Anforderungen der DIN 68 800, Teil 3 die Dauerhaftigkeit durch einen vorbeugenden chemischen Holzschutz sicher zu stellen, darf nach neueren Forschungsergebnissen von diesem abgesehen werden [98], [106].

So beschreibt die seit Mai 1996 geltende Holzschutz-Norm DIN 68 800, Teil 2: „Holzschutz: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau“ [35] Dach- und Wandkonstruktionen, die der Gefährdungsklasse 0 (GK 0) zugeordnet werden. Die Einstufung einer Konstruktion in diese Gefährdungsklasse bedeutet, dass keine chemischen Holzschutzmaßnahmen erforderlich sind. Für geneigte, nicht belüftete Dachkonstruktionen ist in diesem Fall eine obere Abdeckung (z.B. Unterspannbahn, Schalung mit Vordeckung) mit einer diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke von $s_d \leq 0,20$ m gefordert (Abb. 1.2.2-1).

Nach DIN 68 800-2 kann eine Konstruktion in die Gefährdungsklasse GK 0 eingestuft werden, wenn

- die gefährdeten Holzbauteile insektensicher (gegen Hausbockbefall) abgedeckt und ummantelt sind und
- eine höhere Holzfeuchte (z.B. infolge Einbaufeuchte) als 20 Masse-% nicht länger als 6 Monate vorhanden ist, da erst nach Ablauf dieser Zeit ein schädigender Pilzbefall zu erwarten ist.

Dies ist erfüllt, wenn der Sparren mit Vollsparrendämmung mit Mineralfaserdämmstoffen voll umhüllt ist und die obere Abdeckung mit einer diffusionsoffenen Unterspannbahn $s_{de} \leq 0,20$ m ohne eigene Unterlüftung abgedeckt ist und die raumzugewandte Dampf-/Luftsperrschicht nicht mehr als $s_{di} = 2,0$ m aufweist. Auf diese Dampfsperre (jedoch nicht die Luftsperrschicht) darf verzichtet werden, wenn $s_{de} \leq 0,02$ m beträgt.

Der prinzipielle Aufbau einer Dach- und Deckenkonstruktion nach Abbildung 1.2.2-1 darf somit ohne chemischen Holzschutz ausgeführt werden.

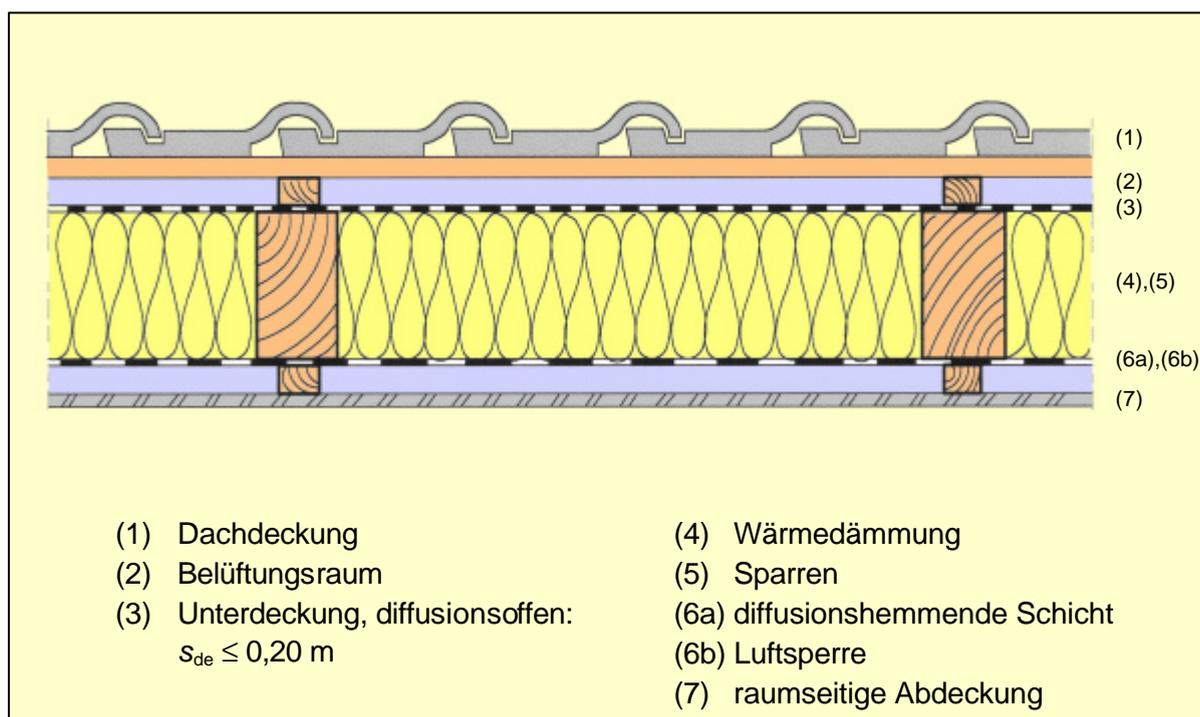


Abb. 1.2.2-1

Prinzipielle Schichtenfolge wärmedämmter Dachkonstruktionen mit Anordnung der Wärmedämmung zwischen den Sparren; es ist kein vorbeugender chemischer Holzschutz erforderlich [85].

Der von der Norm geforderte niedrige s_d -Wert wird durch den Einsatz extrem diffusionsoffener Kunststoff-Folien als Unterdeck- und Unterspannbahn für Dächer gewährleistet. Dadurch kann eine unzulässige Feuchteerhöhung vermieden sowie die Austrocknungsfähigkeit der Konstruktion erhöht werden [101]. Die Abbildung 1.2.2-2 zeigt, welchen Einfluss der s_d -Wert der verwendeten Unterspannbahn auf das Austrocknungsverhalten der Holzkonstruktion hat.

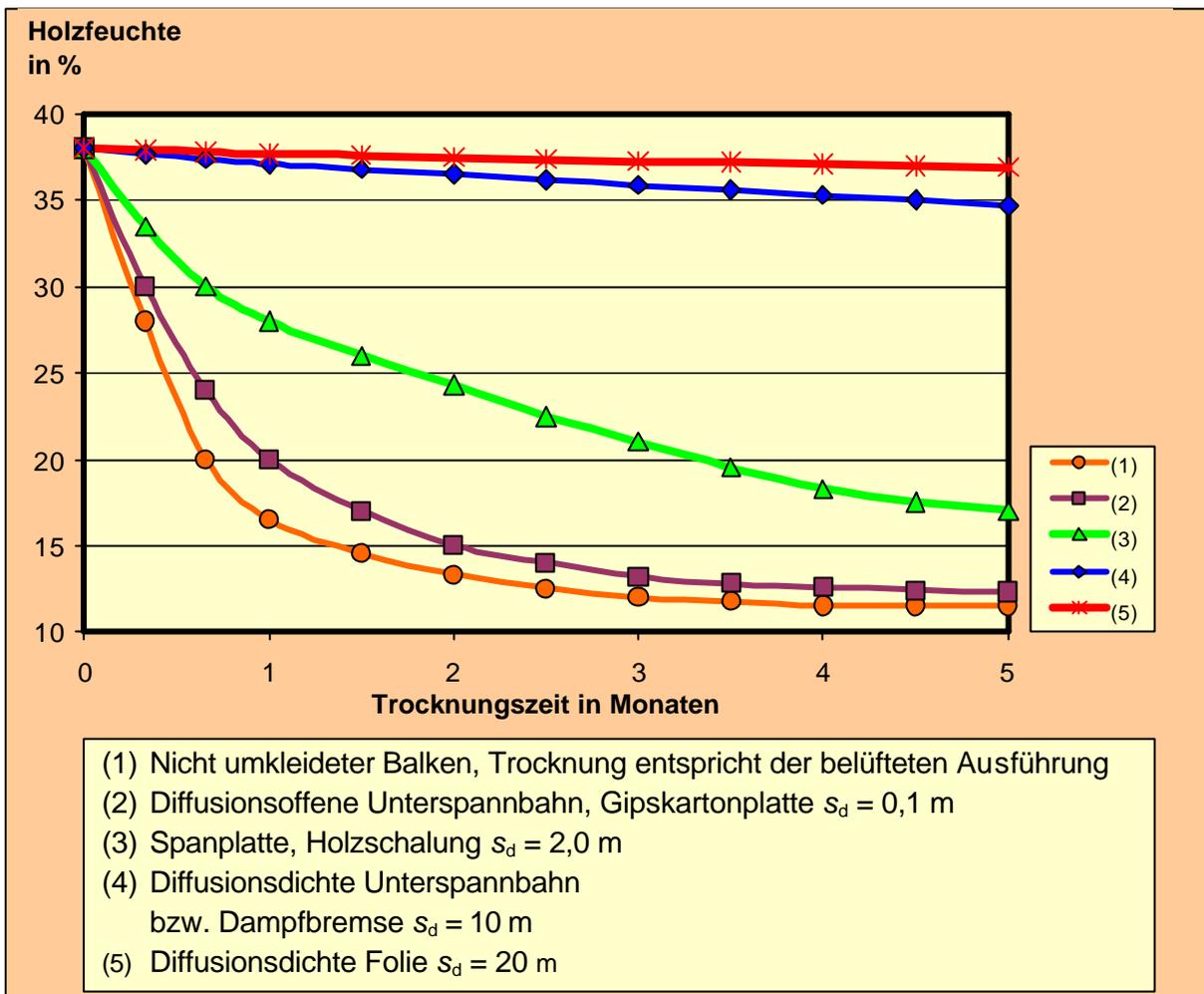


Abb. 1.2.2-2

Trocknungsgeschwindigkeiten von feuchten, allseitig umkleideten Holzbalken: Bauteile ohne chemischen Holzschutz [101].

1.3 Dauerhaftigkeit und Alterung

Unter Dauerhaftigkeit versteht man die Fähigkeit eines Materials, seine ihm ursprünglichen Eigenschaften und Funktionen für die beabsichtigte Lebensdauer beizubehalten. Für ein Baumaterial, welches eine Komponente eines Bauwerks darstellt, ist der Begriff Lebensdauer davon abhängig, welchen Zweck das Gebäude erfüllen soll. Im Idealfall ist die Dauerhaftigkeit von Bauwerkskomponenten gleich der vorgesehenen Nutzungsdauer des Bauwerks.

Allerdings ist die Dauerhaftigkeit keine aufgeprägte Materialeigenschaft. Sie hängt insbesondere davon ab, wie und wo ein Material genutzt wird und wie schnell es „altert“.

In Bezug auf Kunststoff-Folien fasst der Begriff „Alterung“ dabei sämtliche chemischen und physikalischen Vorgänge zusammen, die zu irreversiblen Veränderungen des Werkstoffes führen. Solche Veränderungen können im Laufe der Zeit infolge äußerer Einwirkungsgrößen wie Temperatur, Feuchtigkeit, Gase (Sauerstoff, Kohlendioxid, Ozon), Sonnenstrahlung sowie mechanischer Beanspruchungen eintreten.

Materialien, die unter bestimmten Umgebungsbedingungen sehr dauerhaft sind, können in einer anderen Umgebung (z.B. veränderte Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse, UV-Strahlung oder die Anwesenheit anderer Materialien) ein völlig anderes Alterungsverhalten aufweisen. Daher muss die Dauerhaftigkeit von Baumaterialien auf den jeweiligen Einsatzbereich bezogen werden.

So sind diffusionsoffene Unterspannbahnen in Dachkonstruktionen – wie viele andere Baustoffe auch – während ihrer Lebensdauer meist zwei verschiedenen Umgebungsbedingungen ausgesetzt: zunächst während der Bauphase und dann im eingebauten Zustand. In der kurzen Phase während des Bauens, ist die Folie den vielfältigen Beanspruchungen der Umwelt ausgesetzt, was trotz der kurzen Dauer durchaus einen schädlichen Einfluss auf das Langzeitverhalten der Bahn bzw. deren Komponenten haben kann. Im eingebauten Zustand unterliegt sie hauptsächlich Temperatur- und Feuchtigkeitsbelastungen.

1.4 Stand der Wissenschaft und Technik

Der zur Gewinnung zusätzlichen Wohnraums praktizierte Dachausbau seit Mitte der 80er Jahre erforderte die Beachtung einiger neuer bauphysikalischer Gegebenheiten und Belastungen auf geneigte Dachkonstruktionen. So gab es von Beginn an zahlreiche Veröffentlichungen, die sich insbesondere mit dem korrekten Schichtaufbau, der richtigen Lüftung und den dazu erforderlichen Materialdicken und -eigenschaften befassen.

Stellvertretend für die vielen Fachbücher und -artikel, die sich zum Teil mit sehr speziellen Detailfragen auseinandersetzen, sollen hier SCHULZE [102] und LIERSCH [90], [91] genannt werden, die in ihren Büchern sowohl anwendungstechnische als auch bauphysikalische und statische Grundlagen behandeln. Eine Zusammenstellung von älteren Veröffentlichungen zur Thematik Dampfdiffusion und Tauwasserbildung in Dächern findet sich in [46], [98] und [99], während in [54] und [109] Beiträge zu Luftschichten und Belüftungen in Dachkonstruktionen aufgeführt sind.

Neuere Erkenntnisse zur konstruktiven Ausbildung von Bauteilen und Gebäuden unter besonderer Beachtung bauphysikalischer Kriterien bei Steildächern beschreibt KÜNZEL in verschiedenen Arbeiten [67], [76], [77] und [78].

Die folgende Erfassung des Standes der Wissenschaft und Technik betrachtet vor allem die wenigen speziellen Forschungsvorhaben und Untersuchungen an Unterspannbahnen. Dabei werden die Bereiche „Allgemeine Untersuchungen an Unterdeck- und Unterspannbahnen“ sowie die für diese Arbeit besonders relevante Thematik der „Alterungsversuche an Unterspannbahnen“ getrennt aufgeführt.

Weiterhin erfolgt in einem dritten Abschnitt die Zusammenfassung der Erkenntnisse bei „Alterungsuntersuchungen an Kunststoffen“. Wissenschaftliche Erfahrungen und Erkenntnisse mit „Natürlichen und künstlichen Bewitterungsmodellen“ bilden den Abschluss der Literaturrecherche.

1.4.1 Allgemeine Untersuchungen an Unterdeck- und Unterspannbahnen

Der Einführung einer Vollsparrendämmung in Verbindung mit einer diffusionsoffenen Unterspannung folgten zahlreiche Untersuchungen zur Beurteilung der Feuchteentwicklung in diesen Dachkonstruktionen. Wurden zu Beginn noch die belüfteten und die nicht belüfteten Konstruktionen mit ihren Eigenschaften gegenübergestellt [66], so befassten sich spätere Veröffentlichungen nur noch mit Vollsparrendämmungen und den für eine feuchte-technisch sichere Konstruktion erforderlichen Folien (Dampfbremse und Unterspannbahn oder nur (hoch-) diffusionsoffene Unterspannbahn) [86], [87], [93], [100], [107].

Die Bestimmung der Feuchteentwicklung in nicht belüfteten Dachsystemen mit Vollsparrendämmung in Verbindung mit diffusionsoffenen Unterspannbahnen wurde entweder messtechnisch mit Hilfe von Dachmodellen vorgenommen [72], [80], [81], [92], [105] oder mittels Computersimulation berechnet [63], [67], [81].

Die oben genannten Veröffentlichungen kommen durch ihre Untersuchungen zu dem Schluss, dass diffusionsoffene Dächer von wenigen Ausnahmen abgesehen, feuchte-technisch unbedenklich sind. Mit der Verwendung von hochdiffusionsoffenen Unterspannbahnen kann sogar eine hohe Einbaufeuchte der Materialien beschleunigt reduziert werden [52]. Um die Feuchtesicherheit noch zu verbessern, wird in [77] vorgeschlagen, spezielle Dampfbremsen (z.B. feuchteadaptive oder wasserdurchlässige Dampfbremsen) einzusetzen, um eine sommerliche Austrocknung zu fördern.

Auf dieser Basis wurden diffusionsoffene Dächer auch hinsichtlich ihrer Eignung bei der Instandsetzung und Sanierung von Dächern untersucht. Schwerpunkt war auch hier das Austrocknungsverhalten der Konstruktion (insbesondere einer durchfeuchteten Wärmedämmung) [43], [67], [82].

Wie bereits in Abschnitt 1.2.2 ausgeführt, ermöglichten die genannten Untersuchungen, dass Dächer mit Vollsparrendämmung in Verbindung mit einer hochdiffusionsoffenen Unterspannbahn ohne chemischen Holzschutz ausgeführt werden konnten, sofern ihre Zuordnung in die Gefährdungsklasse 0 nach DIN 68 800, Teil 2 möglich war [35], [36].

Im Zusammenhang mit den in DIN 68 800, Teil 2 genannten Dachkonstruktionen ohne chemischen Holzschutz, muss die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke der Unterspannbahn $s_d \leq 0,20$ m betragen. Jedoch konnte in mehreren Forschungsvorhaben gezeigt werden, dass das gravimetrische Verfahren nach DIN 52 615 und auch die neue internationale Norm nach DIN EN ISO 12 572 [20] prinzipielle Mängel bei der Bestimmung des s_d -Wertes von diffusionsäquivalenten Luftschichtdicken unter 0,2 m aufweisen [75], [83], [88], [89]. Insbesondere die Untersuchungen nach [75] und [89] verbesserten die Genauigkeit zur Bestimmung der diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke von Unterspannbahnen mit s_d -Werten kleiner als 0,1 m (siehe auch Abschnitt 4.2.3).

1.4.2 Alterungsversuche an Unterspannbahnen

Obwohl das diffusionsoffene Bauen mit Unterspannbahnen schon seit einigen Jahren praktiziert wird, liegen nur wenige veröffentlichte Untersuchungen zu diesen Folien und deren Langzeitverhalten vor. Dies wird auch daran deutlich, dass eine Produktnorm, welche die Eigenschaften von Unterdeck- und Unterspannbahnen festlegt, erst seit Juli 2000 im Entwurf vorliegt: prEN 13 859-1, Ausgabe: 2000-09: „Abdichtungsbahnen – Definitionen und Eigenschaften von Unterdeck- und Unterspannbahnen – Teil 1: Unterdeck- und Unterspannbahnen für Dachdeckungen“ [25] definiert Eigenschaften und anwendungsbezogene Merkmale von Dachabdichtungen und beschreibt die dafür durchzuführenden Prüfungen. Doch auch die im nationalen Anhang der Norm aufgeführten Literaturhinweise verweisen nur auf weitere Normen; Fachbücher bzw. -artikel sind nicht benannt.

Allerdings hat das Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. in München (FIW) in einem Forschungsvorhaben verschiedene Unterspannbahnen Prüfungen unterzogen, die an den Norm-Entwurf der Produktnorm prEN 13 859-1 angelehnt waren [40],

[47]. Dabei wurden für einige in dem Norm-Entwurf beschriebene Prüfungen Versuche an fabrikneuen und an gealterten Proben vorgenommen.

In Abweichung vom Normentwurf, der eine künstliche Alterung in einem UV-Bestrahlungsgerät mit anschließender Lagerung in einem Wärmeofen verlangt, wurde die Alterung der Materialien unter natürlichen, sommerlichen Wetterbedingungen einer 6-wöchigen Freibewitterung durchgeführt. Danach wurde die von der Norm verlangte Bestimmung des Widerstandes gegen Wasserdurchgang und des Zug-Dehnungsverhaltens überprüft.

Es zeigte sich, dass die im Freilandversuch gealterten Produkte nicht unter jeden Umständen geeignet waren, eine zuverlässige Regensicherheit ohne die abschließende Dachdeckung zu gewährleisten. Allerdings wurde auf den s_d -Wert der Produkte kein Einfluss der Alterung festgestellt.

Die untersuchten Unterspannbahnen unterscheiden sich sowohl im Zug-Dehnungsverhalten als auch bei der Nagelausreißfestigkeit zum Teil erheblich. In beiden Prüfungen konnte ein Einfluss der Alterung festgestellt werden.

In einem weiterführenden Forschungsprojekt des FIW wurden verschiedene Materialien hinsichtlich ihrer Luftdurchlässigkeit untersucht [41]. Diese ist bei nicht gealterten Unterspannbahnen sehr unterschiedlich. Nach der Alterung durch Freibewitterung konnte bei den Bahnen eine geringfügige Zunahme der Luftdurchlässigkeit festgestellt werden.

Seitens der Folienhersteller gibt es wenige veröffentlichte Untersuchungen zum Alterungsverhalten der Unterspannbahnen. So betrachtet [73] die Temperaturentwicklung von freibewitterten Dachmembranen. Dazu wurde an einem kleinen in südlicher Richtung orientierten Dachmodell an verschiedenen Punkten Temperaturmessungen vorgenommen. Bei diesen Untersuchungen stellten sich unerwartet hohe Temperaturen unter der Oberfläche der auf einer Dämmung liegenden Unterspannbahn ein. Es konnte dabei ein Zusammenhang zwischen dem Temperaturprofil der Testflächen und der Intensität des sichtbaren Lichts festgestellt werden.

In [46] sind Untersuchungen von Abdichtungsbahnen aus flexiblen Polyolefinen nach einer Alterung im Praxiseinsatz beschrieben. Die Bahnen kamen dabei vorwiegend auf Flächendächern zum Einsatz und hatten zum Zeitpunkt der Untersuchung ein Alter zwischen drei und elf Jahren. Es wurden Eigenschaften wie Zugfestigkeit, Reißdehnung und Flexibilität in der Kälte gemessen sowie Oberflächenuntersuchungen mittels optischer und Rasterelektronenmikroskopie durchgeführt. Das an den neuen

Folien definierte 99 % Vertrauensintervall als Untergrenze für die mechanischen Prüfungen, wurde auch von den gealterten Abdichtungsbahnen auf den Dächern nicht unterschritten.

In einer weiteren Untersuchung wird unter anderem die Lebensdauer von polyolefinen Dachmembranen betrachtet [45]. Dabei konnte ein Zusammenhang zwischen der UV-Stabilisierung der Folien und feuerhemmenden Brom Beimengungen festgestellt werden. Letztere haben einen negativen Einfluss auf die Langzeitbeständigkeit der Unterspannbahnen gegen UV-Strahlung: Membranen mit feuerhemmendem Bromzusatz weisen über einen bestimmten Zeitraum gute UV-Stabilität auf, die sich dann aber plötzlich stark verschlechtert und zu einer beschleunigten Alterung führt.

1.4.3 Alterungsversuche an Kunststoffen

Hinsichtlich der Alterung von Kunststoffen gibt es eine Vielzahl durchgeführter Untersuchungen verschiedenster Kunststoffarten und -produkte. Aus diesem Grund sollen hier nur einige wenige aufgeführt werden, die für die folgenden Betrachtungen und Untersuchungen an Unterspannbahnen hilfreich sind.

Bezüglich der Dauerhaftigkeit und dem Langzeitverhalten von Kunststoffen im Bauwesen liefert [79] einen sehr umfangreichen Beitrag zur experimentellen Ermittlung von Kennwerten, die beispielhaft für verschiedene Kunststoffe (PMMA, PVC, GF-PHA und PF-UP) hergeleitet werden. Hilfreich ist vor allem die genaue Beschreibung der Einflussgrößen bei einer Bewitterung, um damit die Grundlage für eine möglichst reale Klimasimulation zu schaffen.

In [42] wird das Langzeitverhalten von Thermoplasten betrachtet, wobei auf grundsätzliche Einwirkungen und deren Auswirkungen auf Polymerwerkstoffe eingegangen und die Autooxidation als Alterungsprozess beschrieben werden. Die durch sie ausgelösten chemischen und physikalischen Materialveränderungen sind in der Regel nicht reversibel.

Weiterhin wird in einem Abschnitt auf die Extrapolation der Lebensdauer anhand zeitraffender Labortests eingegangen, wobei die Aussage getroffen wird, dass solche Alterungsversuche an Polymerwerkstoffen in der Regel nicht zwingend zu verlässlichen Vorhersagen hinsichtlich realistischer Gebrauchsdauer von Bauteilen führen und lediglich orientierenden Charakter haben.

Ein weiterer Beitrag geht auf den Einfluss von Temperatur und Beregnung auf das Alterungsverhalten von PVC im Vergleich von künstlicher Bewitterung und Freibewit-

terung ein [62]. Dort konnte festgestellt werden, dass bei einer Schwarztafeltemperatur von 50 °C eine gute Korrelation zwischen Freibewitterung und künstlicher Alterung bei gleicher Gesamtbestrahlung erzielt wurde, wobei bei 60 °C Schwarztafeltemperatur eine höhere Zeitraffung eintrat. Zur Bestimmung der Tiefe des Alterungsprozesses wurden Materialschichten von jeweils 100 µm abgetragen. Es war dabei zu erkennen, dass eine relativ schnelle Schädigung der Oberflächenschicht eintrat. Die Schädigung der darunter liegenden Schicht (zwischen 100 µm und 200 µm) ist bei einer künstlichen Bewitterung größer als bei einer Freibewitterung. In einer Tiefe von mehr als 200 µm wurde kein Abfallen der Stabilität mehr festgestellt.

Ähnliche Untersuchungen werden in [60] vorgenommen. Aus der Kenntnis, dass sich Materialveränderungen im Laufe der Zeit von der sonnenbestrahlten PVC-beschichteten Oberfläche immer tiefer in die Beschichtung ausbreiten, konnte mittels optischer Verfolgung dieser Vorgänge eine Einstufung der Alterungsbeständigkeit vergleichbarer Materialien vorgenommen werden. Eine messtechnische Einstufung des Alterungsverhaltens war bereits nach relativ kurzer Dauer der künstlichen Bewitterung von 500 Stunden möglich.

Ein älterer Artikel, der sich mit der Korrelation zwischen natürlicher und künstlicher Bewitterung befasst [64], nennt UV-Strahlung, Temperatur und Feuchtigkeit als primäre Variablen der Witterung. Werden diese im Labor exakt nachgebildet, kann eine beschleunigte Alterung erzielt werden. Erhöht man die Lasten bis zu ihrem natürlichen Limit, ist es möglich eine maximale Beschleunigung zu erhalten, wobei es aber insbesondere auf eine angemessene Balance der einzelnen Witterungskomponenten ankommt.

Hilfreich sind auch die Erkenntnisse aus [58], in denen Alterungsauswirkungen PVC-beschichteter Polyestergewebe mittels empfindlicher Lichtdurchlässigkeitsmessung am Festkörper schon sehr früh erkannt werden. Zur Vergleichbarkeit mit anderen Materialien sind praxiskonforme zeitraffende Kurzzeitbewitterungsversuche zur Bestimmung der Alterungsanfälligkeit entwickelt worden.

1.4.4 Natürliche und künstliche Bewitterungsmodelle

In einem allgemeinen Beitrag eines Herstellers für Bewitterungsgeräte wird auf die verschiedenen Variablen, Methoden und Philosophien eingegangen, die es bei Alterungsversuchen an Materialien gibt [65]. Von den vielen Variablen, welche die Dauerhaftigkeit von Materialien beeinflussen können, werden in diesem Beitrag Licht (respektive Sonnenlicht), Temperatur und Feuchte als die drei wesentlichsten Parameter herausgestellt.

Bei den möglichen Testmethoden zur Erzielung einer Alterung wird zwischen Realzeit und beschleunigten Methoden bzw. natürlicher und beschleunigter Alterung unterschieden. Dabei sind die entscheidenden Variablen Sonnenlicht, Temperatur und Feuchte bei einer natürlichen Alterung kaum beeinflussbar, während bei einer künstlichen Alterung im Labor diese Faktoren einzeln regulierbar sind. Die im Beitrag angesprochenen Aspekte von Bewitterungsuntersuchungen befassen sich unter anderem mit den verschiedenen Ebenen von denen das zu untersuchende Material betrachtet werden kann, den verschiedenen mathematischen Modellen, auf denen Aussagen beruhen (z.B. Angabe von Mittelwerten oder Angabe des Streubereiches) und schließlich die Bedeutung der Interaktion zwischen den einzelnen Parametern, welche erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse der Untersuchungen haben können.

In [66] ist für Gebrauchstauglichkeitsuntersuchen von Holzbauteilen aufgezeigt, wie mit Hilfe des so genannten Test-Tailoring nach VDI-Richtlinie 3958 „Umweltsimulation: Grundlagen und Methoden“ ein Simulationsmodell mit einer künstlichen Bewitterung aufgestellt werden kann.

1.5 Problematik und Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Die in dieser Forschungsarbeit angestrebte Vorhersage der Lebensdauer eines Bauproduktes soll zunächst sicherstellen, dass dieses Produkt im geplanten Nutzungszeitraum des Bauteils bzw. des Gebäudes, in welches es eingebaut wurde, nicht versagt und seine wesentlichen Eigenschaften zur Funktionserfüllung beibehält.

Um die Lebensdauer eines Produktes mittels einer Prognose abschätzen zu können stehen vier Möglichkeiten (bzw. ihre Kombinationen) zur Verfügung:

- 1.) Verringerung des Zeitfaktors durch beschleunigte Alterungsversuche
- 2.) Extrapolation des Zeitfaktors mit Ergebnissen aus Kurzzeitversuchen
- 3.) Interpolation/Extrapolation mit Daten ähnlicher Bauteile bzw. Baustoffe
- 4.) Interpolation/Extrapolation mit Daten ähnlicher Randbedingungen

Jede der vier aufgeführten Methoden beinhaltet Unsicherheiten hinsichtlich der Genauigkeit der Prognose, weshalb es erforderlich ist, einen systematischen Ansatz für eine Lebensdauerprognose zu finden, der diese Unsicherheiten berücksichtigt und minimiert.

1.5.1 Natürliche Beanspruchungen und künstliche Alterung

Damit exakte Aussagen bezüglich der Dauerhaftigkeit und des Langzeitverhaltens (extrem) diffusionsoffener Kunststoff-Folien gemacht werden können, sind üblicherweise langandauernde Freilandversuche erforderlich. Neben den langen Versuchsdauern werden jedoch auch die nicht reproduzierbaren und schlecht vergleichbaren Versuchsergebnisse (diese sind material-, witterungs- und standortabhängig) negativ bewertet.

Aus diesem Grund wird bei Dauerhaftigkeitsuntersuchungen häufig eine künstlich beschleunigte Alterung im Labor vorgenommen. Dabei ist eine Vielzahl von Belastungen, die auf frei bewitterte Unterspannbahnen wirken können, zu beachten (siehe Abbildung 1.5.1-1).

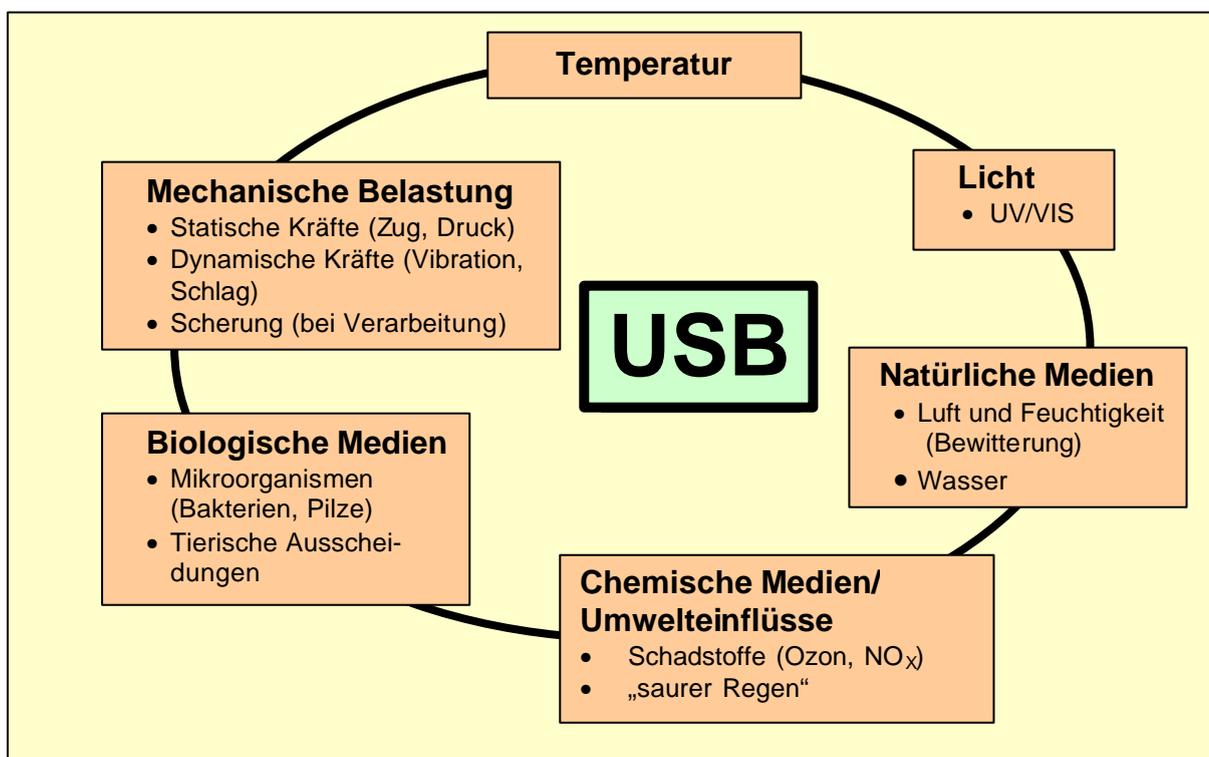


Abb. 1.5.1-1

Belastungen und Einflüsse auf frei bewitterte Unterspannbahnen (USB)

Eine maßgebende Aufgabe der Baustoff-Forschung besteht in der Entwicklung von Prüfverfahren, welche geeignet sind, den Einfluss der Alterung auf bestimmte – für den konstruktiven Ingenieurbau relevante – Stoffeigenschaften nachzuweisen. Dabei sind neben den Hinweisen der VDI-Richtlinie 3958 Blatt 1 [38], zum Test-Tailoring auch die Aussagen zur Entwicklung von Lebensdauervorhersagen für Gebäude und Baumaterialien in ISO 15 686-1 und -2 [27], [28] zu beachten.

1.5.2 Problematik beschleunigter Alterungsversuche

Zur Bestimmung der Auswirkungen von Sonnenstrahlung, Wärme und Feuchte auf die physikalischen, chemischen und mechanischen Eigenschaften von diffusionsoffenen Dachunterspannbahnen sollen in der vorliegenden Arbeit neben natürlicher Bewitterung auch zeittraffende künstliche Alterungsversuche durchgeführt werden (siehe Abschnitt 1.5.4: Vorgehensweise).

Dabei finden die in den Laborprüfungen angesetzten Beanspruchungen – anders als in der Natur – unter sehr gleichmäßigen Bedingungen mit speziellen künstlichen Wärme- und/oder Lichtquellen statt. Dadurch soll ein beschleunigter Polymerabbau der Kunststoff-Folien erreicht und die damit verbundene Produktalterung hervorgerufen werden (vgl. Kapitel 3: Alterung und Degradation von Kunststoffen).

Es stellt sich das Problem, dass natürlich und künstlich aufgebrachte Belastungen stark unterschiedlich sein können und somit ein Vergleich der Ergebnisse aus zeittraffenden Bewitterungsversuchen mit denen unter Praxisbedingungen schwierig ist. Mit künstlichen Bewitterungsprüfungen in Labortests ist es nicht möglich, alle natürlichen Belastungen gleichzeitig nachzubilden, weshalb lediglich eine näherungsweise Simulation der Praxisbedingungen durchgeführt werden kann. Es können also nur einzelne oder eine beschränkte Anzahl ausgewählter Einflussparameter als Belastung aufgebracht werden. Die Wechselwirkungen der realen Einflussgrößen untereinander (z.B. Sonne und Wind) sind im Labor nicht herstellbar, so dass keine künstliche Beanspruchungsprüfung als vollständige Simulation der Praxisbedingungen bezeichnet werden kann.

So besteht die Problematik des zu entwickelnden Prüfverfahrens vor allem darin, dass durch die künstliche Bewitterung Eigenschaftsmerkmale des Kunststoffs in einem unterschiedlichen Maß verändert werden. Die in der Regel verschärften Prüfbedingungen dürfen allerdings nicht zu Alterungserscheinungen führen, die im Praxiseinsatz nicht feststellbar sind. Auch muss die nur einseitige Beschleunigung einzelner Alterungserscheinungen vermieden werden.

1.5.3 Ziel der Forschungsarbeit

Ziel der Forschungsarbeit ist es, mit Hilfe von natürlichen und künstlichen Bewitterungsversuchen ein Prognosemodell zur Dauerhaftigkeit und zum Langzeitverhalten von diffusionsoffenen Polymerfolien in Dachkonstruktionen zu entwickeln, um in Zukunft – innerhalb eines vertretbaren Untersuchungszeitraums – die Lebensdauer solcher Kunststoffbahnen unter Baubedingungen abschätzen zu können.

Dabei gilt es insbesondere, eine Korrelation zwischen den Messergebnissen unter natürlichen Bedingungen und unter zeittraffenden Testbedingungen im Labor zu erreichen. Aus diesem Grund muss ein Prüfkonzept gefunden werden, welches auf die speziellen Bedürfnisse des Bauwesens abgestimmt ist.

Insbesondere die Größe des s_d -Wertes nach einer Alterung ist von speziellem Interesse, da es sich hier um die herausragende Eigenschaft von diffusionsoffenen Folien handelt und nicht bekannt ist, ob die Unterspannbahnen ihren in fabrikneuem Zustand niedrigen s_d -Wert auch nach einer Alterung besitzen. Wie bereits ausgeführt basieren auf dieser Kenngröße ganze Konstruktionen, die durch einen im Alter erhöhten Wasserdampfdiffusionswiderstand nachhaltig beeinträchtigt werden könnten.

Die Forschungsarbeit soll diese offenen Fragen und Unsicherheiten klären und einen Beitrag zur Sicherstellung der Eigenschaften von Unterdeck- und Unterspannbahnen leisten. Ziel ist es, den in Abbildung 1.5.3-1 dargestellten Verlauf der Sicherheit einer Prognose schon während der Entwicklungsphase der Dachfolien auf ein Niveau anzuheben, welches der derzeitigen Sicherheit bei der Markteinführung entspricht. Demnach ist es mit einem geeigneten Versuchskonzept möglich, die Dauerhaftigkeit diffusionsoffener Kunststoff-Folien in Dachkonstruktionen experimentell zu untersuchen.

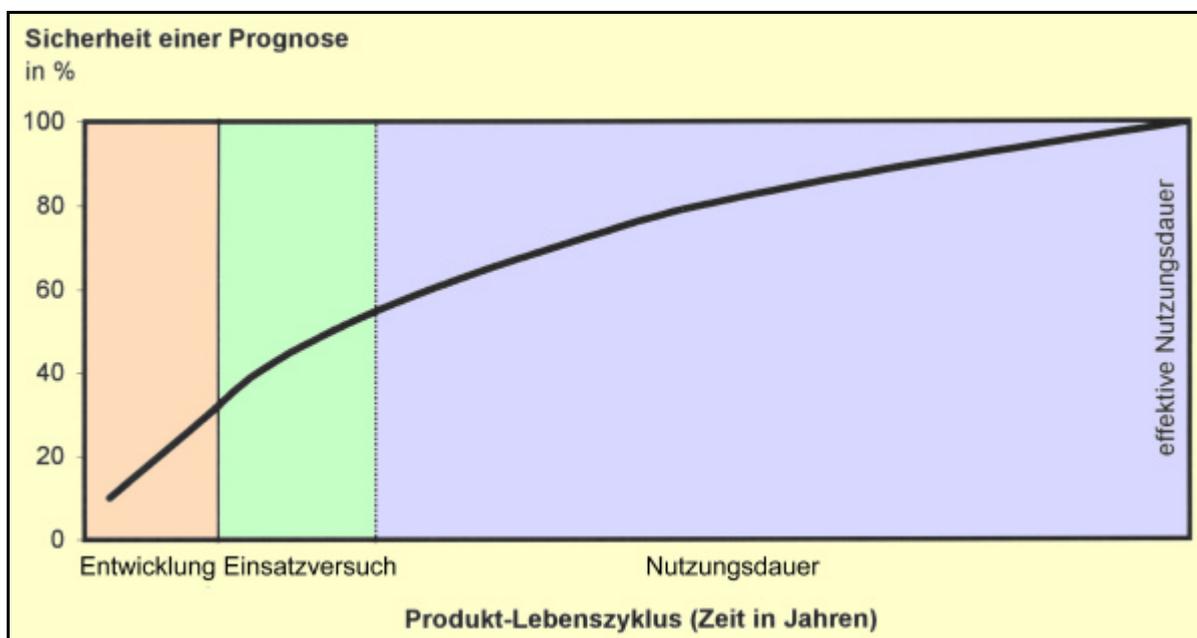


Abb. 1.5.3-1

Verlauf der Veränderung der Sicherheit einer Prognose während der Entwicklung und der Nutzung. Bei Markteinführung beträgt die Sicherheit über die zu erwartende Lebensdauer des Produktes lediglich fünfzig Prozent [44].

Im Rahmen der Versuchsauswertung sollen Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie anhand der entwickelten Prüfmethodik Kennwerte zur Charakterisierung des Langzeitverhaltens verschiedener Unterdeck- und Unterspannbahnen unter spezifischen Einsatzbedingungen zu bestimmen sind.

Dabei ist das Ziel der Prognose, die Einhaltung der zur schadenfreien Funktionserfüllung, wesentlichen Folieneigenschaften über einen bestimmten Zeitraum festzulegen.

1.5.4 Vorgehensweise

Der Entwicklungsprozess bei der Erstellung einer Prognose umfasst neben der Problemanalyse und dem Sammeln aller relevanten Informationen auch Versuche, mit anschließender Interpretation und Auswertung der Daten. Der für die Vorhersage des Alterungsverhaltens von Unterspannbahnen gewählte Entwicklungsprozess ist in Abbildung 1.5.4-1 erläutert.

Es ist zu erkennen, dass ein iterativer Untersuchungsablauf vorgesehen ist, welcher es erlaubt, durch die ständige Modifizierung der Versuche verbesserte Prognosen zu erstellen. Das in Anlehnung an ISO 15 686-2 [28] entstandene Ablaufdiagramm zur Entwicklung einer Prognose zur Vorhersage des Langzeitverhaltens von Dachunterspannbahnen entspricht auch der Gliederung der vorliegenden Arbeit.

Zunächst wird in den einführenden Kapiteln ein grundlegendes Verständnis über die bei Alterungsversuchen relevanten Faktoren geschaffen. Dies umfasst die Beschreibung der chemischen Bestandteile von diffusionsoffenen Unterspannbahnen (Kapitel 2) ebenso, wie die Alterungs- und Degradationsvorgänge der verwendeten Kunststoffe (Kapitel 3). Hier soll insbesondere auch auf die komplexen Zusammenhänge bei der Bewitterung von Kunststoff-Folien – dies betrifft zum einen die Einwirkungsseite und zum anderen die stoffspezifischen Aspekte – eingegangen werden.

Anschließend ist erforderlich, einen Überblick über die Vielzahl am Markt erhältlicher Unterdeck- und Unterspannbahnen zu gewinnen. In Anhang A sind die zum Zeitpunkt der Bearbeitung der Forschungsarbeit verfügbaren Unterspannbahnen aufgelistet. Dabei bieten die Hersteller meist mehrere Folien an, welche sich hinsichtlich des Materials, Materialverbundes und den mechanisch-physikalischen Eigenschaften zum Teil erheblich voneinander und von den Produkten anderer Fabrikanten unterscheiden. Kapitel 4 beschreibt die verschiedenen Herstellungsverfahren und möglichen Bahnaufbauten diffusionsoffener Unterspannbahnen sowie die Anforderungen, die an sie gestellt werden.

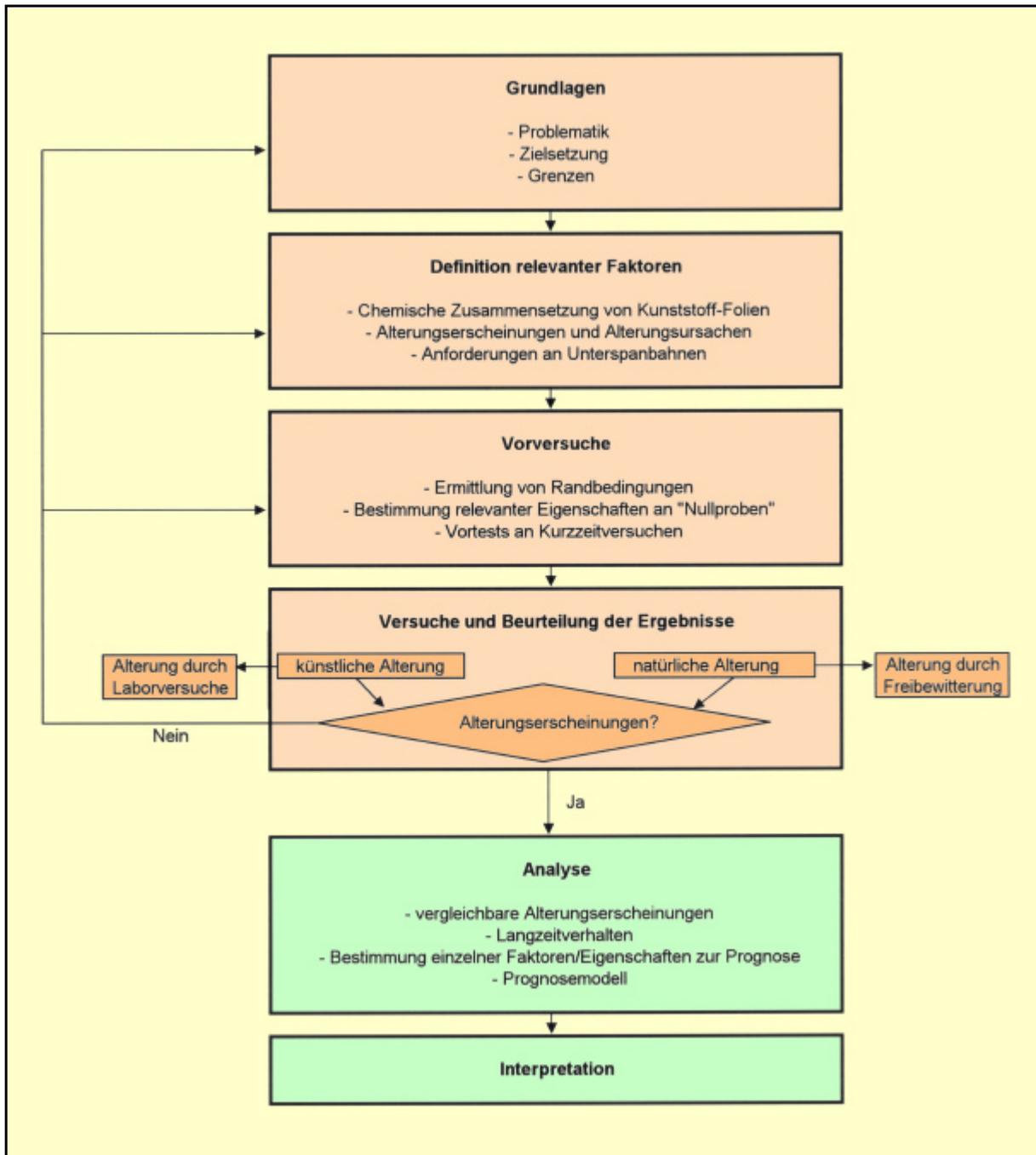


Abb. 1.5.4-1

Entwicklungsprozess für ein Prognosemodell zur Vorhersage des Langzeitverhaltens von Dachunterspannbahnen

Die geeignete Auswahl von Unterspannbahnen für die Durchführung von Alterungsversuchen sowie die Ermittlung bestimmter Randbedingungen (z.B. reale Wetterdaten), die für die Entwicklung der Prüfprogramme von entscheidender Bedeutung sind, werden in Kapitel 5 dargestellt. Bei der Entwicklung eines Prüfkonzeptes zur Durchführung beschleunigter Alterungsversuche ist es von großer Bedeutung zu berücksichtigen, wie gut die Bedingungen der zeittraffenden Prüfung die Umgebungsbedin-

gungen simulieren, denen die Unterspannbahnen im praktischen Gebrauch ausgesetzt sind. Dies ist auch für die anschließende Auswertung der Versuchsergebnisse und die Aussagefähigkeit der Prognose sehr wichtig.

Weiterhin werden Vorversuche beschrieben, die zur Bestimmung relevanter Eigenschaften an fabrikneuen Proben (so genannte „Nullproben“) die Referenzdaten liefern, mit denen dann die Ergebnisse aus natürlichen und künstlichen Alterungsversuchen verglichen werden. Diese basieren auf den Materialprüfungen der für Unterdeck- und Unterspannbahnen geltenden Produktvornorm prEN 13 859 „Definition und Eigenschaften von Unterdeck- und Unterspannbahnen“ [25], [26], Modifikationen dieser Versuche sowie ergänzenden und weiterführenden Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung bestimmter Kennwerte.

Die generelle Anwendbarkeit des entwickelten Versuchskonzeptes zeigt sich in Kapitel 6, in dem die Untersuchungsergebnisse natürlich und künstlich gealterter Unterspannbahnen gegenübergestellt und ausgewertet werden. Dabei soll mit Hilfe der Röntgendiffraktometrie (XRD) auch strukturanalytisch der Alterungsverlauf verfolgt werden.

Die aus den Materialprüfungen gewonnenen Kenngrößen ermöglichen eine altersmäßige Einordnung der Unterspannbahnen nach den Versuchen, die dann auch durch eine mathematische Beschreibung erfolgen kann (Kapitel 7). Das abschließende Kapitel 8 fasst die Forschungsarbeit zusammen. Es wird kurz auf die Problemstellung, den Lösungsansatz und die Versuchsdurchführung sowie auf die ermittelten Ergebnisse eingegangen. Auch wird ein Ausblick gegeben, der die Möglichkeiten der Fortführung der Alterungsversuche an Unterspannbahnen betrachtet.

1.5.5 Grenzen der Forschungsarbeit

Aufgrund der Vielfalt am Markt erhältlicher Unterspannbahnen, deren Alterungsmechanismen und Variationsmöglichkeiten bei den Versuchen, ist es bereits zu Beginn der Untersuchungen erforderlich, bestimmte Grenzen zu definieren, in denen sich die Forschungsarbeit bewegen soll.

So ist aus den im Anhang A aufgeführten Unterspannbahnen eine repräsentative Auswahl zu treffen, mit denen dann stellvertretend die verschiedenen Herstellverfahren und Bahnaufbauten abgedeckt werden. Eine Auswahl ist auch deshalb erforderlich, weil die in der Produktnorm DIN EN 13 859 verlangten Materialprüfungen sehr umfangreich sind.

Diese werden zum einen auf die für die Kennzeichnung von Alterungsmechanismen relevanten Prüfungen reduziert und zum anderen durch geeignete Modifikationen der Normversuche bzw. Alternativprüfungen ergänzt. Zu bedenken ist dabei, dass bereits der beschleunigte Alterungsversuch nach Norm 3 ½ Monate dauert.

Die natürlichen Alterungsversuche beziehen sich auf einen Standort, wobei die Prüfstände nur in eine Himmelsrichtung ausgerichtet wurden. Eine Prüfung von Unterspannbahnen unter einer Dachdeckung ist nicht erfolgt, da die Versuche zur künstlichen Alterung ebenfalls direkt die ungeschützten Kunststoff-Folien betreffen.

Hinsichtlich der künstlichen Alterungsversuche steht eine Vielzahl möglicher Varianten zur Auswahl. So sind entscheidende Alterungsparameter Wärme, Feuchte und UV-Strahlung. Diese können einzeln oder in Kombination auf die Probekörper aufgebracht werden.

In der vorliegenden Arbeit sollen die Auswirkungen der einzeln wirkenden Belastungen betrachtet und für die Belange der Baupraxis ausgewertet werden.

Die chemisch-analytische Verfolgung der Alterungsvorgänge in Unterspannbahnen soll beobachtend mittels der Röntgendiffraktometrie erfolgen. Andere Verfahren, die zur Bestimmung von Alterungsvorgängen an Kunststoffen eingesetzt werden (z.B. UV/VIS) werden nicht einbezogen. Die genaue Analyse der Veränderungen der chemischen Struktur ist nicht Gegenstand und Ziel der Untersuchungen und bleibt der Grundlagenforschung der Kunststoffchemie überlassen.

2 Kunststoff-Folien

Bei den in dieser Arbeit betrachteten diffusionsoffenen Unterspannbahnen handelt es sich ausschließlich um polymere Kunststoff-Produkte. Die einzelnen Bahnen können aus einer einzelnen Folie oder aus mehreren Folienschichten zusammengesetzt sein, wobei in den untersuchten Unterspannbahnen die eng miteinander verwandten Polyethylene und Polypropylene zur Anwendung kommen. Da ein Verständnis und eine Beurteilung für die Vorgänge bei der Folienalterung ohne ein Grundwissen über die Herstellung und die Eigenschaften der beiden verwendeten Kunststoffe nicht möglich ist, sollen in diesem Kapitel die Grundlagen der Kunststoffchemie und Kunststofftechnologie behandelt werden.

Umfangreicher Darstellungen über die Herstellung, Verarbeitung, Anwendung und Eigenschaften der oben genannten Kunststoffe finden sich in [51], [70], [95]. Aus diesen Monographien sind auch die nachfolgend zusammengestellten allgemeinen Erkenntnisse, die für die Bearbeitung des Forschungsvorhabens von besonderem Interesse sind, entnommen. Auf dieser Basis wird es möglich sein, die bei der natürlichen und künstlichen Bewitterung festgestellten Phänomene zu beurteilen und zu deuten sowie die entsprechenden Schlussfolgerungen zu ziehen.

2.1 Grundbegriffe von Kunststoff-Folien

Die in dieser Arbeit behandelten polymeren Kunststoff-Folien für Dachunterspannbahnen sind sehr dünne flächige, mehr oder weniger flexible Materialien. Dabei hängt die Flexibilität insbesondere von der Dicke der Folienbahn, der Zusammensetzung aus einer oder mehreren Lagen (mit oder ohne Verstärkungslage) und von der Art des verwendeten Rohstoffes ab. Die Dicke der in diesem Forschungsvorhaben betrachteten Folien liegt zwischen etwa 2 und 500 μm , wobei Solo- und Verbundfolien unterschieden werden.

Während Solofolien aus einer einzelnen Lage und einem einheitlichen Material bestehen, sind Verbundfolien aus unterschiedlichen Materialien und mehreren Schichten zusammengesetzt. Folien aus zwei Schichten gleichen Materials werden als Doppelfolien bezeichnet. Durch den Einsatz verschiedener Materialien und der Kombination unterschiedlicher Eigenschaften von Einzelfolien, ist es möglich in Verbundfolien ein gemeinsames Eigenschaftsprofil zu erhalten, welches dem vorgesehenen Verwendungszweck optimal angepasst ist. Zur Herstellung solcher Verbundfolien werden die Kaschierung, die Extrusionsbeschichtung und vor allem die Coextrusion angewendet.

2.2 Polymere

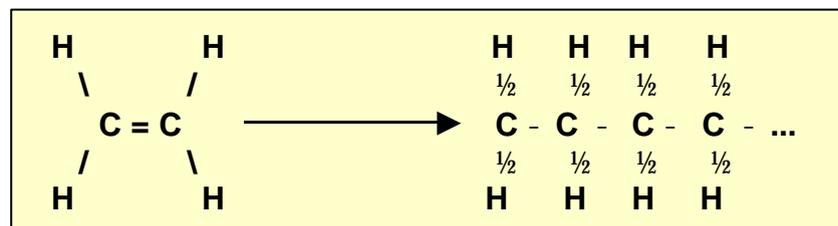
Synthetische Polymere sind aus kleineren Molekülen – den so genannten Monomeren – aufgebaut, die sich infolge einer chemischen Reaktion zu unterschiedlich langen Makromolekülketten verbinden können. In der Folienproduktion sind die drei Polymerbildungsverfahren der Polymerisation, der Polykondensation und der Polyaddition von Bedeutung.

2.2.1 Polymerisation

Die Polymerisation ist ein Verfahren, welches in der Kunststoffherstellung sehr häufig eingesetzt wird und auf dem Vorhandensein von C-C-Doppelbindungen beruht. Diese werden teilweise gespalten und in eine Einfachbindung sowie in zwei beidseitige reaktive Teilbindungen überführt, die eine Sättigung anstreben.

Betrachtet man zum Beispiel Ethylen, so werden unter Einwirkung von Wärme, energiereicher Strahlung (UV- oder Röntgenstrahlung) oder in Anwesenheit von Initiatoren bzw. Katalysatoren die Doppelbindungen teilweise aufgespalten. Die einzelnen reaktiven Ethylen-Bausteine verbinden sich dann zu Polyethylen (PE, siehe Abb. 2.2.1-1).

Abb. 2.2.1-1
Umwandlung von Ethylen
in Polyethylen

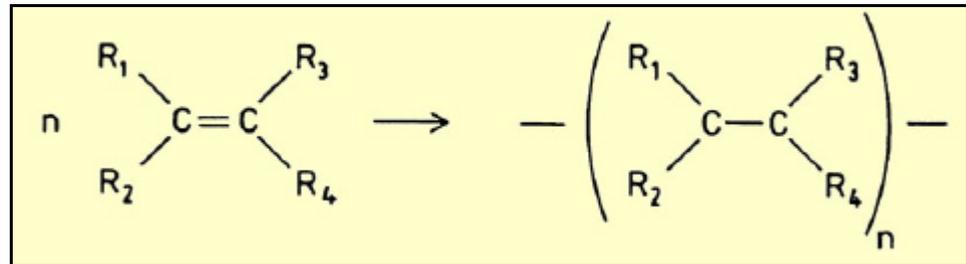


Obwohl die Reaktionsgleichung der Polymerisation recht einfach ist (vgl. Abbildung 2.2.1-2), ergeben sich daraus eine Vielzahl möglicher Kombinationen verschiedener Molekül- und Atomgruppen. Daraus folgt, dass die Eigenschaften der Polymerisate neben der chemischen Struktur auch vom Polymerisationsverfahren (in Gasphase, in Lösung, in Emulsion bzw. Suspension oder in Substanz) und den eventuell verwendeten Katalysatoren abhängen. So können Reaktionsprodukte gleicher Ausgangsstoffe durchaus unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, was sich auf die verschiedenen Herstellungsverfahren zurückführen lässt.

Wird die Polymerisation mit nur einem Monomer ausgeführt, erhält man so genannte „Homopolymere“. Die dabei entstehenden Makromoleküle können linear, mit kleinen „Seitenzweigen“ oder mit längeren und wieder in sich verzweigten Seitenketten

vorliegen. Je nach Art der sich so einstellenden Feinstruktur werden Polymere bzw. Polymerfolien unterschiedlichster Eigenschaften erzeugt.

Abb. 2.2.1-2
Reaktionsgleichung der Polymerisation



2.2.2 Polykondensation

Das Verfahren der Polykondensation baut die Makromoleküle aus monomeren Grundbausteinen auf. Allerdings besitzen sie keine polymerisierbaren C-C-Doppelbindungen, sondern so genannte funktionelle Gruppen. Diese reagieren zum Beispiel unter Abspaltung von H₂O miteinander und kondensieren so zu größeren Molekülen.

2.2.3 Polyaddition

Werden Makromoleküle nach dem Prinzip der Polyaddition aufgebaut, kommt es ähnlich wie bei der Polymerisation zu einer additiven Bindung von Monomermolekülen.

2.3 Eigenschaften von Polymeren

Fast alle zur Folienherstellung verwendeten Kunststoffe weisen ein thermoplastisches Verhalten auf. Diese gemeinsame Eigenschaft der Polymere hängt vor allem von ihrer chemischen Struktur und Molmasse sowie von ihrem Feingefüge ab.

2.3.1 Thermoplastizität

Thermoplastische Kunststoffe unterscheiden sich von niedermolekularen festen Substanzen in ihrem Verhalten beim Erwärmen. Da es sich bei dieser Stoffklasse strenggenommen nicht um chemisch „reine“, „definierte“ Substanzen handelt (einzelne Polymerketten können unterschiedlich lang und verzweigt sein), besitzen sie auch keinen definierten Schmelzpunkt, sondern einen Schmelzbereich. Bei höheren Temperaturen werden sie weich und plastisch, wobei die zähflüssige Schmelze verformbar ist und sich nach dem Abkühlen wieder verfestigt.

Das Gesamtverhalten und die Eigenschaften des Endproduktes hängen neben dem Ausgangsmaterial und dessen chemischem Aufbau vom Herstellungsverfahren, der sich daraus ergebenden Feinstruktur der Makromoleküle und eventuell zugesetzten Additiven ab. Die Makromoleküle können dabei einen weitgehend linearen Aufbau besitzen oder mit einer gewissen Anzahl kurzer oder relativ langer Seitenketten ausgestattet sein, die wiederum in sich verzweigt sind (Abb. 2.3.1-1).

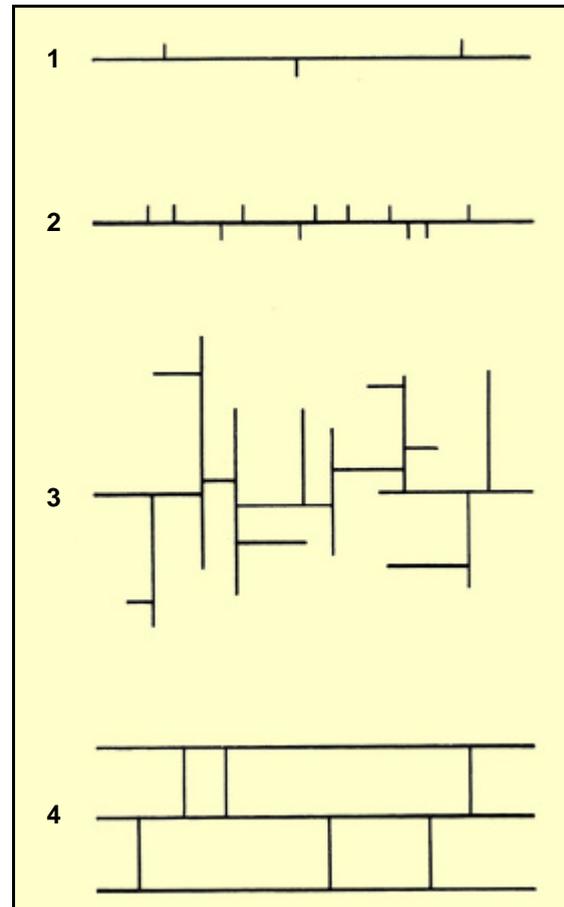


Abb. 2.3.1-1

Mögliche Anordnung von Verzweigungen bei Makromolekülen

- 1 linear
- 2 linear, verzweigt mit kurzen Seitenketten
- 3 verzweigt, mit langen Seitenketten
- 4 vernetzt

Verbinden sich die Ketten eines Makromoleküls mit anderen Ketten, so entstehen vernetzte Gebilde, die nicht mehr schmelzbar sind und als Duroplaste bezeichnet werden. Diese Vernetzungen lassen sich zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Unterspannbahnen auch gezielt in die Folien einbauen.

2.3.2 Molmasse, Viskositätszahl, K-Wert

Eine für die Eigenschaften und Verarbeitung von Thermoplasten wichtige Größe ist die Molmasse (Molekülmasse) M . Sie gibt die Summe der relativen Massen derjenigen Atome an, aus denen eine chemische Substanz aufgebaut ist. Die relative Atommasse ist dabei eine Verhältniszahl, die angibt, wie viel größer die Masse eines bestimmten Atoms im Vergleich zur Masse eines Bezugsatoms ist.

Allerdings ist zu beachten, dass bei der Bestimmung der Molekülmasse von Polymeren nur Werte für eine mittlere Molmasse angegeben werden können, da die einzelnen Moleküle unterschiedliche Kettenlängen und damit auch unterschiedliche Massen aufweisen.

Bei einheitlich aufgebauten Polymeren lässt sich aus der Molmasse M der Polymerisationsgrad P aus folgender Gleichung bestimmen:

$$P = \frac{M_{\text{Polymer}}}{M_{\text{Monomer}}} \quad (2.3.2-1)$$

Bei thermoplastischen Kunststoffen wirkt sich die Größe der Molmasse stark auf die Verarbeitungsbedingungen und Eigenschaften der Fertigprodukte aus. Dabei ist je nach chemischer Struktur der Thermoplaste eine Mindestgröße der Molmasse von 10^4 erforderlich, um brauchbare Resultate zu erreichen. Mit steigender Molekülmasse wird die Verarbeitung im Allgemeinen schwieriger, die mechanischen Eigenschaften der Endprodukte jedoch besser.

Bei chemisch gleich aufgebauten Kunststoffen werden zur Beurteilung der Verhaltens bei der Verarbeitung allerdings nicht die Molekülmassen herangezogen (diese werden in der Praxis nur selten ermittelt, da dies sehr aufwendig ist), sondern sie werden durch einfacher zu bestimmende Kennzahlen wie die Viskositätszahl oder den Schmelzflussindex gekennzeichnet. Dabei ist es auch möglich, Schädigungen des thermoplastischen Ausgangsmaterials mit Hilfe dieser Kennzahlen zu erkennen und in ihrem Ausmaß zu beurteilen.

Mit der Viskositätszahl korrespondiert die dimensionslose Zahl des K -Wertes. Je höher dabei K -Wert und Viskositätszahl sind, umso größer sind Molekülmasse M und Polymerisationsgrad P eines Thermoplastes. Beide Werte geben Hinweise auf die Verarbeitbarkeit und die Qualität der resultierenden Folien. Dabei ist zu beachten, dass eine Vergleichbarkeit von Produkten über die Anwendung der Zahlen nur sinnvoll ist, wenn sich die Kunststoffe in einer Klasse von Produkten gleicher chemischer Struktur befinden.

2.3.3 Feinstruktur der Makromoleküle

Neben der chemischen Struktur und der unterschiedlichen Gestalt der Molekülketten, ist es insbesondere vor dem Hintergrund von Alterungsuntersuchungen an Kunststoff-Folien sinnvoll, die Polymere durch eine Betrachtung der morphologischen

Feinstruktur der Makromoleküle zu beschreiben, wobei kristalline und amorphe Bereiche zu unterscheiden sind.

Die Kristallinität ist ein wichtiges Merkmal thermischer Polymere, da durch sie das Fließverhalten und damit auch die Verarbeitbarkeit beeinflusst werden. Bei den Kettengebilden eines Makromoleküls haben kristalline Bereiche eine „geordnete“ Struktur, die eine Größe von ca. 0,1 μm bis 1,0 mm aufweisen können. Je nach chemischer Struktur liegt der Anteil an Kristalliten im Polymer zwischen 5 und 95 %, woraus sich analog der restliche Anteil als amorpher Bereich ergibt. Die Ausbildung von Kristalliten wird durch linearen, gleichmäßigen und „stereospezifischen“ Molekülaufbau begünstigt. Weiterhin sorgt auch eine enge Verteilung der Molekülmasse für eine stärkere Ausbildung kristalliner Bereiche. Polymere mit starken Verzweigungen und breiter Molmasseverteilung sowie sperrigen Substituenten sind weitgehend amorph (z.B. verzweigte Polypropylene).

Bei vielen thermoplastischen Kunststoffen steigt die Dichte mit der Kristallinität an. Wichtigstes Beispiel für dieses Verhalten ist Polyethylen (Abb. 2.3.3-1). Hier zeigen Produkte mit niedriger, mittlerer und höherer Dichte große Eigenschaftsunterschiede, was sich stark auf aus PE hergestellte Folien auswirkt. Ähnliches gilt auch für Polypropylen (PP).

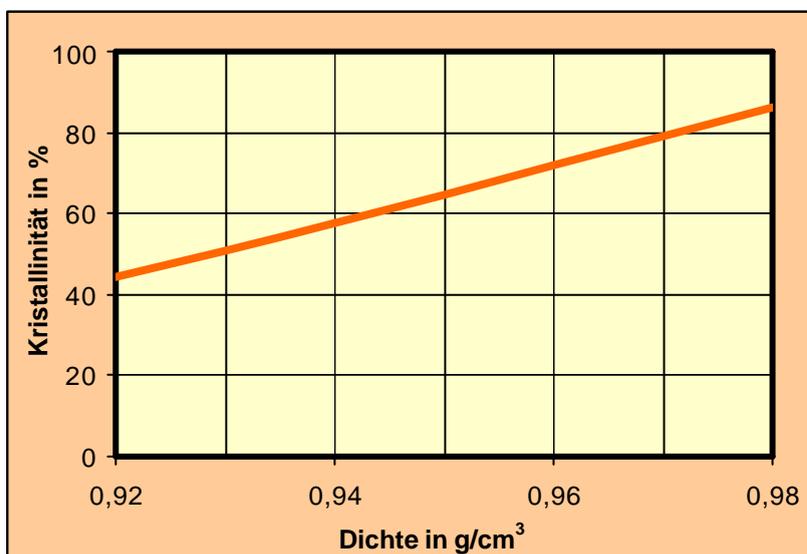


Abb. 2.3.3-1
Zunahme der Kristallinität
mit ansteigender Dichte
von Polyethylen

Quantitative Aussagen über die kristallinen Bereiche eines Thermoplasts sind durch die Bestimmung des Kristallitschmelzpunktes möglich. Für amorphe Bereiche ist die Glasübergangstemperatur die entsprechende Nachweisgröße. Da die meisten für die Folienherstellung verwendeten Polymere amorphe und kristalline Bereiche haben, ist die Kenntnis dieser beiden Größen sowohl für die Verarbeitung als auch für die spätere Anwendung von Dachunterspannbahnen wichtig.

2.4 Folieneigenschaften

Neben den allgemeinen Kenndaten wie Dichte und Flächengewicht einer Folie können unter anderem auch mechanische und thermische Eigenschaften als Charakterisierungsmerkmal herangezogen werden. Für die Anwendung von Folien im Dachbereich ist weiterhin die Durchlässigkeit gegenüber Gasen und Feuchtigkeit von Interesse.

2.4.1 Dichte

Die Dichte ist die Masse eines Stoffes pro Volumeneinheit und wird bei Folien in der Einheit g/cm^3 angegeben. Für den Einsatz von Folien als Unterspannbahnen auf Dachkonstruktionen ist grundsätzlich eine möglichst niedrige Dichte erwünscht, da sich dadurch Handlichkeit und Verarbeitung erleichtert. Die Dichte von dem für die Unterspannbahnen verwendeten PE und PP liegt bei etwa $0,9 \text{ g/cm}^3$.

2.4.2 Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften von Folien werden in vielen Fällen getrennt für die Längs- und Querrichtung der Folienbahn angegeben, da eine Anisotropie meist nicht vermeidbar und gelegentlich sogar erwünscht ist.

So wird die Zugfestigkeit bei Folien sowohl parallel als auch senkrecht zur Bahnachse bestimmt. Durch eine Ver Streckung der Folie kann diese Eigenschaft wesentlich verbessert werden.

Wird die Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur gemessen, erhält man ein Bild der Temperaturbeständigkeit der Folie. Wegen der unkomplizierten Messmethode wird die Veränderung der Zugfestigkeit bei Alterungsprozessen oft als Schädigungskriterium verwendet. Beispielsweise werden verschiedenartige Folien einer Wärme- und Strahlungsbelastung unterzogen, bis die Zugfestigkeit auf 50 % abgesunken ist. Die dazu nötige, unterschiedliche Zeitdauer ist ein Maß für die Beständigkeit der Folien.

Die Reißdehnung beschreibt die Dehnung eines Prüfstreifens bis zum Abriss. Das Ergebnis des Dehnungsversuchs hängt unter anderem von der Prüfgeschwindigkeit ab. Eine sehr langsam durchgeführte Dehnung kann zur Orientierung der Makromoleküle führen, was eine Verbesserung (und damit Verfälschung) der Messwerte zur Folge haben kann. Wie die Zugfestigkeit ist auch die Reißdehnung in der Regel in Längs- und Querrichtung der Folienbahn unterschiedlich.

Wird die Probe nicht bis zum Zerreißen belastet, so erhält man eine Aussage über die Dehnfähigkeit des Materials. Die Dehnung wird als Prozentsatz der ursprünglichen Länge angegeben.

Neben Zugfestigkeit, Reißdehnung und Dehnung ist auch der Weiterreißwiderstand von Interesse. Eine einmal eingerissene Folie setzt im Allgemeinen dem Weiterreißen nur geringen Widerstand entgegen. Ist diese Tatsache bei Öffnungshilfen von Verpackungen noch erwünscht, sollte bei Dachunterspannbahnen das Weiterreißen durch einen hohen Widerstand vermieden werden.

2.4.3 Thermische Eigenschaften

Das Verhalten von Folien in Abhängigkeit von der Temperatur muss vor allem bei Anwendungen auf dem technischen Sektor beachtet werden.

Als Maß für die Wärmebeständigkeit von Kunststoff-Folien werden entweder Temperaturgrenzen für den Gebrauch oder Zeitgrenzen für die Beständigkeit bei bestimmten Temperaturen angegeben. Allerdings sind diese Werte relativ, da sie von vielen Faktoren abhängen und eine Beurteilung der Wärmebeständigkeit von Folien immer nur in Abhängigkeit vom Einsatzgebiet erfolgen kann. Während die Kunststoff-Folien bei hohen Temperaturen eher zu plastischen Verformungen neigen, kommt es mit tieferen Temperaturen zu Versprödungen.

Entscheidend für die Wärmestabilität von Unterspannbahnen ist das Folienmaterial und seine Feinstruktur, vor allem seine Kristallinität. Aber auch Einflüsse der Folienherstellung und der Zusatz von Additiven spielen eine Rolle.

2.4.4 Durchlässigkeit

Alle Kunststoff-Folien sind für Gase, Dämpfe oder Flüssigkeiten mehr oder weniger durchlässig. Die Durchlässigkeit ist, wie schon in vorangegangenen Kapiteln erläutert, beim Einsatz von Folien als diffusionsoffenen Dachunterspannbahnen eine besonders wichtige Größe. So muss zum einen der Zutritt flüssigen Wassers von außen in die Konstruktion durch die Folie verhindert werden, andererseits soll sie aber auch Feuchtigkeit aus der Dachkonstruktion (z.B. Einbau- und Holzfeuchte) hindurch lassen, um eine Austrocknung zu ermöglichen.

Der wichtigste Faktor für die Durchlässigkeit einer Folie ist ihre chemische Struktur und eine eventuelle Verwandtschaft zum diffundierenden Stoff bzw. Medium, da

ähnliche Strukturen eine gute Verträglichkeit bedeuten und das Eindringen der jeweiligen Gase, Dämpfe oder Flüssigkeiten begünstigen.

Als weiterer Faktor für die Durchlässigkeit ist die Wanderungsfähigkeit in der Folie entscheidend, was in hohem Maße von der Kristallinität der Folie abhängt. So wandern diffundierende Stoffe in amorphen Bereichen schneller als in kristallinen. Dies zeigt auch der Vergleich von Durchlässigkeiten verschiedener Stoffe einer nach dem Flachfolienextrusionsverfahren hergestellten, unverreckten und einer durch Reckprozesse orientierten Polypropylenfolie von jeweils 40 µm Dicke (Tab. 2.4.4-1).

Tabelle 2.4.4-1

Vergleich der Durchlässigkeiten einer PP-Flachfolie und einer gereckten BOPP-Folie

Medium	Einheit	PP-Flachfolie	BOPP
Wasserdampf	g/(m ² d)	1,3	0,6
Sauerstoff	cm ³ /(m ² d bar)	2000	900
Kohlendioxid	cm ³ /(m ² d bar)	6000	3000
Stickoxid	cm ³ /(m ² d bar)	400	180

Betrachtet man die Wasserdampfdurchlässigkeit (WDD), so wird durch diese Größe die Menge an Wasserdampf angegeben, die bei einem definierten Luftfeuchtegefälle (Partialdruckgefälle) und definierter Temperatur in 24 Stunden durch eine Fläche von 1 m² Folie hindurchtritt.

Die Wasserdampfdiffusion ist stark von der Kristallinität der Polymere abhängig und nimmt mit steigenden Temperaturen zu. In Abb. 2.4.4-1 ist die Wasserdampfdurchlässigkeit von PE-Folien in Abhängigkeit von Dichte und Temperatur dargestellt. Bei mehrlagigen Unterspannbahnen beeinflusst die Wasserdampfdurchlässigkeit der einzelnen Schicht die Eigenschaften des Gesamtverbundes.

Für Dachunterspannbahnen ist die Gasdurchlässigkeit hinsichtlich ihrer Funktionserfüllung eher von untergeordneter Bedeutung. Prüft man jedoch die Luftdurchlässigkeit mit einem Volumenstrom, der aufgrund eines bestimmten Druckunterschiedes durch eine definierte Fläche hindurchströmt, so lassen sich über eine Zu- bzw. Abnahme der Durchlässigkeit Änderungen der Folienstruktur ableiten, da diese von der Kristallinität abhängig ist.

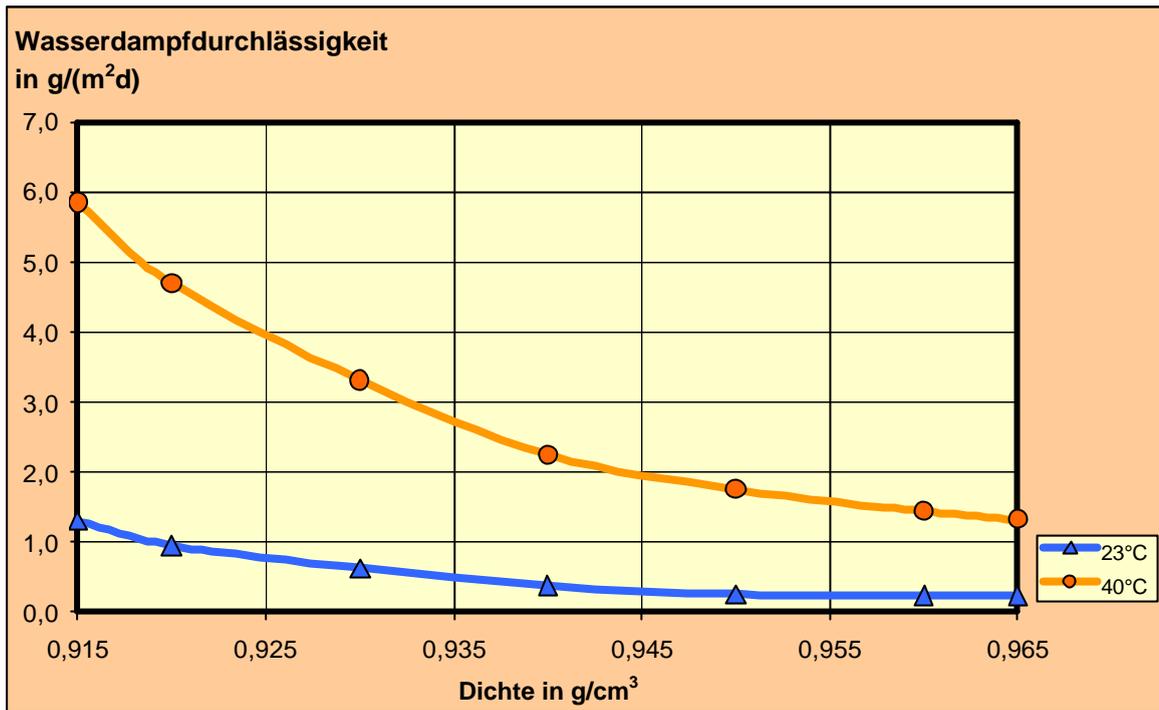


Abb. 2.4.4-1

Wasserdampfdurchlässigkeit von Polyethylen (PE) in Abhängigkeit von Dichte und Temperatur

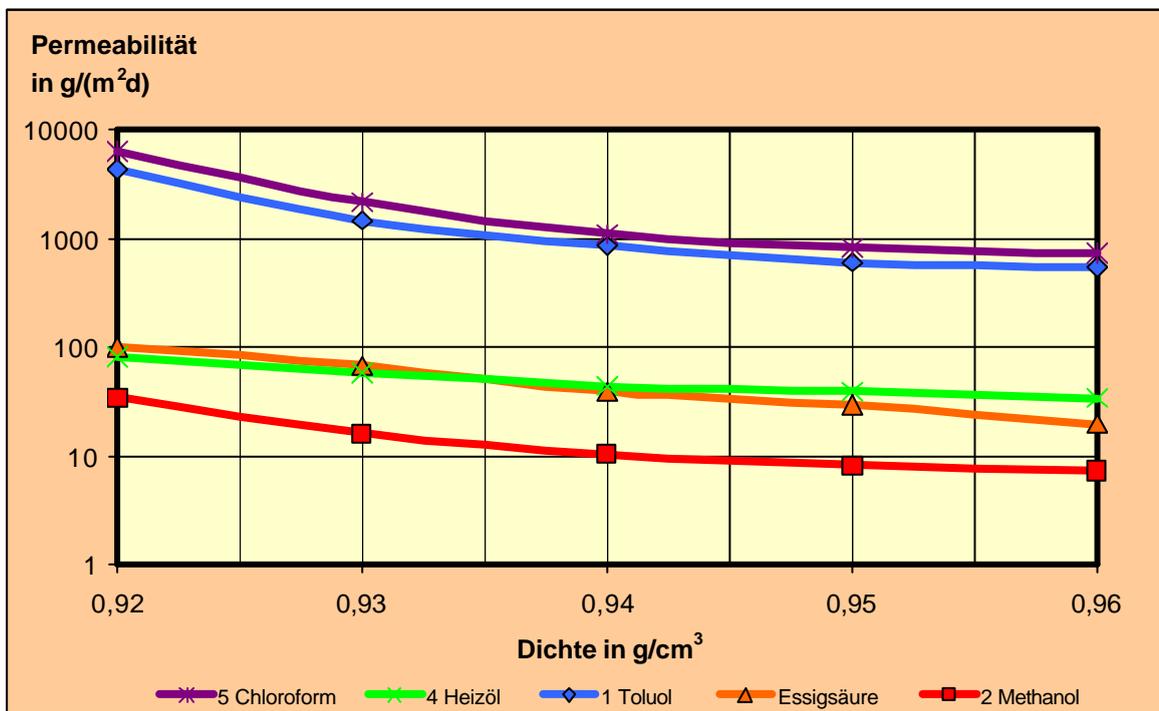


Abb. 2.4.4-2

Durchlässigkeit von Polyethylenfolien für verschiedene Flüssigkeiten in Abhängigkeit der Dichte

Betrachtet man die Durchlässigkeit einer Folie für Flüssigkeiten, so hängt diese stark von der Löslichkeit der Stoffe in dem jeweiligen Polymer ab, wird aber auch durch die chemische Verwandtschaft zwischen polymeren Folienmaterial und Lösungsmittel beeinflusst. So sind die unpolaren Folien aus PE und PP nur geringdurchlässig für polare Stoffe, während die Durchlässigkeit unpolarer Stoffe vergleichsweise größer ist.

Abbildung 2.4.4-2 zeigt die Durchlässigkeit von 500 µm dicken PE für verschiedene Flüssigkeiten in Abhängigkeit der Dichte bei 23 °C. Dabei ist anzumerken, dass die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten mit steigender Temperatur abnimmt, was zu größeren Mengen an Flüssigkeitsdurchtritt führt.

2.5 Kunststoffe für die Folienproduktion von Unterspannbahnen

2.5.1 Polyethylen

Polyethylen (kurz: PE) ist das bei weitem wichtigste Thermoplast zur Herstellung von Kunststoff-Folien. Die Bezeichnung „Polyethylen“ ist allerdings nur wenig aussagekräftig, da es eine unübersehbare Menge von PE-Produkten gibt, die sich zum Teil ganz erheblich voneinander unterscheiden. Es gibt drei Haupttypen von Polyethylen, die nach unterschiedlichen Verfahren hergestellt werden und auch jeweils bestimmte Eigenschaften aufweisen (Abbildung 2.5.1-1).

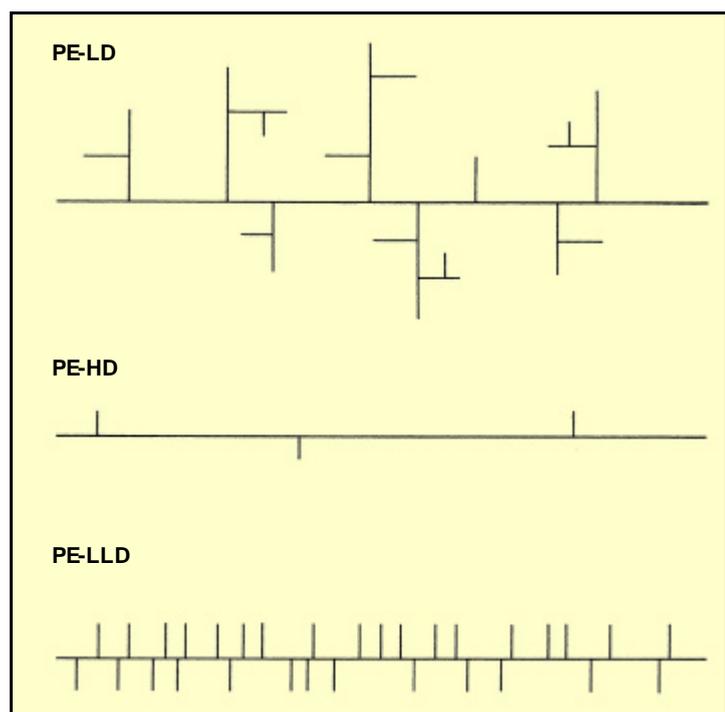


Abb. 2.5.1-1

Aufbau der Makromoleküle verschiedener PE-Typen

Polyethylen niedriger Dichte (PE-LD)

Polyethylen niedriger Dichte (PE-LD, low density) wird bei sehr hohem Druck (140-3500 bar) und bei hohen Temperaturen (200-300 °C) in Röhrenreaktoren oder Autoklaven hergestellt. Dabei dienen Peroxide oder Sauerstoff als Initiatoren. Die Eigenschaften von PE-LD sind durch die starken Verzweigungen der Polymerkette bedingt. Diese Struktur bedeutet eine geringe Kristallinität bei einer Dichte von ca. 0,925 g/cm³.

Polyethylen hoher Dichte (PE-HD)

PE-HD steht für Polyethylen hoher Dichte (HD, high density). Im Gegensatz zu PE-LD ist die Polymerkette des PE-HD weitgehend frei von Verzweigungen, was eine dichtere Packung der Makromoleküle und damit eine wesentlich höhere Kristallinität bedingt. Die Dichte beträgt ca. 0,96 g/cm³.

Folien aus PE-HD werden meist durch Blasfolienextrusion hergestellt. Sie haben gute mechanische Eigenschaften und sind beständig gegen chemischen Angriff. Ihre Durchlässigkeit für Sauerstoff ist sehr hoch und liegt für Folien von 40 µm Dicke je nach Kristallinität zwischen ca. 3000 und 5000 cm³/(m²dbar). Je höher die Dichte desto geringer die Luftdurchlässigkeit. Dies gilt ebenso für die Wasserdampfdurchlässigkeit, die bei Foliendicken von ebenfalls 40 µm bei 23 °C und 85 % relativer Feuchte zwischen 1,5 und 2,5 g/(m²d) liegt.

Linear aufgebautes Polyethylen (PE-LLD)

Ein linear aufgebautes Polyethylen mit niedriger Dichte (PE-LLD, linear low density) gleicht in seinen Eigenschaften denen eines PE-HD, besitzt aber die niedrigere Dichte des PE-LD.

Die Herstellung von PE-LLD und PE-LD erfolgt meist nach dem Blasfolienverfahren. Wird das im Vergleich zu PE-LD höher kristalline PE-LLD eingesetzt, so ergeben sich Folien mit erhöhter Zugfestigkeit. Die Struktur der Polymerkette bestimmt Kristallinität und Dichte, die beide in einer festen linearen Beziehung zueinander stehen (vgl. Abb. 2.3.3-1). Innerhalb der drei genannten Hauptgruppen (PE-LD, PE-HD und PE-LLD) gibt es eine Vielzahl von Polyethylenen, die sich aus Variationen im Herstellungsprozess und der Verwendung unterschiedlicher Katalysatoren und Zusatzmittel ergeben.

2.5.2 Polypropylen

Für eine genaue Betrachtung des Polypropylens (kurz: PP) muss die räumliche Gestalt der Moleküle berücksichtigt werden (Abb. 2.5.2-1). Man unterscheidet isotaktisches PP, bei dem alle oder nahezu alle Methylgruppen auf einer Seite der Kettenebene angeordnet sind, und antitaktisches PP, dessen Methylgruppen räumlich zufällig in der Polymerkette verteilt sind. Bei der syndiotaktischen Form des Polypropylens liegen die aufeinanderfolgenden Methylgruppen abwechselnd ober- und unterhalb der Molekülkette.

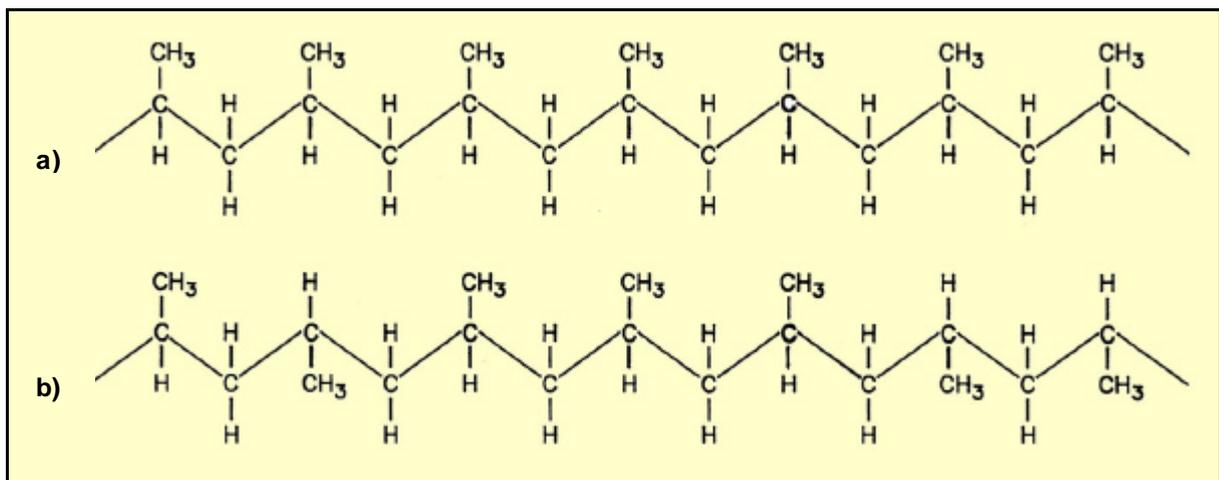


Abb. 2.5.2-1

Struktur des Polypropylens: a) isotaktisches PP; b) ataktisches PP

Isotaktisches Polypropylen wird aufgrund seiner hohen Kristallinität und seiner Dichte von $0,9 \text{ g/cm}^3$ bei der Herstellung von PP-Folien und gereckten PP-Folien bevorzugt. Der isotaktische Anteil in einem Polypropylen-Produkt bestimmt die Kristallinität und damit die Eigenschaften der Folie. In Abbildung 2.5.2-2 ist der Zusammenhang zwischen Kristallinität und E-Modul bei PP-Typen dargestellt.

Folien aus Polypropylen können als ungereckte, mono- oder biaxial gereckte Bahnen hergestellt werden. Ungereckte Folien werden meist durch Flachfolienextrusion hergestellt. Gegenüber den preiswerteren PE-Folien besitzen sie eine bessere Steifigkeit und Abriebsfestigkeit, sowie hohe Widerstandsfähigkeit gegen Öle und Wärme.

Monoaxial verstreckte PP-Folien werden direkt nach der Herstellung durch Extrusion einem Reckverfahren in Maschinenlängsrichtung unterworfen. Ihre mechanischen Eigenschaften werden dadurch in Längsrichtung wesentlich verbessert. Biaxial verstreckte Polypropylen-Folien (PP-BO, biaxial oriented) werden in Längs- und in Querrichtung der Bahn verstreckt.

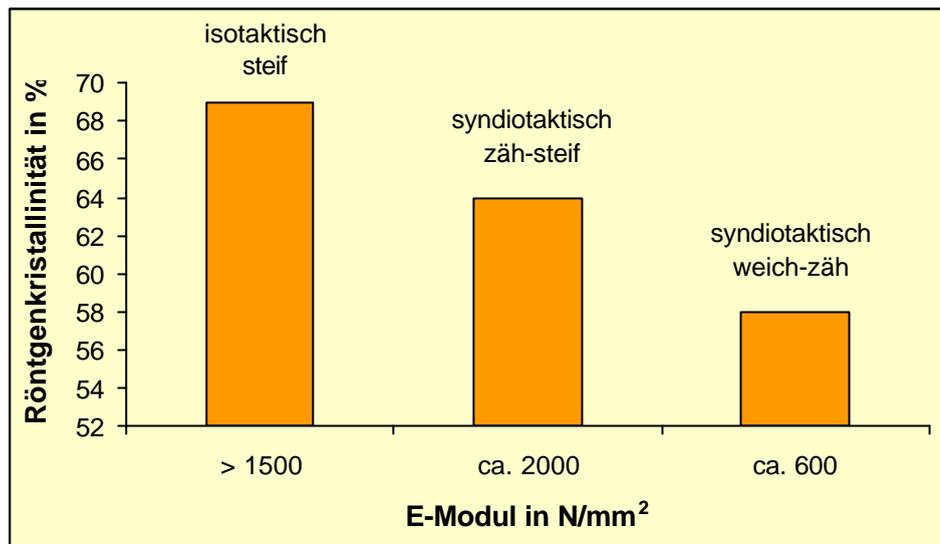


Abb. 2.5.2-2
Kristallinität und
E-Modul bei
verschiedenen
PP-Typen

Ziel ist, isotrope Folien zu erhalten, deren Eigenschaften in beide Richtungen in etwa gleich sind. Durch das biaxiale Reckverfahren werden Eigenschaften wie Reiß, Stoß und Durchstoßfestigkeit wesentlich verbessert. Die Folien sind unempfindlicher gegen Wasser und undurchlässiger für Wasserdampf. Weiterhin sind sie wärme- und kältebeständiger und besitzen eine gute Dimensionsstabilität.

2.6 Additive

Additive sind Hilfsmittel, die den zur Folienherstellung verwendeten polymeren Rohstoffen, schon während der Herstellung oder vor ihrer Verarbeitung zugesetzt werden. Sie haben insbesondere die Aufgabe, Folieneigenschaften und ihre Beständigkeit sowie die Verarbeitbarkeit der Polymere zu verbessern. Von der Vielzahl erhältlicher Additive sollen im Folgenden nur die beiden für Unterspannbahnen wichtigsten beschrieben werden.

2.6.1 Antioxidantien

Alle zur Herstellung von Folien verwendeten Polymere unterliegen bei der Einwirkung von Sauerstoff einem mehr oder weniger starken oxidativen Abbau. Dieser macht sich durch eine Verschlechterung der optischen und mechanischen Eigenschaften der Folien bemerkbar. Dabei sind insbesondere Folien aus PE und PP gefährdet.

Antioxidantien schützen Polymere während der thermoplastischen Verarbeitung, wo die Einwirkung von Sauerstoff wegen der erhöhten Temperatur besonders gefährlich ist. Sie werden aber auch dort eingesetzt, wo es auf die langfristige Erhaltung guter mechanischer Eigenschaften ankommt.

2.6.2 Lichtschutzmittel

Lichtschutzmittel sollen polymere Folien vor der schädigenden Einwirkung von Licht schützen. Für eine nachhaltige Materialschädigung ist überwiegend die UV-Strahlung im Wellenlängenbereich von 300-450 nm verantwortlich. Für Polyethylen und Polypropylen wurden Wellenlängenbereiche von 300 nm für PE und 370 nm für PP ermittelt, bei denen ein maximaler photochemischer Abbau eintritt.

Man unterscheidet Lichtschutzmittel nach ihrem Wirkungsmechanismus:

- a) UV-Absorber wandeln den UV-Anteil der Lichtstrahlung nach Absorption in Wärmeenergie um. Da sie zum Schutz der Substrate eine gewisse Absorptionstiefe (Mindestschichtdicke) aufweisen müssen, sind sie für den Lichtschutz von Folien nur bedingt geeignet. Als UV-Absorber werden Hydroxybenzophenone und Hydroxyphenylbenzotriazole verwendet.
- b) Hydroperoxid-Zersetzer beseitigen Spuren der aus den Polymerisationsreaktionen im Polymer nach vorhandenen Hydroperoxide, die den photooxidativen Abbau beschleunigen. Wirksame Substanzen sind Metallkomplexe von organischen Schwefelverbindungen.
- c) Quencher löschen die Energie, die durch die im Polymer vorhandenen Chromophore absorbiert wird und die zur Beschleunigung des Abbaus beiträgt. Die „angeregten“ Makromoleküle werden durch die Quencher in den Grundzustand zurückgeführt. Wirkstoffe sind zum Beispiel Nickelkomplexe von Phenolen und Thiophenolen.
- d) Radikalfänger machen freie Radikale, die beim Ablauf der Abbaureaktionen eine entscheidende Rolle spielen, unschädlich. Hier haben die sterisch gehinderten Amide (HALS, hindered amines light stabilizer) für die Lichtstabilisierung von Folien besondere Bedeutung erlangt.

Die Wirkung der unter b, c und d genannten Produkte ist nicht an das Vorhandensein einer Mindestschichtdicke gebunden, weshalb die nach diesen Mechanismen wirkenden Substanzen besonders zur Lichtstabilisierung von Folien wichtig sind.

3 Alterung und Degradation von Kunststoffen

Gemäß Definition nach DIN 50 035 [30], [31] versteht man unter Alterung die Gesamtheit aller im Laufe der Zeit in einem Material irreversibel ablaufenden physikalischen und chemischen Vorgänge, die zu Alterungsphänomenen führen. Dabei kann zwischen innerer und äußerer Alterung unterschieden werden:

- innere Alterung: Nachkristallisation, Relaxation (Abbau innerer und äußerer Spannungen), Wanderung von niedermolekularen Bestandteilen
- äußere Alterung: oxidativer Abbau, Quellung, Hydrolyse, etc.

Nachfolgend sollen insbesondere die durch Umwelteinflüsse hervorgerufenen Vorgänge der äußeren Alterung betrachtet werden. Die infolge einer natürlichen Bewitterung hervorgerufenen chemischen und physikalischen Alterungsvorgänge bestimmen maßgeblich das Langzeitverhalten und die Dauerhaftigkeit von Baustoffen. Bei der natürlichen Bewitterung sind hinsichtlich der äußeren Alterungsursachen folgende Parameter von Bedeutung:

- Sonnenstrahlung
 - Spektrale Energieverteilung
 - Bestrahlungsstärke
- Atmosphäre
 - Wasser/Feuchtigkeit (Luftfeuchte, Regen, Schnee, Eis, Tau)
 - Sauerstoff
- Wärme
- Mechanische Belastung

Jeder dieser hier aufgeführten Punkte führt zur Alterung von Baumaterialien, wobei für die praktische Anwendung von Kunststoffen bzw. Kunststoff-Folien die thermische Alterung (Wärme) und die Photodegradation (fasst UV-Degradation durch Sonnenstrahlung sowie atmosphärische Einflüsse wie Wasser/Feuchtigkeit und Sauerstoff zusammen) besondere Bedeutung besitzen. Das Ausmaß der eintretenden Alterungserscheinungen wird beeinflusst durch die absolute Größe und die Dauer der aufgeführten Beanspruchungen.

3.1 Autooxidation

Unter Autooxidation wird die autokatalytische Oxidation von Polymeren verstanden [51]. Diese unterliegen, wie bereits in Abschnitt 2.6.1 ausgeführt, bei der Einwirkung von Sauerstoff einem mehr oder weniger starken oxidativen Abbau. Vor allem Wärme, UV-Strahlung und Scherbeanspruchungen bei der plastischen Verarbeitung können durch die Bildung freier Radikale und/oder peroxidische Oxidation den Abbau von Polymeren einleiten. Die danach folgenden komplexen chemischen Reaktionen verändern die Masse des Polymeren durch Spalten oder Vernetzen und führen weiterhin zu einer Verschlechterung der optischen und mechanischen Eigenschaften.

Die Oxidationsempfindlichkeit der einzelnen Kunststoffe ist unterschiedlich und wird von der chemischen Struktur beeinflusst. Dabei sind Polymere mit gesättigter, unverzweigter Kohlenwasserstoffkette oxidationsbeständiger als verzweigte Polymere oder Polymere mit Doppelbindungen. Die zur Herstellung von Unterspannbahnen verwendeten Polyethylene und Polypropylene sind stärker oxidationsgefährdet.

Oxidative Vorgänge beginnen stets an der Oberfläche eines Kunststoffbauteils, weil dort die Bestrahlungsintensität am höchsten ist und das Angebot an Sauerstoff nicht durch den Diffusionswiderstand des Kunststoffs begrenzt ist. Des Weiteren finden sich an der Oberfläche von Kunststoffbauteilen oft vom Herstellungsprozess herrührende Modifikationen der polymeren Grundstruktur (z.B. Carbonylgruppen ($>C=O$) oder Peroxide ($-O-O-$), die die Einleitung oxidativer Prozesse erleichtern.

Als Startreaktion der Oxidation ist eine direkte Reaktion reinen Sauerstoffs mit einem Polymer in der Regel nicht möglich, da die Abspaltung von Substituenten einen endothermen Vorgang mit nicht unerheblichem Energieaufwand darstellt. Jedoch kann bei einer sensibilisierten Oxidation angeregter Sauerstoff direkt mit dem Kunststoff reagieren (siehe Abschnitt 3.2.2.2). Sicher ist allerdings, dass die Anwesenheit von Hydroperoxiden ($-OOH$) im Polymer verantwortlich sind für die eigentliche Startreaktion oxidativer Abbaureaktionen.

In der Regel verläuft die Oxidation radikalisch. Der dabei ablaufende Oxidationsmechanismus kann für viele Polymere allgemein durch den auf BOLLAND und GEE zurückzuführenden Mechanismus beschrieben werden (Abb. 3.1-1). Das dort entwickelte Reaktionsschema des oxidativen Abbaus von Polymeren geht von einer Radikalbildung als Initiierungsphase, einer Bildung von Peroxiden als Beginn fortpflanzender Abbaureaktionen sowie möglicher kettenabbrechender Reaktionen als Abschluss des Vorgangs aus.

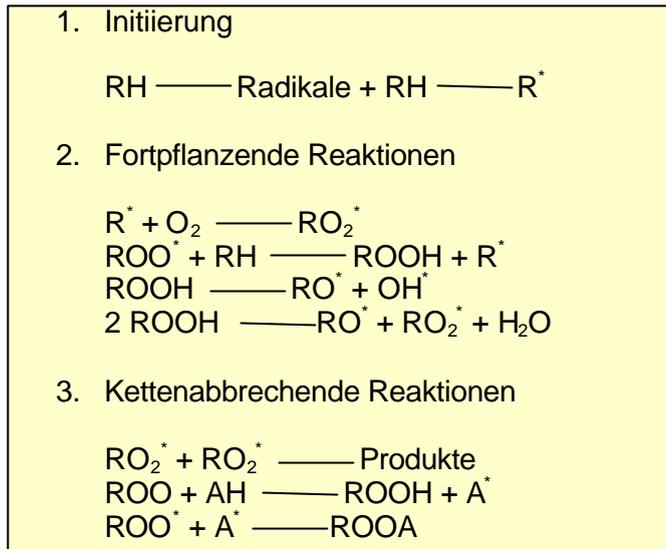


Abb. 3.1-1

Reaktionsschema des oxidativen Abbaus von Polymeren nach BOLLAND und GEE [70]

Die zum Ablauf der Oxidation notwendige Aktivierungsenergie zur Initiierung des Vorgangs kann im Allgemeinen durch

- thermische Energie (Wärme),
- Strahlungsenergie,
- mechanische Belastung und/oder
- chemische Energie (katalytische Wirkung von Metallionen)

zugeführt werden. Dabei kommt vor allem der Sonnenstrahlung als Energielieferant eine dominierende Rolle bei der Oxidation polymerer Baustoffe zu. Die diese Kombination umfassende Reaktion wird als Photooxidation bezeichnet. Sie stellt für nahezu alle Kunststoffe die maßgebende Reaktion dar, die zu Alterungserscheinungen führt (siehe Abschnitt 3.1.2).

Die relevanten Reaktionen im Zyklus der Autooxidation können Abbildung 3.1-2 entnommen werden, während die Initiierung des Vorgangs folgende Reaktionsschritte beinhaltet [42]:

1. Die Reaktion setzt mit der Bildung von Radikalen R^\bullet (Moleküle mit einem ungepaarten Elektron) infolge verschiedener Belastungen ein:
 - Scherung (τ) bei der Verarbeitung
 - Wärme, thermische Energie (T)
 - energiereiche Lichtstrahlung ($h\nu$)
 - Einfluss von (redox-aktiven) Metallionen M^{n+} , z.B. Katalysatorrückstände (Titan, Chrom, Aluminium, Eisen) oder von außen wirksame Metallionen (Eisen, Kupfer)

- Kohlenwasserstoffhaltige Polymerketten bilden aliphatische Radikale (C-Atom enthält ein ungepaartes Elektron).
2. Sauerstoff in seiner diradikalischen Triplett-Form reagiert mit gebildeten Alkylnradikalen sofort (praktisch ohne Aktivierungsenergie) zum Peroxyradikal $\text{ROO}\cdot$.
 3. Die Reaktion vom Peroxyradikal mit RH zum Hydroperoxid ROOH ist geschwindigkeitsbestimmend.
 4. Der autokatalytischen Kettenreaktion steht nach der Bildung von ROOH kaum mehr etwas entgegen. Redox-aktive Metallionen M^{n+} katalysieren den Abbau von Hydroperoxiden zusätzlich.

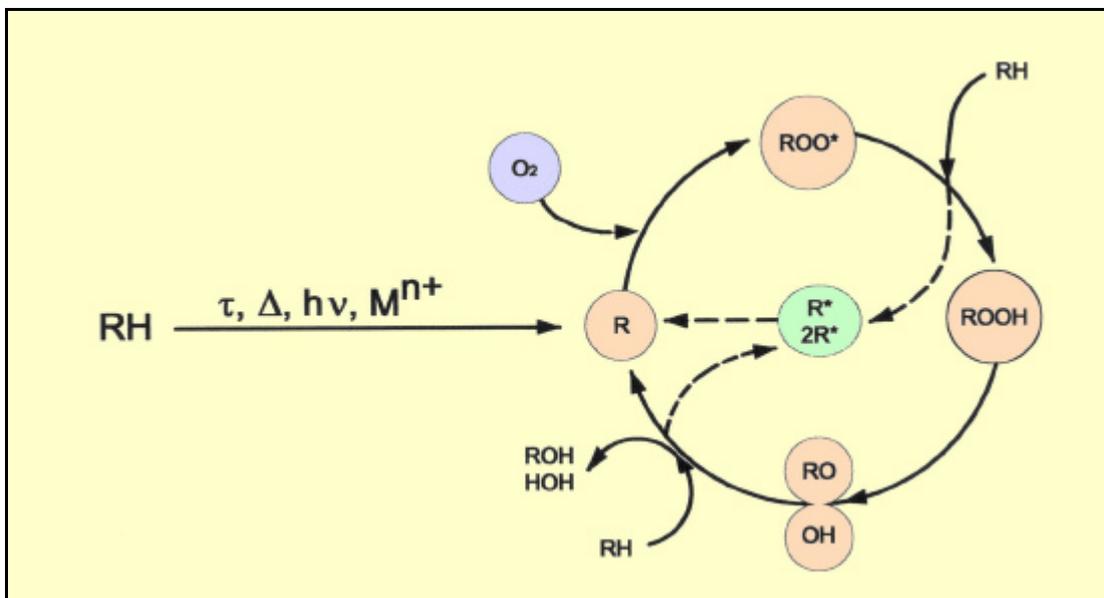


Abb. 3.1-2

Autooxidationszyklus mit den die Oxidation betreffenden relevanten Reaktionen [42]

Aufgrund der Bildung von Hydroperoxiden kommt es bei der Autooxidation zu einer Verzögerung der nachfolgenden Kettenreaktion. Erst nach dieser so genannten Induktionsperiode können schnell nacheinander ablaufende Veränderungen verschiedener relevanter Materialeigenschaften beobachtet werden (Abb. 3.1-3).

Hydroperoxide können sich allerdings auch schon bei der Herstellung der Kunststoffe bilden. Sie absorbieren Strahlung oberhalb von $\lambda = 290 \text{ nm}$, deren Energieinhalt ausreicht, die peroxidische Sauerstoffbindung ($-\text{O}-\text{O}-$) sowie die Bindung der Perhydroxylgruppe ($-\text{OOH}$) an der Kunststoffhauptkette zu spalten. Die Spaltung der Hydroperoxide in Radikale ist eine andere maßgebende Einwirkungsmöglichkeit der Strahlung. Hydroperoxide weisen eine starke, initiierende Wirkung auf die Photooxi-

ation, insbesondere in ihrer Frühphase auf. Aus der Photolyse der Hydroperoxide entstehen vor allem Alkoxy-Radikale (RO) und Hydroxyl-Radikale ($-OH$), die dem Molekül weiteren Wasserstoff entziehen und dabei neue Radikale erzeugen. Die Oxidation des Polymers in Folge der Hydroperoxidbildung verläuft nach der Hydroperoxidzersetzung automatisch weiter. Dieser Vorgang wird als Autoxidation bezeichnet [51].

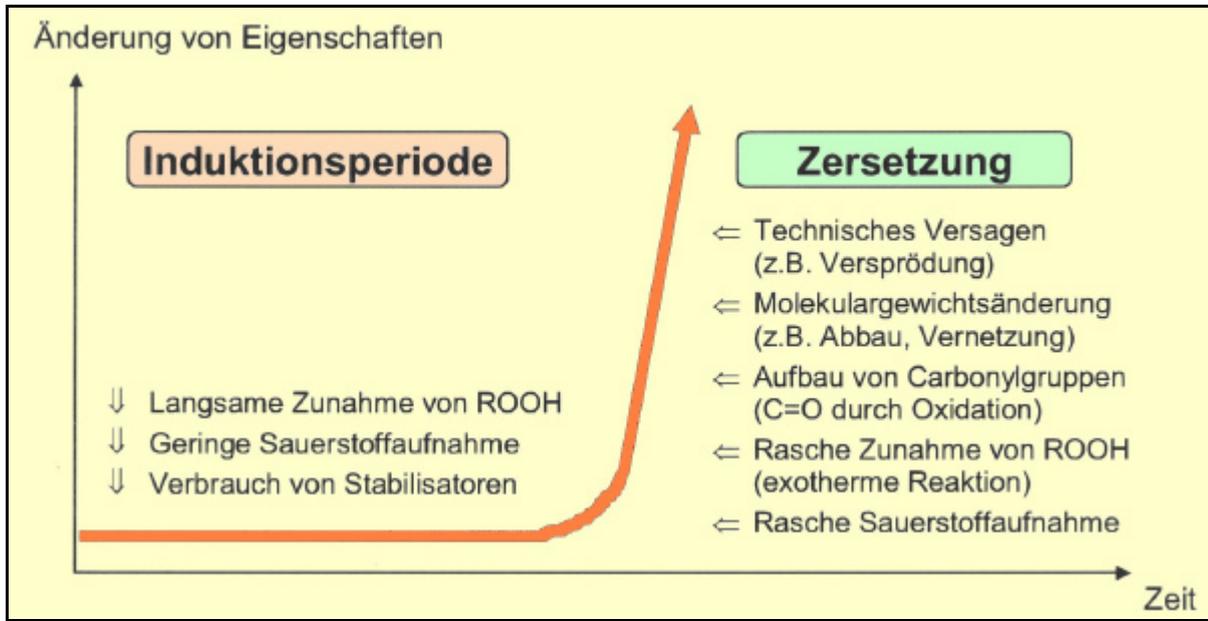


Abb. 3.1-3

Nach der Induktionsperiode eintretende Veränderungen der Materialeigenschaften [42]

Betrachtet man die Autoxidation insgesamt, so ist sie eine Reaktion zwischen einem Gas (Sauerstoff O_2) und einer festen Phase (Polymer). Diffusion und Löslichkeit des Sauerstoffs sind materialabhängig und beeinflussen die Oxidationsreaktionen maßgebend [42]:

- Bei Raumtemperatur an Luft sind Polymerwerkstoffe üblicherweise gesättigt mit Sauerstoff, was zu einer relativ von Schichtdicken unabhängigen, homogenen Alterung des Materials führt.
- Bei einer thermischen Verarbeitung oder bei stark beschleunigenden Wärmealterungen (hohe Temperaturen) an dicken Materialproben kann in der Induktionsperiode der hohe O_2 -Verbrauch zu einem lokalen O_2 -Mangel führen, wenn durch Diffusion nicht genügend rasch Sauerstoff nachgeliefert werden kann. Dadurch verläuft die gestartete Kettenreaktion weniger oxidativ (z.B. im Inneren eines Bauteils).

- Die Diffusion von Sauerstoff hängt von der Möglichkeit ab, freie Volumina im Material zu bilden. Je beweglicher die Polymerkettensegmente, d.h. je größer die Differenz $T_{\text{Anwendung}} - T_g$, umso höher ist die Diffusionsrate.
- Sauerstoff ist nur in amorphen Zonen löslich, weshalb kristalline Zonen gegenüber der Autooxidation deutlich inerte sind.

Die durch die Autooxidation als Alterungsprozess ausgelösten chemischen und physikalischen Materialveränderungen sind in der Regel nicht reversibel.

3.1.1 Thermische Alterung

Die thermische Alterung (Wärmealterung) umfasst die Vorgänge der thermooxidativen Veränderung von Materialeigenschaften durch Wärmeenergie in Anwesenheit von Sauerstoff. Dabei sind die Temperaturen an der Oberfläche eines Bauteils im Allgemeinen abhängig von:

- Temperatur der umgebenden Luft,
- Luftgeschwindigkeit,
- Intensität der Strahlung,
- Dauer der Bestrahlung,
- thermischen Eigenschaften des jeweiligen Kunststoffs: Oberflächenreflexionsgrad, Absorptionskoeffizient, Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität.

Die durch Temperatureinflüsse hervorgerufenen Schädigungen des Kunststoffs, werden entweder durch Kettenabbau oder durch Vernetzung der Kettenmoleküle herbeigeführt. Die dadurch bewirkten Reaktionen verursachen bei PE und PP eine Versprödung und Vergilbung, eine Veränderung der Reißfestigkeit und -dehnung sowie Schlagzähigkeit und Biegefestigkeit, was sich durch entsprechende Messungen überprüfen lässt.

3.1.1.1 Physikalische Wirkungen erhöhter Temperatur

Der physikalische Einfluss der Temperatur ist insbesondere bei lastabtragenden Bauteilen von Bedeutung, da die Verformungskennwerte von Kunststoffen in einem größeren Maße temperaturabhängig sind als diejenigen klassischer Baustoffe. Für dünne Folienmaterialien ist dies eher von untergeordneter Bedeutung. Allerdings können diese erhöhten Temperaturen – in Relation zum Normklima von 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte – zu Veränderungen der Kristallinität führen, wovon die

Durchlässigkeit des jeweiligen Kunststoffs gegenüber Flüssigkeiten und Gasen betroffen ist.

3.1.1.2 Chemische Wirkungen erhöhter Temperatur

Es ist allgemein bekannt, dass durch die Zufuhr von Wärme die Reaktionsbereitschaft chemischer Systeme erhöht wird. Die Energiezufuhr bewirkt in der Regel eine Beschleunigung chemischer Vorgänge, die für einfache Einzelreaktionen in guter Näherung mit der ARRHENIUS-Gleichung der chemischen Reaktionskinetik beschrieben werden kann:

$$k = A \cdot e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (3.1.1.2-1)$$

- mit: k Geschwindigkeitskonstante (einer Reaktion) in 1/(mols)
 A Konstante für die jeweilige Reaktion in 1/(mols)
 E_a Aktivierungsenergie in J/mol
 R ideale Gaskonstante in J/(molK)
 T absolute Temperatur in K.

Diese Beziehung ist jedoch nicht auf ein System gekoppelter Reaktionen übertragbar, wie es bei der komplexen Beanspruchung im Zuge der Bewitterung von Kunststoffen im Bauwesen entsteht. Eine Extrapolation der Erkenntnisse über das Materialverhalten bei normalen Temperaturen auf Materialveränderungen bei höheren Temperaturen mit Hilfe der ARRHENIUS-Beziehung ist demnach nicht oder nur schwer möglich [42].

Weiterhin ist zu beachten, dass viele Abbaureaktionen an die Diffusion der Reaktionspartner gebunden sind. Deren Temperaturabhängigkeit muss jedoch nicht dem einfachen Gesetz der chemischen Reaktionskinetik gehorchen.

Die bei witterungsbedingten Materialveränderungen maßgebenden Reaktionen sind in unterschiedlichem Umfang temperaturabhängig. So sind die photochemischen Grundprozesse (Primärreaktionen: Absorption eines Strahlungsquants und Erzeugung eines angeregten Zustandes) manchmal temperaturunabhängig, während die Folgeprozesse (sekundäre photochemische Prozesse) gegebenenfalls von der Temperatur beeinflusst werden können (siehe Abschnitt 3.1.2).

Der thermooxidative Abbauprozess gewinnt vor allem bei künstlichen Bewitterungsversuchen an Bedeutung, bei denen zur beschleunigten Alterung Temperaturen deutlich oberhalb üblicher praxisrelevanter Gebrauchstemperaturen eingestellt

werden. Allerdings muss hier beachtet werden, dass es dabei zu Eigenschaftsveränderungen kommen kann, die bei natürlicher Bewitterung nicht zu beobachten sind (Praxisirrelevanz).

3.1.2 Photodegradation

Die Photodegradation beschreibt die photochemischen Abbauprozesse bei Polymeren. Eine auf diese Weise hervorgerufene Alterung entsteht hauptsächlich durch die Beeinflussung der Materialien durch Lichtenergie (Photonen, $h\nu$), was überwiegend bei Außenanwendungen von Werkstoffen der Fall ist. Die durch die natürliche Bewitterung ausgeübten Belastungen auf das Material umfassen die folgenden Parameter [53]:

- Strahlungsquelle
- Strahlungsintensität
- Strahlungszyklus (z.B. Tag-Nacht)
- Außentemperatur (– 30 bis + 50 °C)
- Luftfeuchtigkeit
- Sauerstoff
- Industrielle Schadstoffe (Schadgase: SO_2 , NO_x , HCl , O_3 , saure Niederschläge: H_2SO_4 , HNO_3 , HCl ; Aerosole und chemisch beladene Russpartikel)
- Materialspezifische Einflüsse
- Lichtabsorption (speziell im UV-Bereich, aber auch Eigenfarbe)
- Abbauempfindlichkeit in Abhängigkeit der Wellenlänge λ
- Temperatur der Probe (beeinflusst durch Strahlungsgrößen, Eigenfarbe und Außentemperatur, Probetemperaturen bis 100 °C möglich)

3.1.2.1 Spektrale Energieverteilung und Bestrahlungsstärke der Sonne

Das von der Sonne ausgehende Energiespektrum umfasst nahezu alle Bereiche der optischen Strahlung. In diesem Wellenlängenbereich, der von $\lambda = 100$ nm bis $\lambda = 10^6$ nm reicht, lassen sich die physikalischen Gesetze der Optik anwenden. Dabei werden die Wellenlängen der optischen Strahlung in folgende Spektralbereiche aufgeteilt:

- Ultraviolettstrahlung (UV): $\lambda = 100$ nm – 380 nm
- Licht (VIS): $\lambda = 380$ nm – 780 nm
- Infrarotstrahlung (IR): $\lambda = 780$ nm – 10^6 nm

Tabelle 3.1.2.1-1 zeigt neben der Einteilung in Spektralbereiche ebenfalls eine Einordnung der verschiedenen Wellenlängen in Spektralgebiete, die aufgrund praktischer Überlegungen aber auch infolge unterschiedlicher strahlungsbedingter Effekte sinnvoll erscheinen.

Das von der Sonne ausgestrahlte Energiespektrum ist in seiner spektralen Zusammensetzung weitgehend konstant. Das emittierte Emissionsspektrum gleicht dem eines „schwarzen Strahlers“ mit der Temperatur $T \approx 6000 \text{ K}$, der nach der PLANCK’schen Strahlungsformel ein Energiemaximum bei derselben Wellenlänge wie die Sonnenstrahlung hat [85].

Das Jahresmittel der Gesamtbestrahlungsstärke der extraterrestrischen Sonnenstrahlung am oberen Rand der Erdatmosphäre wird als Solarkonstante E_0 bezeichnet. Diese wird von der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) in ihrer „Empfehlung für die Gesamtbestrahlungsstärke und die spektrale Verteilung künstlicher Sonnenstrahlung für Prüfzwecke“ mit $E_0 = 1,35 \text{ kW/m}^2$ angegeben.

Tabelle 3.1.2.1-1

Einstufung der Sonnenstrahlung in Spektralbereiche und Spektralgebiete nach DIN 5031 Teil 7

Grenzwellenlänge nm	Spektralbereich	Spektralgebiet	
100	UV	UV-C	VUV
200			FUV
280		UV-B	
315		UV-A	
380	VIS	VIS	
400			
780	IR	IR-A	NIR
1400		IR-B	
3000		IR-C	MIR
$5 \cdot 10^4$			FIR
$5 \cdot 10^6$			

Auf dem Weg durch die Atmosphäre wird die spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung durch Absorption und Streuung verändert. Vor allem durch Wasserdampf, Sauerstoff und Kohlendioxid wird eine meist selektive Absorption verursacht, woraus sich Bandlücken ergeben. Lediglich Ozon absorbiert in einem breiten Spektrum von 200 bis 700 nm und filtert somit, wie Abbildung 3.1.2.1-1 zeigt, einen großen Teil der UV-Strahlung (links des sichtbaren Bereichs) aus.

Die auf die Erdoberfläche gelangende untere Grenzwellenlänge variiert je nach Jahreszeit, Anteil an Aerosolteilchen in der Luft, Winkel der Sonneneinstrahlung – um nur einige maßgebende Parameter zu nennen – zwischen 288 und 305 nm.

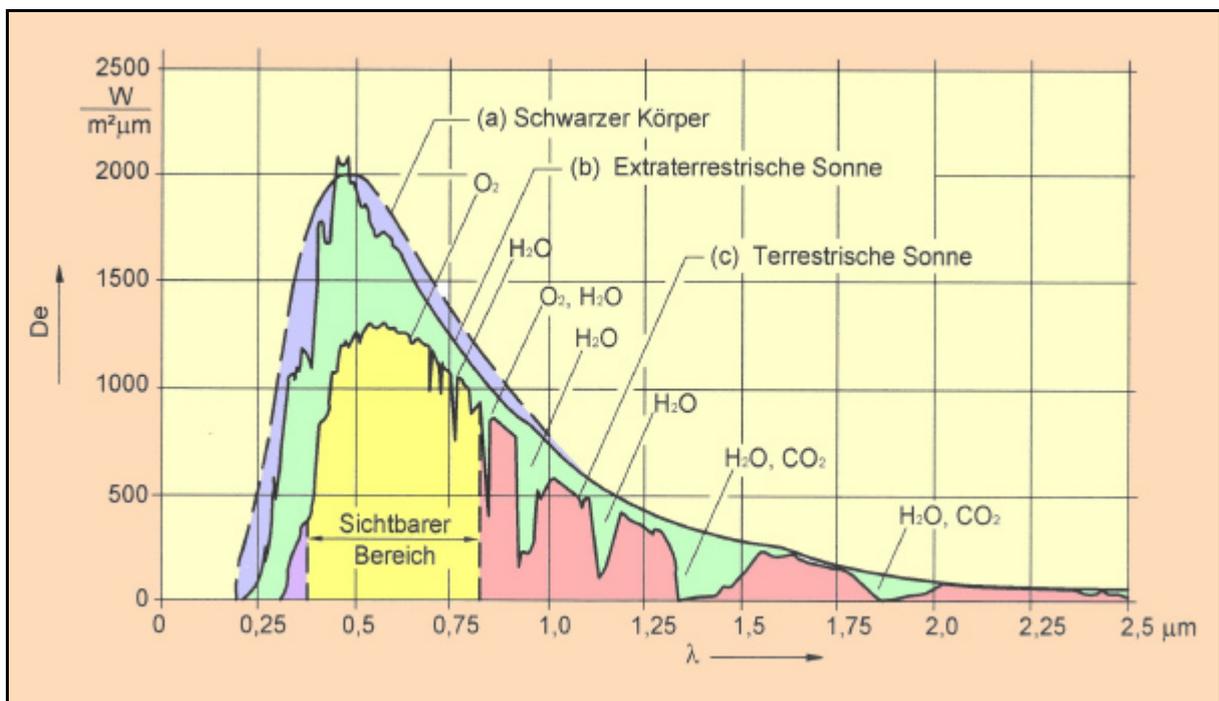


Abb. 3.1.2.1-1

Spektrum eines „schwarzen Strahlers“ (a), der Sonnenstrahlung über der Atmosphäre (b) und auf der Erdoberfläche (c) [85]

Die in Abbildung 3.1.2.1-1 dargestellte terrestrische Spektralverteilung stellt die auf die Erdoberfläche gelangende direkte Sonnenstrahlung (für senkrechten Sonnenstand) dar. Neben dieser direkten Sonnenstrahlung gelangt allerdings noch fast die Hälfte der in der Atmosphäre gestreuten Sonnenstrahlung (so genannte RAYLEIGH-Streuung) als diffuse Sonnenstrahlung (Himmelsstreuung) auf die Erdoberfläche. Die Summe aus direkter und diffuser Sonnenstrahlung wird als Globalstrahlung bezeichnet. Neben der Summe der spektralen Verteilungen trifft die Addition auch auf die Summe der Bestrahlungsstärken zu.

Hinsichtlich der Bestrahlungsstärke hängt die Globalstrahlung für einen bestimmten Ort auf der Erdoberfläche im Wesentlichen von dessen geographischer Breite und dem Sonnenstand ab. Darüber hinaus beeinflussen örtliche Klimaverhältnisse die Bestrahlungsverhältnisse in erheblichem Umfang.

Insbesondere sind zu nennen:

- Bewölkung (Reflexion der Sonnenstrahlung),
- Luftfeuchtigkeit (Absorption langweiliger Strahlung),
- Luftverschmutzung (Streuung insbesondere der kurzweiligen Strahlung an Molekülen und Aerosolteilchen sowie Absorption kurzweiliger Strahlung durch SO_2 , NO_2 und andere Spurengase).

Die Gesamtbestrahlungsstärke E_T der Globalstrahlung wird – für einen senkrechten Sonnenstand an einem wolkenlosen Tag und einer hinsichtlich des Anteils an Aerosolteilchen, Wasserdampf und Ozon normalen Zusammensetzung der Erdatmosphäre – mit folgendem Wert angegeben [79]:

$$E_T = 1,12 \text{ kW/m}^2$$

Die Globalstrahlung für senkrechten Sonnenstand verteilt sich unter Berücksichtigung sämtlicher Absorptions- und Streuverluste wie folgt auf die drei Strahlungsbereiche:

- IR-Bereich (780 bis 3000 nm): 44 %
- sichtbarer Bereich (380 bis 780 nm): 52 %
- UV-Bereich (280 bis 380 nm): 4 %.

3.1.2.2 Auswirkung der Sonnenstrahlung auf Kunststoffbauteile

Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Spektralbereiche der Sonnenstrahlung können verschiedene Auswirkungen auf Kunststoffbauteile haben. Je nach Kunststoffart kann die einfallende Strahlung mehr oder weniger

- von der Oberfläche reflektiert,
- im Inneren des Kunststoffs gestreut,
- vom Kunststoff durchgelassen oder
- vom Kunststoff absorbiert

werden.

Dabei kann ein durch Photooxidation hervorgerufener Polymerabbau nur dann stattfinden, wenn eine Absorption der Strahlung durch den Kunststoff erfolgt. Somit ist das Vorhandensein von lichtabsorbierenden Atomgruppen (den so genannten Chromophoren) in den Makromolekülen oder in den Zusatzstoffen (oder auch in Verunreinigungen) Grundvoraussetzung für die Initiierung photochemischer Reaktionen.

Allgemein betrachtet sind Chromophore Atomgruppen mit Doppelbindungen, die aus der Strahlung durch π -Elektronen einen gewissen Wellenlängenbereich absorbieren. Dies können zum Beispiel Carbonylgruppen oder Kohlenstoffdoppelbindungen ($>C=C<$) sein [51].

Das Ausmaß der durch die Chromophoren hervorgerufenen Absorption hängt von der chemischen Zusammensetzung des Kunststoffs ab. Bei Kunststoffen, deren funktionelle Bindungen in der Hauptkette chromophore Gruppen sind, führt die Photolyse dieser Bindungen allein schon zu deutlichen Veränderungen mechanischer Eigenschaften. Allerdings wird nicht nur Strahlung einer bestimmten Wellenlänge absorbiert, vielmehr absorbieren Kunststoffe Strahlung eines bestimmten Wellenlängenbereichs in unterschiedlicher Intensität. Jeder Kunststoff besitzt dabei eine ihm eigene spezifische spektrale Absorption, die durch das Verhältnis der absorbierten Strahlungsleistung zur auffallenden Strahlungsleistung wiedergegeben werden kann.

Mit der vom Kunststoff absorbierten Strahlung steigt der Energieinhalt der absorbierenden Moleküle. Dadurch geht das Elektron der äußeren Schale des betreffenden Moleküls kurzzeitig in einen höheren Energiezustand über. Den angeregten Zustand kann das Molekül dann entweder durch Emission von Licht oder durch Eingehen einer chemischen Reaktion (photochemische Reaktion) wieder verlassen.

Wird der angeregte Zustand jedoch beibehalten besteht weiterhin die Möglichkeit, dass die aufgenommene Energie entlang der Molekülkette weitergeleitet wird und es dann an einer anderen Stelle als der des Strahlungseinfalls im Makromolekül zu einer (photochemischen) Reaktion kommt. Demnach können auch Bindungsgruppen betroffen sein, die ursprünglich die auftreffende Strahlung nicht direkt absorbiert haben, aber auf die übertragene Energie reagieren.

Mit der Energieaufnahme ist eine Veränderung der Schwingungs- und Rotationszustände der Atome bzw. Moleküle im Makromolekül verbunden. Es kommt zu einem Zerfall des Moleküls in kleinere Moleküle oder kleinere Moleküle und freie Radikale oder auch in zwei freie Radikale, wenn die aufgenommene Schwingungsenergie

3 Alterung und Degradation von Kunststoffen

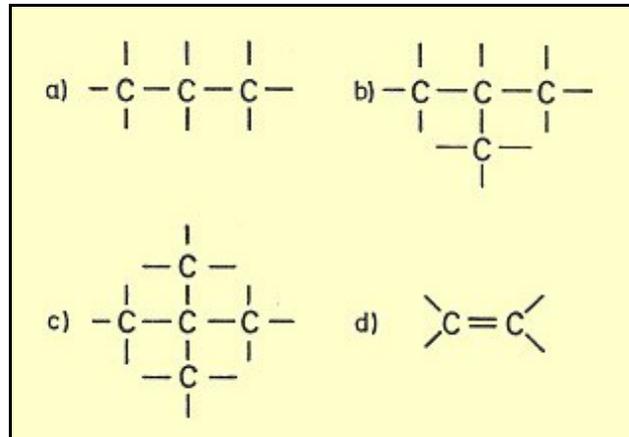
größer ist als die Bindungsenergie (Dissoziationsenergie) der Hauptvalenzbindung. Aus Abbildung 3.1.2.2-1 ist zu entnehmen, dass die Bindungsenergie der C-Bindungen in der Hauptkette eines Polymeren dabei primär von der Anzahl der an das C-Atom gebundenen weiteren C-Atome abhängig ist. Tertiäre und quartäre C-Atome weisen dabei geringere Bindungsenergien auf als sekundäre.

Abb. 3.1.2.2-1

Bindungsenergie E von Kohlenstoffatomen in der Hauptkette eines Polymeren [51]

- a) sekundäres C-Atom
- b) tertiäres C-Atom
- c) quartäres C-Atom
- d) C-Doppelbindungen

$$E_a > E_b > E_c > E_d$$



Photochemische Reaktionen werden auch durch „Verunreinigungen“ auf molekularer Ebene (z.B. eingebaute oder angelagerte Fremdatome, Unregelmäßigkeiten im Aufbau der Kette etc.) oder durch Zusatzstoffe (Pigmente) ausgelöst. Aus diesem Grund treten auch bei manchen Kunststoffen, die in reiner Form im Bereich der Globalstrahlung keinerlei nachhaltige Absorption zeigen, Alterungserscheinungen auf. Eine allgemeine Darstellung der Einzelschritte des photochemischen Abbaus von Polymeren bei der Bewitterung ist in Abbildung 3.2.2.2-2 dargestellt.

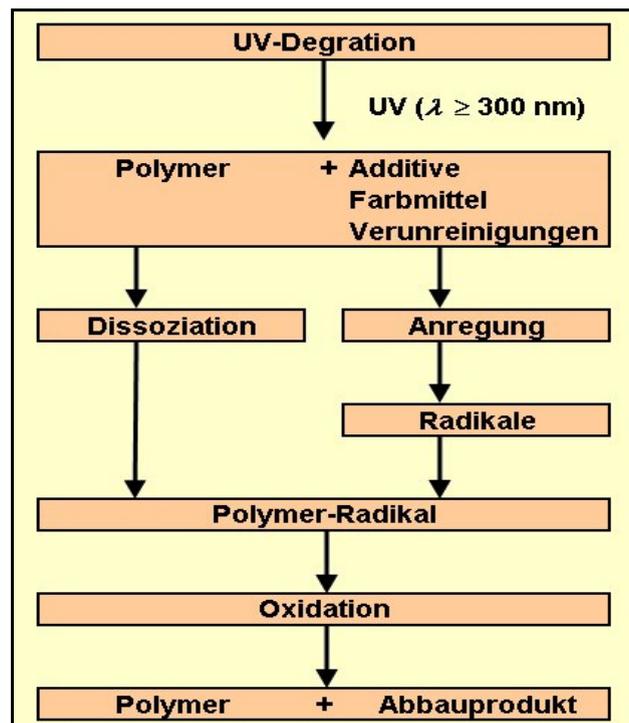


Abb. 3.2.2.2-2

Generalisierte Gesamtfolge der Reaktionen des photooxidativen Abbaus von Polymeren [70]

Abbildung 3.1.2.2-3 veranschaulicht den photolytischen Schädigungsablauf am Beispiel des Polyethylens (PE), wobei als strahlungsabsorbierender Fremdkörper die Carbonylgruppe ($>C=O$) eine entscheidende Rolle spielt.

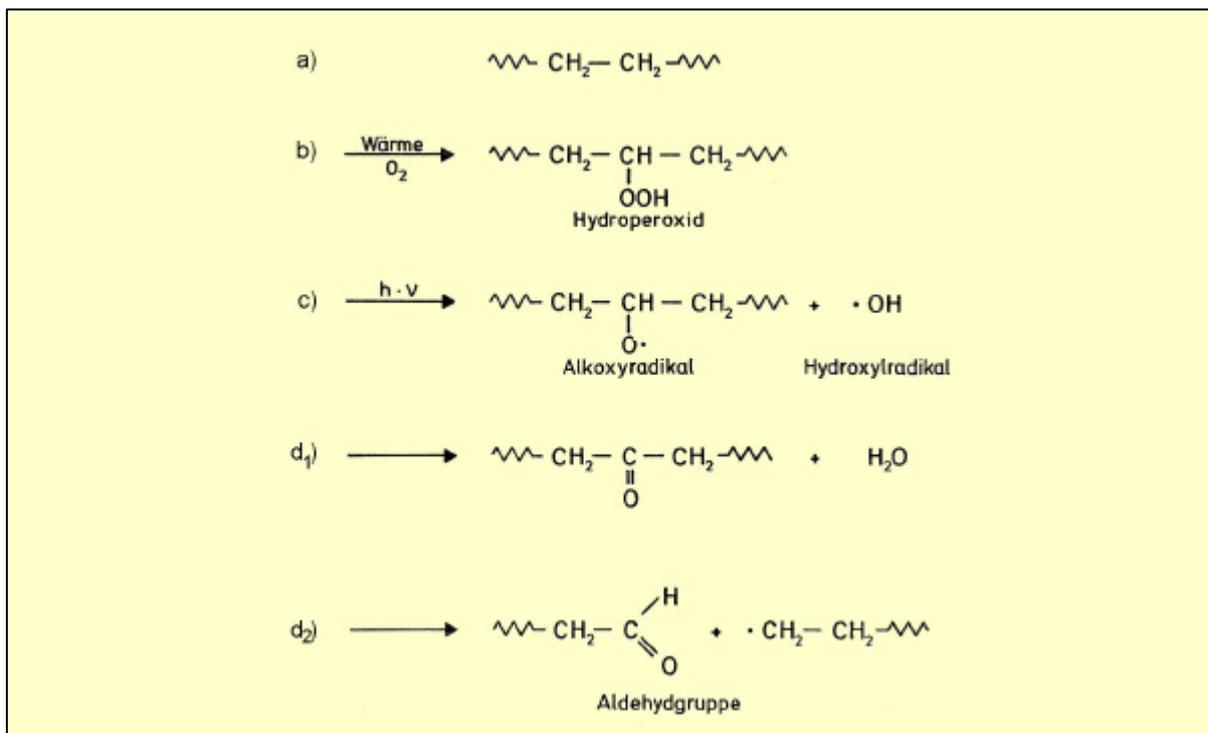


Abb. 3.1.2.2-3

Ablauf der photolytischen Schädigung am Beispiel des Polyethylen (PE) [79]

- Allgemeine Strukturformel des PE
- Thermooxidative Schädigung (z.B. beim Extrudieren) mit Ausbildung eines Hydroperoxids
- Zersetzung des Hydroperoxids durch Einwirkung der Sonnenstrahlung
- Abbruch der Photolyse
 - Reaktion des Alkoxyradikals mit einem Hydroxylradikal, in deren Folge eine Carbonylgruppe entsteht (d₁)
 - Kettenbruch infolge Disproportionierung des Alkoxyradikals (d₂)

Ausgehend von einem ungeschädigten Polyethylen (Abb. 3.1.2.2.-3a) entstehen aufgrund der im Verlauf des Produktionsprozesses auftretenden hohen Temperaturen bis $T = 200 - 250 \text{ }^\circ\text{C}$ zunächst durch thermooxidative Schädigungen des Polymer Hydroperoxide (Abb. 3.1.2.2-3b). Anschließend wird das Hydroperoxid durch Quanten des sichtbaren Lichts (vorzugsweise im UV-A und UV-B-Bereich) zersetzt, wodurch eine Radikalbildung als schnellablaufender Primärprozess eintritt (Abbildung 3.1.2.2-3c). Dabei kann bereits ein direkter Abbau der Kettenmoleküle durch photolytische Spaltung (Dissoziation) eintreten. Im Wesentlichen aber erfolgt eine Anregung von Polymermolekülen oder von im Polymer enthaltenen Additiven, Farbstoffen und Verunreinigungen durch Übergang der Moleküle vom Grundzustand

in den ersten angeregten Singulettzustand. Im nächsten Reaktionsschritt entstehen Carbonylgruppen unter Abspaltung von Wasser (siehe Abb. 3.1.2.2-3d₁). Mit einem Kettenbruch unter Ausbildung einer Aldehydgruppe (–CHO) und eines Radikals (Abb. 3.1.2.2-3d₂) ist im frühen Stadium der Alterung nur in geringem Umfang zu rechnen.

Die photochemischen Reaktionen, die von durch Strahlungsenergie angeregten Carbonylgruppen ausgehen, werden je nach Reaktionsverlauf als NORRISH-Reaktionen Typ I, II bzw. III bezeichnet.

Die Wirkungsmechanismen von Strahlung auf Kunststoffe ist stark abhängig von eventuell zugegebenen Additiven, Pigmenten usw. Die möglichen Abbau- oder Folgeprozesse der photochemischen Reaktionen werden in aller Regel durch diese Zusatzstoffe, die selbst photoaktiv sein können, beeinflusst.

Betrachtet man Abbauprozesse pigmentierter Kunststoffe, so muss zwischen photoinaktiven und photoaktiven Pigmenten unterschieden werden. Während letztere bei der Einwirkung von UV-Strahlung in Verbindung mit Sauerstoff und Wasser (Feuchtigkeit) Radikale erzeugen, die in Pigmentnähe einen radikalischen Abbau der Polymermatrix verursachen, üben photoinaktive Pigmente durch ihre UV-Absorption einen schützenden Einfluss auf die Polymermatrix aus.

Aufgrund der Wechselwirkung von Strahlung und Absorption ist zur Abschätzung von Art und Umfang möglicher photochemischer Reaktionen neben der Kenntnis des spektralen Absorptionsgrades $a(I)$ des Kunststoffes auch die Kenntnis der spektralen Energieverteilung der einwirkenden Strahlung notwendig.

KÄMPF und PAPENROTH haben beide Spektralfunktionen zu einer Funktion, der „strahlungsbewerteten, spektralen Energieaufnahme“ verknüpft, die ein Maß für die auf die Wellenlänge bezogene, vom betreffenden Kunststoff absorbierte Energie ist [47], [87]. Mit ihrer Hilfe konnten photolytische Abbauprozesse bei pigmentierten Kunststoffen hinsichtlich des Schädigungsmechanismus differenziert werden:

Abbauvorgänge wurden einerseits in „polymerspezifische“ andererseits in „pigment-spezifische“ Vorgänge differenziert, d.h. Vorgänge, die von der Kunststoffmatrix aufgrund photolytischer Prozesse ausgelöst worden waren bzw. Vorgänge, die auf durch das Pigment verursachte, photokatalytische Prozesse zurückgeführt werden konnten.

Neben den angegebenen Abbauerscheinungen sind bei einigen Polymeren unter der Einwirkung energiereicher Strahlung auch Vernetzungsreaktionen zu beobachten. Diese führen in der Regel zu einer Versprödung des Polymeren, d.h. zu einer Zunahme der Zugfestigkeit bei gleichzeitiger Abnahme der Dehnung.

3.2 Atmosphärische Einflüsse auf die Alterung

Unter die atmosphärischen Einwirkungsgrößen fallen die verschiedenen Formen des Wassers (Luftfeuchtigkeit, d.h. Wasserdampf, Regen oder Tau), der Sauerstoff sowie Ozon, Stickstoff und Spurengase (CO, CO₂, N₂O, NO₂, SO₂ u.a.), wobei das Ozon eigentlich auch zu den Spurengasen zu zählen ist. Im Folgenden sollen lediglich Wasser und Sauerstoff als maßgebende Einwirkungsgrößen betrachtet werden.

3.2.1 Wasser

Wasser bzw. Feuchte ist an vielen Schadensmechanismen direkt oder indirekt – und unabhängig von der Art des Baustoffs – beteiligt. Die Erscheinungsformen der atmosphärischen Witterungseinflussgröße Wasser sowie Art und Umfang seiner Einwirkung auf Kunststoffe und die Wechselwirkungen zwischen Wasser und polymeren Baustoffen sollen im Folgenden betrachtet werden.

3.2.1.1 Erscheinungsformen sowie Art und Umfang der Einwirkung

Die Feuchtebeanspruchung natürlich bewitterter Bauteile bzw. Baustoffe resultiert in erster Linie aus Niederschlag (Regen) und Taubildung (Kondenswasserbildung). Obwohl der direkten Regenbeaufschlagung bei Kunststoffbauteilen keine vergleichbare Bedeutung zukommt wie bei den porösen Baustoffen, die das Wasser insbesondere über Kapillarwirkung aufnehmen, kann die Einwirkung von Feuchte durch auf der Oberfläche eines Kunststoffbauteils adsorbierte Feuchtefilme die Lebensdauer eines freibewitterten Bauteils um die Hälfte reduzieren.

Um eine genauere Einschätzung der Einflussgröße Feuchte vorzunehmen, sind neben den üblichen Klimadaten (Temperatur, relative und absolute Luftfeuchte) insbesondere die Mikroklimaverhältnisse direkt am Bauteil (Grenzflächenklima) von Interesse.

Die Feuchteverhältnisse an der Bauteiloberfläche werden vor allem bestimmt durch Trocken-Nass/Feucht-Zyklen, die aufgrund natürlicher Bewitterung im Jahresmittel mindestens einmal pro Tag auftreten. Dies erfolgt entweder durch eine direkte

Beregnung oder – in Abhängigkeit von Bauteiloberflächentemperatur und relativer Luftfeuchte – durch eine Betauung.

Bei der Beregnung und den Windverhältnissen sind im Gegensatz zu den Verhältnissen bei kapillarporigen Stoffen weniger Aspekte des Schlagregens von Bedeutung als vielmehr die Dauer der Befeuchtung und die Intensität der anschließenden Trocknung der Oberfläche. Letzteres ist insbesondere von der Ausrichtung der Bauteiloberfläche (Himmelsrichtung und Neigung) abhängig.

Das Verhältnis der Trocken- zur Nassphasen-Dauer nimmt mit zunehmendem Neigungswinkel zu. Nach Untersuchungen von YAMASAKI ist die Befeuchtungszeit (time-of-wetness) horizontaler Flächen von Kunststoffbauteilen 70 % größer als diejenige vertikaler Flächen [79].

3.2.1.2 Transportvorgänge

Kunststoffe und Kunststoff-Folien können Flüssigkeiten und Gase aufnehmen und/oder hindurch lassen. Bei der Einwirkung flüssiger Medien auf Kunststoffe sind allgemein folgende Teilvorgänge zu beachten, die im Prinzip auch für Gase (z.B. für Sauerstoff), gelten und in erster Linie Transportvorgänge betreffen:

- Aufnahme des diffundierenden Stoffes/Mediums an der Grenzfläche (Adsorption),
- Diffusion des Mediums in den Stoff,
- physikalische und/oder chemische Wechselwirkungen zwischen eindringendem Medium und Kunststoff
- Abgabe des diffundierten Stoffes an der gegenseitigen Grenzfläche (Desorption).

Die Adsorption umfasst komplexe Grenzflächenphänomene, deren Ursachen in molekularen Wechselwirkungen (Physi- und Chemisorption) begründet sind. Primär betrachtet betreffen sie die Benetzung bzw. die Benetzbarkeit der Kunststoffoberfläche und sind somit von Einfluss auf den anschließenden Einwanderungsvorgang, der durch Konzentrationsunterschiede (des Mediums im Kunststoff und der „Umgebung“) hervorgerufen wird. Die Prozesse, die sich beim Eindringen von Flüssigkeitsmolekülen in Kunststoffe abspielen, können durch Gesetze der Thermodynamik gekennzeichnet werden.

Beim Einwanderungsvorgang sind bezüglich des eindringenden Mediums dessen chemischer Aufbau und seine Molekülgröße von Bedeutung. Hinsichtlich des zu

durchdringenden polymeren Festkörpers bestimmen – unabhängig von der Art des Mediums – folgende Faktoren den Diffusionsvorgang [95]:

- Art und Umfang von (Mikro-)Hohlräumen in der Polymermatrix
- sterischer Aufbau,
- Kristallinitätsgrad,
- Ausmaß der Vernetzung,
- Art und Anteil der Zusatzstoffe.

Da die Permeation bei teilkristallinen Thermoplasten nur durch den amorphen Bereich erfolgt, wirken eine Erhöhung der Dichte oder der Orientierungen infolge Kaltverstrecken sowie Vernetzungen einwanderungsreduzierend.

Die Einwanderung von Wasser wird im Wesentlichen von folgenden strukturellen Elementen und Eigenschaften des Kunststoffs bestimmt:

- Wasserstoffbrücken-Bindungen und polare Gruppen verleihen dem jeweiligen Polymer einen eher hydrophilen Charakter,
- demgegenüber verhalten sich unpolare Polymere (z.B. die Polyolefine) hydrophob.

So weisen Kunststoffe mit Wasserstoffbrücken-Bindungen mit zunehmendem Feuchtegehalt eine steigende Wasserdampfdurchlässigkeit auf. Demgegenüber sind bei Kunststoffen mit starken polaren Gruppen Wasseransammlungen an aktiven Zentren zu bemerken. Das selbst stark polare Wasser ist dadurch im Kunststoff weniger beweglich. Die strukturellen Merkmale der Kunststoffe haben demnach maßgeblichen Einfluss auf das Sorptionsverhalten.

Zur quantitativen Beschreibung des Transportvorgangs eines Permeenten durch einen festen Stoff werden nachfolgende Kenngrößen angegeben [51]:

- Permeationskoeffizient P
- Diffusionskoeffizient D
- Löslichkeitskoeffizient S

3.2.1.3 Physikalische Wirkungen von Wasser

Physikalisch aktive Medien werden im Zuge der Absorption teilweise an den Molekülketten assoziiert. Diese Belegung der Moleküloberfläche wird auch als Solvatation bezeichnet. Mit dem Eindringen des Mediums in den Kunststoff werden manchmal

die Nebenvalenzbindungen zwischen den Makromolekülketten zunächst gelockert und dann bei weiterer Medienaufnahme aufgehoben. Diese Störung der intermolekularen Bindungen führt zu einer erhöhten Beweglichkeit der Makromoleküle und zu einer Ausdehnung des Kunststoffgefüges, was sich makroskopisch als Quellen bemerkbar macht.

Das eindiffundierte Flüssigkeitsvolumen muss aber nicht zwangsläufig zu einer gleichgroßen Volumenvergrößerung infolge des Quellens führen, da sich ein Teil der Flüssigkeit im freien Volumen des Polymers anlagern kann, ohne eine Volumenvergrößerung zu bewirken. Letztendlich bleiben von der Störung der intermolekularen Bindungen Festigkeit und Verformungswiderstand nicht unberührt.

Die Tendenz zur Quellung und im Extremfall zur Lösung eines Kunststoffs durch eine eingedrungene Flüssigkeit ist bei ähnlicher Polarität von Flüssigkeit und Kunststoff am größten. Eine ausgeprägte Polarität besteht bei den Kunststoffen immer dann, wenn sie OH-Gruppen enthalten. Polyethylen kann mit seinen CH-Bindungen als unpolar eingestuft werden.

3.2.1.4 Chemische Wirkungen von Wasser

Chemisch aktive Medien führen zu einer irreversiblen Materialveränderung. Eine chemische Wirkung des Wassers (Hydrolyse) ist vor allem bei Kunststoffen mit hydrolisierbaren Gruppen, wie Ester-, Amid- und Nitrilgruppen möglich. Sind diese Gruppen Bestandteil der Hauptkette, so hat die Hydrolyse einen erheblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Kunststoffs. Die Hydrolyse kann insbesondere durch Polykondensation (Kondensationspolymerisation) unter Abgabe von Wasser gebildete Polymere betreffen, da die Polykondensation eine reversible Gleichgewichtsreaktion ist. Neben der direkten Hydrolyse des Polymeren selbst kann die Einwirkung des Wassers auch die Hydrolyse von Zwischenprodukten im Verlauf der Abbaureaktion betreffen.

3.2.2 Sauerstoff

Sauerstoff gehört zu den Haupteinwirkungsgrößen bei der atmosphärischen Alterung von Kunststoffen. Die Wechselwirkungen des Sauerstoffs mit Polymeren betreffen sowohl physikalische (Diffusion, Löslichkeit) als auch chemische (Oxidation) Vorgänge. Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Vorgänge der thermischen und photooxidativen Degradation sind vornehmlich nur auf eine gleichzeitige Einwirkung des Sauerstoffs zurückzuführen.

3.2.2.1 Physikalische Vorgänge

Neben der chemischen Zusammensetzung des Kunststoffs wird die Reaktionsfähigkeit des betreffenden Kunststoffs mit Sauerstoff, d.h. die Geschwindigkeit und Intensität der Oxidation (Oxidationsrate), vor allem auch durch das Diffusions- und Löslichkeitsverhalten des Sauerstoffs bestimmt. Von Einfluss ist hierbei vor allem der morphologische Ordnungsgrad, da die Diffusionsgeschwindigkeit des Sauerstoffs in amorphen Kunststoffen deutlich größer ist, als in teilkristallinen.

Verringert wird die Löslichkeit von Sauerstoff durch polare Gruppen (z.B. $>C=O$, $-OH$), Methylgruppen ($-CH_3$) und Vernetzungen. Bezüglich der physikalischen Wechselwirkungen ist zu beachten, dass mit ansteigender Temperatur einerseits die Diffusionsgeschwindigkeit zunimmt, andererseits jedoch die Löslichkeit von Gasen allgemein in Polymeren abnimmt.

Es bleibt anzumerken, dass der von einem Kunststoff aufgenommene Sauerstoff nicht umgehend zu einer Oxidation und daraus folgend zu einer Veränderung (meist Verschlechterung) der Materialeigenschaften führen muss. Seine schädigende Wirkung (Oxidation) wird erst durch externe Energiezufuhr (z.B. UV-Strahlung) ermöglicht (vgl. Abschnitt 3.1).

3.2.2.2 Chemische Vorgänge (Oxidation)

Da zur Erläuterung der thermischen Alterung und der Photodegradation die chemischen Vorgänge der (radikalischen) Oxidation bereits in Abschnitt 4.1 beschrieben wurden, soll an dieser Stelle lediglich der Vorgang der sensibilisierenden Oxidation erläutert werden.

Sauerstoff kann im angeregten Zustand (Symbol: O_2^*) ohne weitere Energiezufuhr mit Kunststoffen reagieren. Diese Art der Oxidation wird als sensibilisierte Oxidation bezeichnet. Um in den angeregten Zustand überzugehen, muss molekularer Sauerstoff (O_2) durch Energiezufuhr seine Elektronenkonfiguration derart ändern, dass er wesentlich reaktionsfähiger wird. Ein solcher angeregter Sauerstoff wird in der Photochemie aktiver oder aktivierter Sauerstoff genannt.

3.3 Mechanische Beanspruchungen

Mechanische Beanspruchungen können bei gleichzeitiger Einwirkung der anderen in diesem Kapitel beschriebenen Einflussgrößen ebenfalls zu Abbauerscheinungen bei

polymeren Werkstoffen beitragen. Die durch Kräfte bzw. Spannungen oder durch Eigenspannungen bewirkten Verformungen atomarer Bindungen erleichtern die Reaktion des Makromoleküls mit anderen äußeren Einflussgrößen, weil die zur Reaktion notwendige Energie herabgesetzt wird. So ist z.B. zur Oxidation mancher Polymeren bei gleichzeitig einwirkender mechanischer Beanspruchung weniger Aktivierungsenergie nötig, die Autoxidation von Polyolefinen wird durch mechanische Beanspruchungen deutlich beschleunigt.

Verschiedene Untersuchungen belegen, dass Abbaumechanismen allein durch mechanische Beanspruchungen hervorgerufen werden können. Ausgangspunkt zu diesen Arbeiten sind die Entwicklungen ZHURKOVs zu einer kinetischen Festigkeitstheorie, die den Bruch als chemischen Vorgang und dadurch auch dessen Zeitabhängigkeit erklären kann [79]. Danach lässt sich die mit fortschreitender Lebensdauer abnehmende Festigkeit eines Werkstoffes mit der zeitlichen Entwicklung von Bruchvorgängen im Molekularbereich (nach ZHURKOVs Theorie Kettenspaltungen) erklären, die über Submikrobruchbildungen im Kunststoffgefüge letztendlich das Werkstoffversagen herbeiführen.

Der Mechanismus der Submikrobruchbildung ist vereinfacht schematisch in Abbildung 3.3-1 dargestellt. Den dieser „mechanischen Alterung“ zugrunde liegenden prinzipiellen Reaktionsmechanismus zeigt Abb. 3.3-2 am Beispiel des PE. Danach verläuft der Mechanismus der Submikrobruchbildung in einem infolge einer äußeren mechanischen Spannung ausgerichteten (vorstreckten) Bereich eines Polymers folgendermaßen [79]:

- a) Mechanische Beanspruchungen dehnen die interatomaren Bindungen einer Polymerkette, die zur Spaltung der (C–C)-Kettenbindung notwendige Energie wird dadurch reduziert. Unterstützt durch die atomare und molekulare Wärmebewegung kommt es dann zur Spaltung einer Hauptvalenzbindung in einem Makromolekül und zur Bildung zweier Endradikale (Reaktionsschritt (a) in Abb. 3.3-2).
- b) Die Endradikale sind sehr reaktiv und reagieren umgehend mit benachbarten Makromolekülen, wobei sie diesen ein Wasserstoffatom entreißen, damit zu einer stabilen Endgruppe reagieren und gleichzeitig ein internes Radikal bilden (Reaktionsschritt (b) in Abb. 3.3-2).
- c) Die Bindungen im Bereich des inneren Radikals weisen geringere Dissoziationsenergien auf und sind demzufolge Schwachstellen im Makromolekül. Die Spaltung im Bereich des inneren Radikals führt zu einer stabilen End-

gruppe und zu einem neuen reaktiven Endradikal (Reaktionsschritt (c₁) in Abb. 3.3-2).

- d) Nach Bildung des reaktiven Endradikals verläuft die weitere Reaktion wie unter (b) beschrieben weiter, so dass es zu einer Kettenreaktion kommt. Aufgrund der begrenzten Beweglichkeit der Makromoleküle im Polymergefüge konzentrieren sich die Abbauerscheinungen auf eine „Mikrozone“. Die Bildung eines Submikrobruches stellt sich somit als eine als Kettenreaktion ablaufende Spaltung von Makromolekülketten dar.

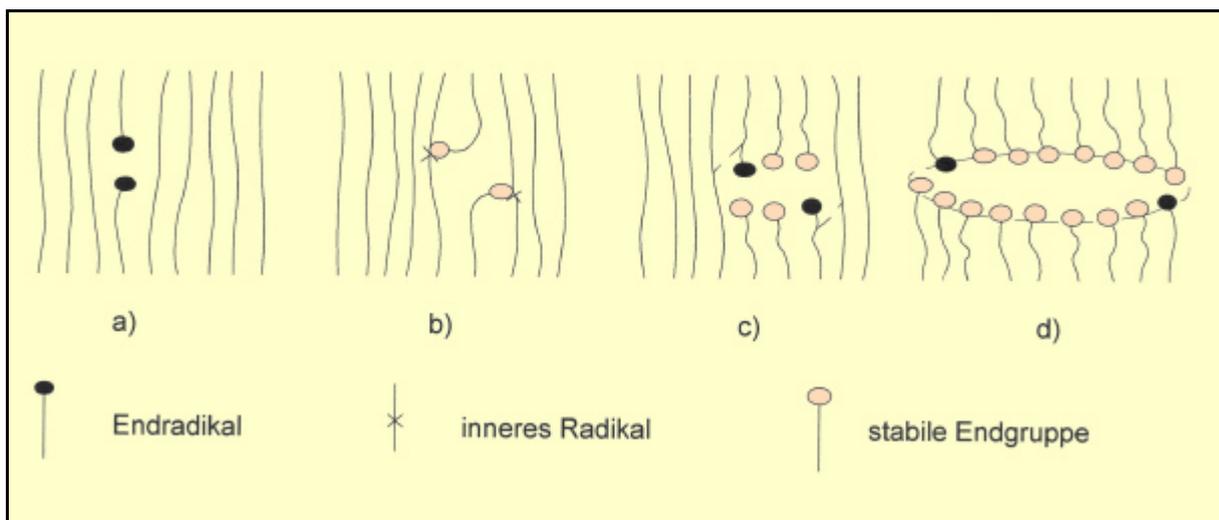


Abb. 3.3-1

Schematische Darstellung eines Submikrobruches nach ZHURKOV [79]

- Kettenbruch mit Bildung zweier Endradikale
- Reaktion der Endradikale mit intakten benachbarten Ketten unter Bildung stabiler Endgruppen und innerer Radikale
- Kettenbruch im Bereich der inneren Radikale mit Bildung stabiler Endgruppen und Endradikale
- Wiederholter Ablauf der Schritte a) – c) führt zur Ausbreitung des submikroskopischen Bruches

Anstelle des im Reaktionsschritt (c₁) beschriebenen Kettenbruchs ist allerdings auch eine Reaktion mit Sauerstoff möglich (s. Reaktionsschritt (c₂) in Abb. 3.3-2), die zur Bildung von Hydroperoxidradikalen führt. Die daraufhin möglichen Abbaureaktionen sind bereits in Abschnitt 3.1 beschrieben worden.

Die in Abb. 3.3-1 schematisch dargestellte mechanische Alterung bewirkt allerdings unter praxisrelevanten mechanischen Belastungen (ohne Witterungseinfluss) nur derart geringe Abbaueffekte, dass sie keine praktische Bedeutung hat. Bei gleichzeitigem Witterungseinfluss können sich jedoch synergistische Abbaumechanismen einstellen, die zum frühzeitigen Versagen eines Kunststoffbauteils führen.

3 Alterung und Degradation von Kunststoffen

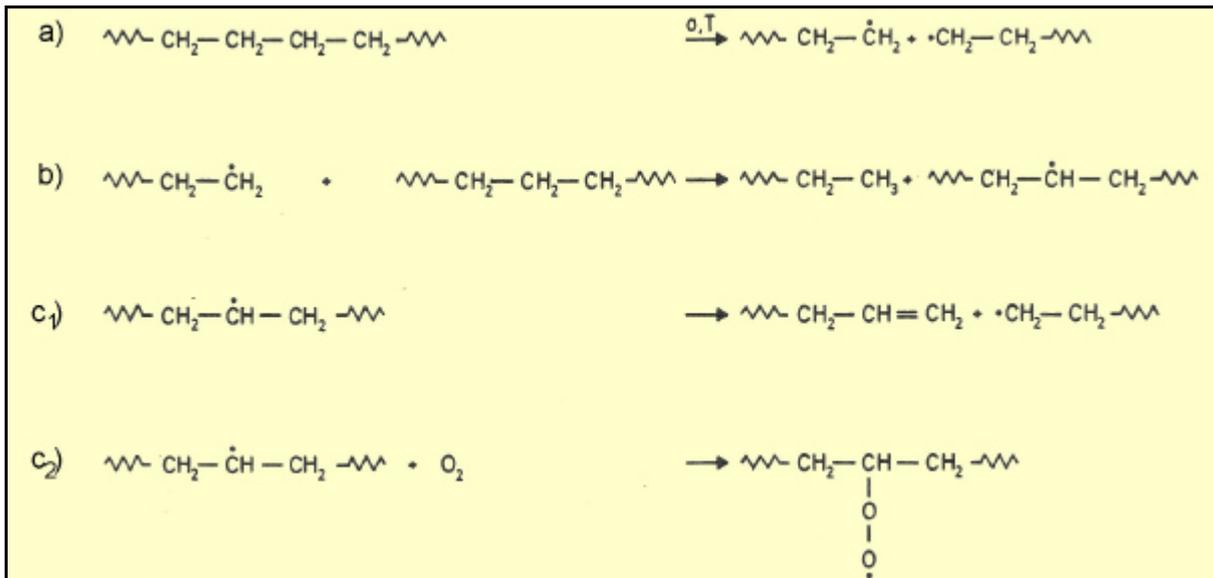


Abb. 3.3-2

Kettenbruch eines Makromoleküls am Beispiel des Polyethylen (PE) [79]

4 Diffusionsoffene Unterspannbahnen für Dachkonstruktionen

Diffusionsoffene Steildachkonstruktionen sind schon seit einigen Jahren als Standard anzusehen. Aus diesem Grund wird eine Vielzahl von Bahnen angeboten, die den Anforderungen in den Fachregeln des Zentralverbandes des Deutschen Dachdeckerhandwerks (ZVDH) [50] genügen (vgl. Anhang A). Die am Markt erhältlichen diffusionsoffenen Unterspannbahnen lassen sich je nach Herstellungsverfahren und Bahnenaufbau in sechs unterschiedliche Gruppen einteilen [112]:

1. Mikroporöse Faserstruktur nach der Flash-Spun-Bond-Technologie
2. Bahnen mit mikroporösen Filmen und Verstärkungslage(n)
(im Normalfall Spinnvlies)
3. Bahnen mit monolithischen Filmen und Verstärkungslage(n)
(im Normalfall Spinnvlies)
4. Bahnen aus nicht gewebten Spinnvliesen mit einer mikroporösen Beschichtung
5. Laminat aus Spinnvlies/Melt-Blown-Vlies/Spinnvlies
(SMS-Technologie)
6. Bahnen aus mikroperforierten Filmen mit/ohne Verstärkung

Im folgendem sollen die unterschiedlichen Bahnen in ihrer Herstellung und ihren Eigenschaften näher beschrieben werden. Dies dient als Grundlage für die spätere Auswahl der zu untersuchenden diffusionsoffenen Unterspannbahnen.

4.1 Herstellung von diffusionsoffenen Unterspannbahnen

4.1.1 Flash-Spun-Bond-Technologie

Bei Bahnen mit mikroporöser Faserstruktur nach der so genannten „Flash-Spun-Bond“ Technologie werden zunächst viele mikrofeine, endlose Fasern gesponnen. Dabei wird hochdichtes Polyethylen (HD-PE) in einer Lösung verflüssigt und unter hohem Druck sowie Hitze durch Spinn Düsen gepresst. Unmittelbar nach dem Austritt des gelösten HD-PE verdampft das Spinnmedium unverzüglich, wodurch die endlosen Fasern entstehen.

Anschließend erfolgt die Weiterverarbeitung der Faserbündel durch eine thermische Behandlung zu einem diffusionsoffenen nichtgewebten Vlies. Dabei werden die gesponnenen Fasern in einem komplexen Prozess verfestigt und miteinander ver-

schweißt (Abb. 4.1.1-1). Da die mikrofeinen Fasern willkürlich übereinander zu liegen kommen und auch dementsprechend verfestigt werden, sind auch die Poren durch die gesamte Folie zufällig verteilt. Aus diesem Grund weist das Endprodukt die diffusionsoffenen Eigenschaften über die gesamte Produktdicke auf, weshalb die Bahndicke auch immer der Funktionsschichtdicke entspricht und für Unterdeck-/Unterspannbahnen zwischen 175 µm und 220 µm liegt.

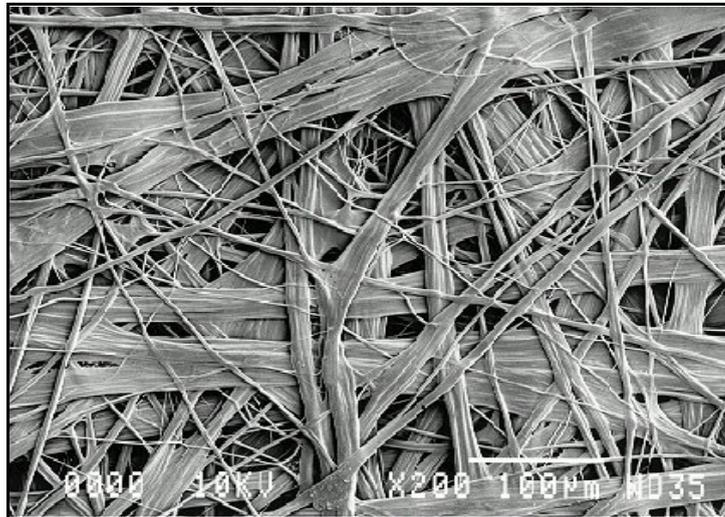


Abb. 4.1.1-1

Bahn mit mikroporöser Faserstruktur nach der Flash-Spun-Bond Technologie

4.1.2 Bahnen mit mikroporösen Filmen

Neben den einlagigen Produkten nach der „Flash-Spun-Bond“ Technologie bestimmen vor allem mehrlagige Unterspannbahnen den Markt. Dazu gehören auch Bahnen mit mikroporösen Filmen auf ein, zwei oder mehr Verstärkungslagen. Solche Bahnen bestehen aus einem dünnen, wasserdichten und zugleich diffusionsoffenen Film, der ein- oder beidseitig durch Vliese vor mechanischen Beanspruchungen geschützt wird (Abb. 4.1.2-1).

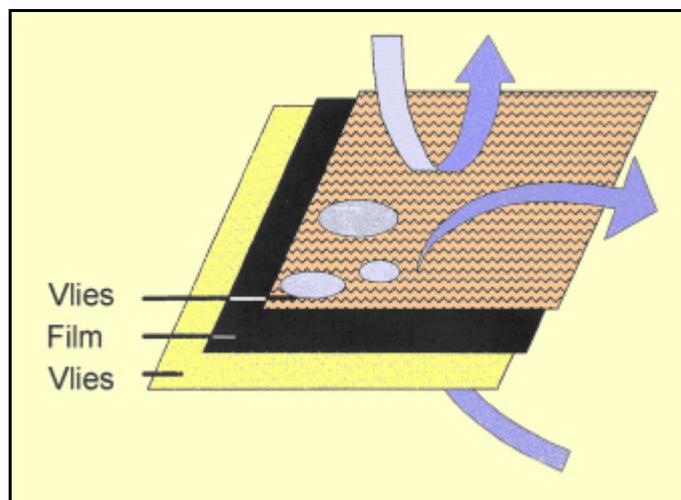


Abb. 4.1.2-1

Aufbau und Funktionsweise einer Bahn mit mikroporösem Film

Der wesentliche Unterschied zu den Bahnen mit einer „Flash-Spun-Bond“ Faserstruktur ist die deutlich geringere Funktionsschichtdicke. Diese liegt zwischen 20 µm und 40 µm, weshalb ein Schutz gegen mechanische Beanspruchung sowie UV-Strahlung erforderlich ist. Der gewählte Rohstoff für diese Bahnen ist entweder Polyethylen (PE) oder Polypropylen (PP), wobei diese auch lagenweise kombiniert werden können. Die Wahl des Ausgangsmaterials bestimmt dabei die Qualität der Bahn. Wird zum Beispiel PP als Materialbasis eingesetzt, so kann man von einer höheren Temperaturbeständigkeit der Bahn ausgehen.

Auf der Basis von PE oder PP zusammen mit einem Füllstoff (z.B. Kreide CaCO_3 bis zu einem Anteil von 60 %) wird die Bahn extrudiert und anschließend mono- oder biaxial verstreckt. Weil der im Polymer der Folie eingekapselte Füllstoff nicht dehnbar ist, entstehen feine Poren. Durch die im Herstellungsprozess vorgenommene ein- oder zweidimensionale Streckung der Kunststoffbahnen sollen bei einer späteren Belastung keine oder nur verringerte Rissbildungen auftreten.

Aufgrund der besonderen Empfindlichkeit der Funktionsschicht gegenüber Hitze und UV-Strahlung muss eine entsprechende Stabilisierung vorgenommen werden. Diese Stabilisierung sorgt für eine dauerhafte Funktionssicherheit der Filme.

Der Stabilisator wird dabei bereits bei der Herstellung des Polymeres in Form von Granulat beigefügt, so dass eine homogene Vermischung stattfinden kann. Er setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen, wobei ein Teil zum Beispiel für hohe Temperaturen und ein anderer Teil für niedrige Temperaturen ausgerichtet sein kann. Die hohen Temperaturen entstehen prozessbedingt bei der Herstellung und treten demnach nur kurzzeitig auf. Dennoch ist an dieser Stelle ein Stabilisator erforderlich, um eine Degradation des Polymers zu unterbinden. Die Stabilisierung für niedrige Temperaturen sorgt sowohl für eine UV-Beständigkeit als auch für eine Alterungsbeständigkeit.

Der Stabilisator schützt die eigentliche HD-PE Faser, indem er sich bei Hitze und UV Einstrahlung „opfert“ und ein frühzeitiges Eintreten der Teilung der langen Polymerketten unterbindet. Diese sind verantwortlich für die Festigkeit einer HD-PE Faser und damit verbunden auch der Festigkeit des Faserpaketes in Form des fertigen Produktes. Erst wenn der Stabilisator vollständig verbraucht ist, wird die Faser bzw. das Faserpaket geschädigt.

Wichtig für eine dauerhafte Funktionserfüllung ist auch die Verbindung der einzelnen Lagen untereinander. Üblicherweise laminiert man die zwei oder drei Lagen einer Bahn. Bei diesem Prozess werden die Lagen miteinander verklebt. Allerdings kann

es bei großer Hitze zu einer so genannten Delaminierung, also der Auflösung der Klebeverbindung kommen. Als eine haltbarere Methode zur Verbindung der einzelnen Lagen hat sich die thermische Laminierung oder thermische Verfestigung herausgestellt. Statt mit Klebstoff werden die zusammengeführten Lagen zwischen zwei Walzen mit definierter Temperatur „zusammengeschweißt“.



Abb. 4.1.2-2

Bahn mit mikroporösen Film

4.1.3 Bahnen mit monolithischen Filmen

Einen ähnlichen Aufbau wie die in Abschnitt 4.1.2 beschriebenen mikroporösen Bahnen, haben Folien mit einem monolithischen Film. Dabei liegt der wesentliche Unterschied im Aufbau und der Funktionsweise des Films. Bei monolithischen Folien erfolgt der Wassertransport nicht durch die Poren der Bahn, sondern entlang der Molekülketten des Polymers. Ein monolithischer Film verfügt dementsprechend auch über keine Poren, wie sie bei den anderen Bahnen anzutreffen sind. Dadurch entsteht der Vorteil der absoluten Luft- und Winddichtigkeit bei einer variablen Wasserdampfdurchlässigkeit.

In diesem Fall dringen die Wassermoleküle in den Film ein und durchwandern ihn, um auf der Bahnoberseite wieder auszutreten. Der Wassermolekültransport geschieht dabei über die amorphe Phase, während die Materialfestigkeit über die kristalline Phase gewährleistet wird (siehe Abb. 4.1.3-1). Die „Wasserwanderung“ kann jedoch nur erfolgen, wenn ein ausreichend großes Dampfdruckgefälle Δp vorhanden ist.

Ein monolithischer Film besitzt keinen festen s_d -Wert, sondern einen variablen Dampfdiffusionswiderstand. Dieser ergibt sich aus der Eigenschaft des Films, Wassermoleküle für einen Zeitraum zu speichern und bei günstigeren klimatischen Bedingungen wieder an die Umgebung abzugeben.

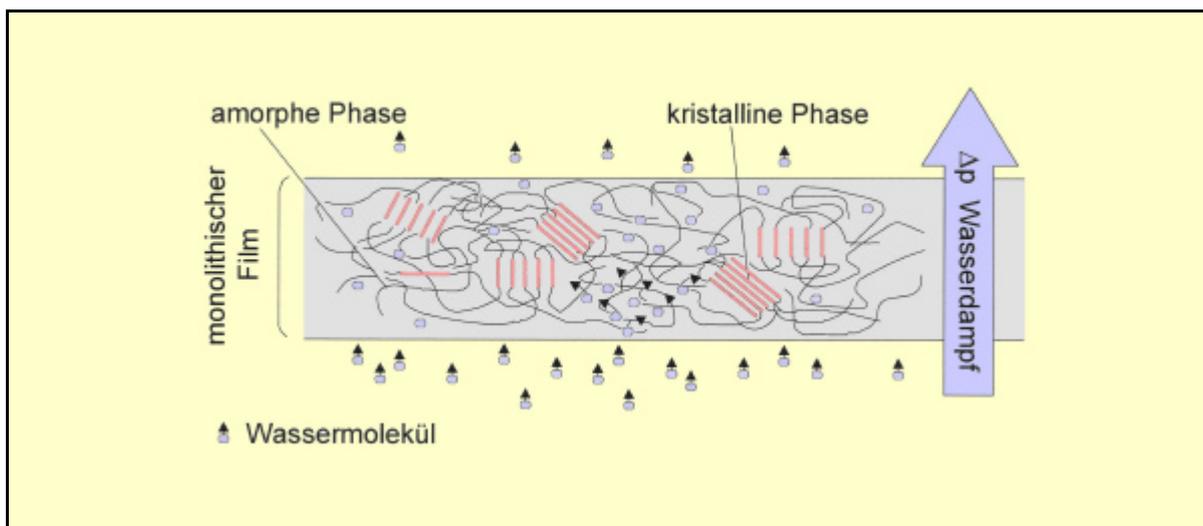


Abb. 4.1.3-1

Funktionsweise einer Unterspannbahn mit monolithischem Film

Entscheidend für die Gesamtqualität der Bahnen mit monolithischen Film sind die Kratzbeständigkeit beim Verlegen, UV- und Hitzestabilität, Filmdicke, Polymerzusammensetzung und auch die Qualität des mehrlagigen Verbundes.

4.1.4 Bahnen aus nicht gewebten Spinnvliesen mit einer mikroporösen Beschichtung

Nichtgewebte Spinnvliese können allein nicht die Funktion einer diffusionsoffenen Unterspannbahn erfüllen, weshalb sie zusätzlich mit einer mikroporösen Beschichtung versehen werden (Abb. 4.1.4-1). Dabei übernimmt die aufextrudierte mikroporöse Schicht die bauphysikalischen Funktionen und das Spinnvlies die wichtigen mechanischen Eigenschaften.

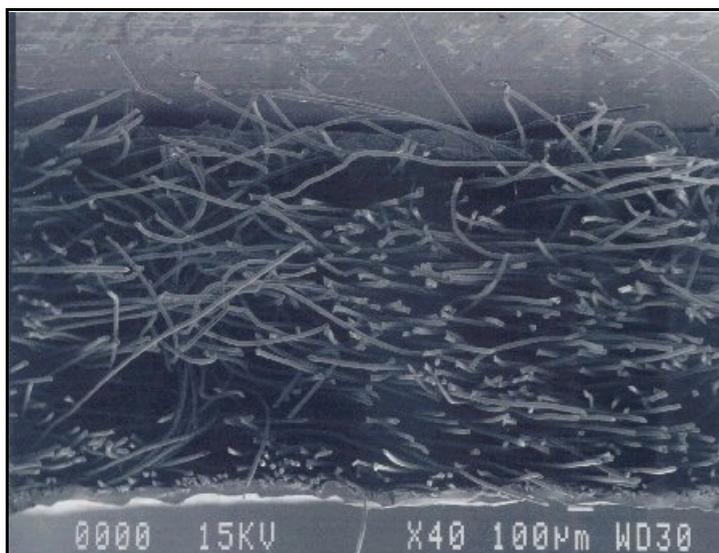


Abb. 4.1.4-1

Das mikroporöse Polymer wird direkt auf ein nicht gewebtes Spinnvlies extrudiert

Der Vorteil solcher Bahnen ist, dass beliebige Polymere miteinander verbunden werden können. So kann zum Beispiel ein Polyester-Vlies für eine bessere Feuerbeständigkeit des Endprodukts sorgen.

4.1.5 Laminat aus Spinnvlies/Melt-Blown-Vlies/Spinnvlies

Zu den weniger verbreiteten Bahnen gehört der Verbund aus Spinnvlies/Melt-Blown-Vlies/Spinnvlies (SMS-Technologie). Dabei handelt es sich um dreilagig aufgebaute Produkte, bei denen sich als Funktionsschicht ein Melt-Blown-Vlies eingeschweißt zwischen zwei Spinnvliesen befindet.

Die Besonderheit dieser mittleren Schicht sind die stark kompaktierten, kurzen und feinen Fasern (Abb. 4.1.5-1). Sie werden aus den Spinn Düsen kommend durch einen starken Luftstrom gebrochen und sind im Vergleich zu den Fasern üblicher Spinnvliese deutlich dünner.

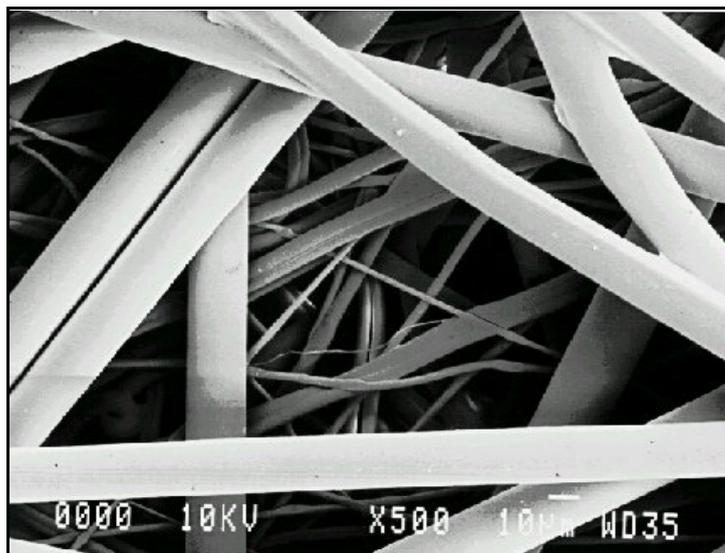


Abb. 4.1.5-1

Bei Bahnen, welche mit der SMS-Technologie hergestellt werden, handelt es sich um dreilagige Produkte, bei der ein Melt-Blown-Vlies zwischen zwei Spinnvliesen eingeschweißt wird.

Aufgrund ihrer Struktur bietet diese Variante dem Wasserdampf einen extrem geringen Widerstand und verfügt somit über einen sehr niedrigen s_d -Wert (extrem diffusionsoffene Bahn). Jedoch ist in der Regel eine Hydrophobierung der Vliese erforderlich, um die für den Einsatz als Unterspannbahn notwendige Wasserdichtheit zu erlangen.

4.1.6 Bahnen aus mikroperforierten Filmen

Bahnen mit mikrofeiner Perforierung standen am Beginn der Entwicklung diffusions-offener Unterspannbahnen und gehören heute eher der Vergangenheit an. Je nach Ausführung mit oder ohne Verstärkung handelt es sich in der Regel um PE-Filme, die

mit ungefähr 0,1 mm großen Löchern perforiert werden (siehe Abbildung 4.1.6-1). Diese sind nicht wasserdicht und weisen dementsprechend s_d -Werte zwischen 0,5 m und 2,0 m auf, so dass sie für die in Abschnitt 1.2.2 beschriebenen Dachkonstruktionen ohne chemischen Holzschutz nicht geeignet sind.

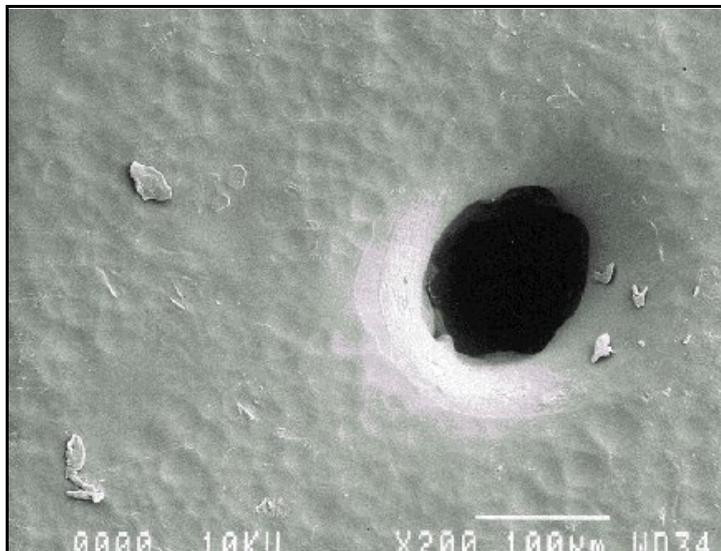


Abb. 4.6.1-1

Bahn mit mikroperforiertem Film

4.2 Anforderungen an Unterspannbahnen

Unterspannbahnen sollen in ihrer Funktion als zweite wasserableitende Ebene zum einen durch die Dacheindeckung eingedrungenes Wasser abführen, zum anderen von der Rauminnenseite in die Dachkonstruktion gelangte Feuchtigkeit hindurch lassen. Dies erfordert einerseits einen ausreichenden Widerstand gegen Wasserdurchgang, andererseits muss die Folie für die Feuchtigkeit auch genügend diffusionsoffen sein.

Neben diesen beiden Anforderungen ergeben sich durch die Einbausituation direkt unter der Dacheindeckungen weitere Ansprüche, denen Unterspannbahnen gerecht werden müssen. Aus diesem Grund wird gegenwärtig in verschiedenen Gremien und Kommissionen (z.B. CEN/TC 254/WC 9) die europäische Produktnorm EN 13 859-1: „Abdichtungsbahnen: Definitionen und Eigenschaften von Unterdeck- und Unterspannbahnen – Teil 1: Unterdeck- und Unterspannbahnen für Dachdeckungen“ [25] erarbeitet, von der zur Zeit das Manuskript vom Juli 2001 vorliegt. Des Weiteren erarbeitet die Europäische Union ein technisches Regelwerk mit dem Titel: „Technical Guide for the Assessment of Discontinuous Roofing Underlay Systems“, welches mit der Norm eine gemeinsame Basis zur Beurteilung von Dachunterlage-/Dachbahn-Systemen etablieren soll.

Im Folgenden werden die an Unterspannbahnen gestellten Anforderungen kurz formuliert. Die zur Überprüfung der hier genannten Anforderungen vorgesehenen Versuche sind in Abschnitt 5.5 beschrieben.

4.2.1 Widerstand gegen Wasserdurchgang

Unterdeck- und Unterspannbahnen müssen eine ausreichende Wasserdichtheit besitzen, um die Dachkonstruktion vor Feuchtigkeit von außen zu schützen. Dabei bedeutet Wasserdichtheit in diesem Fall, dass unter den im praktischen Gebrauch auftretenden Feuchtebelastungen durch die Folien kein oder nur ein geringer Wasserdurchtritt stattfindet. Ein Großteil der Feuchtigkeit, welche die Dachdeckung durchdrungen hat, muss zur Traufe ablaufen können. Auf diesem Weg können auch kleine Wassersäcke entstehen, deren Wasserdruck die Unterspannbahn standhalten muss.

Die Prüfung des Widerstandes gegen Wasserdurchgang erfolgt nach DIN EN 1928 [10] und DIN EN 13 111 [23] mit den in der Produktnorm DIN EN 13 859-1 [25] genannten Abänderungen. Dabei wird eine Klassifizierung der Produkte in Widerstand gegen Wasserdurchgang (Klasse A, B oder C) vorgenommen.

Der Versuchsaufbau nach DIN EN 1928 „Abdichtungsbahnen; Bestimmung der Wasserdichtheit“ simuliert dabei den Fall einer auf einer Unterlage aufliegenden Unterdeckbahn und führt im Falle des Bestehens der Prüfung zur Einstufung in die Klasse A (wasserdicht).

Sollte die Prüfung nach DIN EN 1928 nicht bestanden werden, erfolgt anschließend die Bestimmung des Widerstandes gegen Wasserdurchgang nach DIN EN 13 111 und eine Einstufung der Unterspannbahnen in Klasse B (bei bestandener Prüfung). Die Einordnung in Klasse C erfolgt, wenn keine der beiden Prüfungen bestanden oder eine Prüfung nach DIN EN 1928 und DIN EN 13 111 nicht durchgeführt wurde.

Der Versuchsaufbau nach DIN EN 13 111 „Abdichtungsbahnen: Unterdeckbahnen für Dachdeckungen und Wände – Bestimmung des Widerstandes gegen Wasserdurchgang“ soll den Fall einer frei hängenden Unterspannbahn simulieren.

4.2.2 Wasserdampfdurchlässigkeit

Neben einem ausreichenden Widerstand gegen Wasserdurchgang wird von den Unterspannbahnen auch eine gewisse Diffusionsoffenheit für Wasserdampf gefordert. Je nach vorhandener Dachkonstruktion müssen die Bahnen dabei mehr oder

weniger diffusionsoffen sein, damit es im wärme gedämmten Dach nicht zu einer schädlichen Tauwasserbildung kommt, die den Wärmeschutz oder die Standsicherheit gefährdet (siehe Abschnitt 1.2). Dazu gibt das „Merkblatt Wärmeschutz bei Dächern“ [50] des ZVDH s_d -Werte an, die bei vollgedämmten Konstruktionen von innerseitiger Dampfbremse und Unterdeckbahn einzuhalten sind, um Funktionssicherheit zu gewährleisten.

Im Zusammenhang mit den im Abschnitt 1.1 und 1.2 genannten Dachkonstruktionen werden von Baufolien diffusionsäquivalente Luftschichtdicken verlangt, die bis in den cm-Bereich herunter gehen. Insbesondere für Dächer ohne chemischen Holzschutz sind nach DIN 68 800-2 [35] diffusionsäquivalente Luftschichtdicken von $s_d \leq 0,20$ m verlangt.

4.2.3 Zugfestigkeit und Nagelausreißfestigkeit

Eine nicht zu unterschätzende Beanspruchung sind die mechanischen Belastungen, denen Unterdeck- und Unterspannbahnen während der Verlegung auf dem Dach ausgesetzt sind. Die Befestigung erfolgt durch Latten und Nägel, die auf den Bahnen aufliegen bzw. sie durchdringen.

Bis zur abschließenden Dacheindeckung wird die Dachfläche begangen, wobei es auch zum Betreten der Unterspannbahnen kommen kann. Aus diesem Grund muss das Material eine gewisse Widerstandsfähigkeit und Robustheit aufweisen, damit keine Risse entstehen und die Funktionstüchtigkeit beeinträchtigt wird.

Die Prüfung der Zugfestigkeit wird nach DIN EN 12 311-1 „Abdichtungsbahnen – Teil 1: Bitumenbahnen für Dachabdichtungen – Bestimmung des Zug-Dehnungsverhaltens“ [22] mit den in der Produktnorm DIN EN 13 859-1 [25] beschriebenen Abweichungen durchgeführt.

4.2.4 Alterungsbeständigkeit

Die Anforderung der Alterungsbeständigkeit ist erforderlich, weil Unterdeck- und Unterspannbahnen nach der Verlegung auf dem Dach bis zur abschließenden Dachdeckung unterschiedlich lange ungeschützt der natürlichen Witterung ausgesetzt sind. Dabei haben hauptsächlich die Sonnenstrahlung bzw. insbesondere die von ihr ausgehende UV-Strahlung sowie die Erwärmung der Materialien, einen Einfluss auf ihre Folieneigenschaften.

Aber auch nach der Fertigstellung des Daches sind die Materialien unter der Dachdeckung den dort auftretenden Temperaturen ausgesetzt, wobei sie auch Tageslicht, wenn auch in sehr schwacher Intensität, erreichen kann (z.B. im Bereich eines Dachflächenfensters, wenn die Dachdeckung nicht ausreichend dicht an das Fenster anschließt).

In der Produktnorm DN EN 13 859-1 [25] wird aus diesen Gründen eine künstlich beschleunigte Alterung durch eine 14-tägige UV-Bestrahlung ($54,5 \text{ MJ/m}^2$) mit einer anschließenden 90-tägigen Wärmelagerung bei 70 °C verlangt. Nach dieser künstlichen Alterung werden die Probekörper auf ihren Widerstand gegen Wasserdurchgang sowie ihres Zug-Dehnungsverhaltens geprüft.

5 Vorbereitung der Alterungsprüfungen

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln das Grundverständnis für die chemische Zusammensetzung der in den Unterspannbahnen verwendeten Kunststoffe, deren Eigenschaften sowie die möglichen Alterungs- und Degradationsprozesse dargestellt wurden, sollen im folgenden Abschnitt die für die Alterungsprüfungen erforderlichen Vorleistungen beschrieben werden.

Diese umfassen neben der geeigneten Auswahl der am Markt erhältlichen Unterspannbahnen auch die Ermittlung bestimmter Randbedingungen, die für die Entwicklung geeigneter Prüfprogramme von entscheidender Bedeutung sind. Dabei ist zu beachten, dass die Prüfungen gleichermaßen an natürlich als auch an künstlich gealterten Proben durchgeführt werden.

In den folgenden Abschnitten werden daher die fundamentalen Überlegungen zur Entwicklung eines geeigneten Planungskonzeptes zur Einstufung der Lebensdauer dargestellt und die sich daraus ergebenden Prüfungen an den ausgewählten Dachunterspannbahnen vorgestellt. Ein Schwerpunkt der Ausführungen liegt dabei auf der Problematik der praxisnahen Erfassung der Umgebungsbedingungen bei der Durchführung beschleunigter Alterungsversuche.

5.1 Auswahl der Unterspannbahnen

Die Untersuchung der Unterspannbahnen erforderte es, aus der Vielzahl am Markt erhältlicher Produkte eine geeignete Auswahl zu treffen. Wie bereits in Kapitel 4 erläutert, unterscheiden sich die Unterspannbahnen neben ihren Herstellungsverfahren auch hinsichtlich ihrer chemischen Grundbestandteile und Eigenschaften. In Anhang A findet sich eine umfassende Übersicht der im Jahre 2003 erhältlichen Unterspann- und Unterdeckbahnen für Dachkonstruktionen.

Um die Auswahlmöglichkeiten der zur Verfügung stehenden Dachbahnen zu begrenzen, wurden in den Untersuchungen lediglich Unterspannbahnen mit diffusionsoffenen Eigenschaften betrachtet. Dies ist vor allem durch die noch zu beantwortende Frage begründet, ob diffusionsoffene Unterspannbahnen ihren im fabriktischen Zustand niedrigen s_d -Wert auch nach einer Alterung aufweisen können.

Da es in der vorliegenden Arbeit nicht darum geht, gleichartige Bahnen unterschiedlicher Hersteller zu untersuchen, zu vergleichen und abschließend zu bewerten, wurden in der weiteren Auswahl der Folien möglichst unterschiedliche Eigenschaften

der Unterspannbahnen berücksichtigt. Dies erscheint vor allem vor dem Ziel der Einstufung der Lebensdauer diffusionsoffener Unterspannbahnen sinnvoll. Die Untersuchung an Bahnen unterschiedlichster Eigenschaften soll ermöglichen, das Untersuchungs- und Bewertungskonzept hinsichtlich seiner allgemeinen Anwendbarkeit oder seiner eingeschränkten Aussagefähigkeit für einen bestimmten Folientyp zu beurteilen.

Insgesamt wurden sechs diffusionsoffene Unterspannbahnen unterschiedlicher Hersteller ausgewählt. Die Auswahl erfolgte an Hand der Materialangaben in den Herstellerlisten (siehe Anhang A). Diese wurden in bestimmte Wertebereiche eingeteilt und anschließend in eine Eigenschaftsmatrix übertragen (siehe Tabelle 5.1-1 und Anhang B). Dadurch konnten die Unterspannbahnen hinsichtlich ihrer in Abschnitt 4.2 beschriebenen wichtigsten Eigenschaften kombiniert werden.

Tabelle 5.1-1

Einteilung der Materialeigenschaften von Unterspannbahnen in Wertebereiche

Materialeigenschaft	Wertebereich
Anzahl der Lagen	1 / 2 / ≥ 3
Gewicht in g/m^2	≤ 105 / 106 – 175 / > 175
Reißfestigkeit längs/quer in N/50 mm	≤ 150 / 151 – 350 / > 350
Nagelausreißfestigkeit in N/50 mm	≤ 150 / 151 – 350 / > 350
Wassersäule in mm	≤ 1000 / 1001 – 3000 / > 3000
s_d -Wert in m	$\leq 0,02$ / 0,03 – 0,20 / $> 0,20$ – 0,50

In Tabelle 5.1-2 sind die ausgewählten Unterspannbahnen mit ihren Materialeigenschaften aufgeführt, während Tabelle 5.1-3 die entsprechende Einteilung dieser Eigenschaften in die Wertebereiche gemäß Tabelle 5.1-1 zeigt.

Tabelle 5.1-2

Materialeigenschaften der ausgewählten Unterspannbahnen

Folienkurzbezeichnung	Materialverbund	Gewicht g/m^2	Reißfestigkeit längs/quer in N/50 mm	Nagelausreißfestigkeit längs/quer in N/50 mm	Wassersäule in mm	s_d -Wert in m
A	Polyester-Vlies mit PU Beschichtung	190	350/350	350/350	"dicht"	0,15
B	1 Lage HD PE	60	140	140	> 1000	0,02
C	2 Lagen PP/PP	105	150/120	180	> 1500	0,02
D	3 Lagen PP/PP/PP	175	445/325	345/365	> 1500	0,02
E	3 Lagen PP/PE/PP	155	200/200	140	> 4000	0,04
F	5 Lagen	700	600	280 (CEN)	7000	0,30

Zur Produktkennzeichnung wurden die einzelnen Bahnen in den Versuchsreihen mit den Buchstaben A bis F bezeichnet. So kann beispielsweise eine 6 Monate frei bewitterte Probe mit C-6 Mon. oder eine vier Wochen im Trockenschrank wärmebehandelte Probe mit E-60 °C/672 Std. benannt werden. Aus Tabelle 5.1-3 geht hervor, dass sich die ausgewählten Unterspannbahnen gleichmäßig über die Matrix der Materialeigenschaften verteilen.

Tabelle 5.1-3

Matrix der Materialeigenschaften der ausgewählten Unterspannbahnen

Kurz- bez.	Anzahl der Lagen			Gewicht in g/m ²			Reißfestigkeit in N/50 mm		
	1	2	≥ 3	≤ 105	106-175	> 175	≤ 150	151-350	> 350
A		X				X			X
B	X			X			X		
C		X		X			X		
D			X		X			X	
E			X		X			X	
F			X			X			X

Kurz- bez.	Nagelausreißfestigkeit in N/50 mm			Wassersäule in mm			s _d -Wert in m		
	≤ 150	151-350	> 350	≤ 1000	1001-3000	> 3000	≤ 0,02	0,03-0,2	0,2-0,5
A			X		X			X	
B	X			X			X		
C	X				X		X		
D		X			X		X		
E		X				X		X	
F			X			X			X

5.2 Freibewitterung und Laborversuche

Von den in Abschnitt 1.5 vorgestellten Möglichkeiten der Erstellung einer Prognose zur Abschätzung der Lebensdauer sollte für die Untersuchung der Unterspannbahnen sowohl eine beschleunigte Alterung durch Erhöhung des Zeitfaktors als auch eine Extrapolation von Daten aus Kurzzeitversuchen durchgeführt werden.

So wurde eine natürliche Alterung der Unterspannbahnen auf einem frei bewitterten Prüfstand durchgeführt. Die Veränderung der Materialeigenschaften sind den Ergebnissen der Laborversuche der beschleunigten Alterung gegenüberzustellen. Ziel ist es, durch einen ständigen Abgleich und iterativ verbesserter Laborprüfungen eine Korrelation herzustellen (vgl. Abb. 1.5.4-1).

5.2.1 Aufbau von Prüfständen zur Freibewitterung

Zur Erzielung einer natürlichen Alterung der Unterspannbahnen wurden ein Langzeitbewitterungsstand und sechs kleine Prüfstände zur Kurzzeitfreibewitterung aufgebaut. Der Aufstellort der Bewitterungsstände war so gewählt, dass eine Verschattungen durch Bäume oder andere Gebäude vermieden wurde. Somit lagen für alle Dachmodelle die gleichen Bedingungen hinsichtlich der Sonneneinstrahlung und Beregnung vor.

Die Kleinbewitterungsprüfstände wurden ebenerdig in zwei Reihen aufgestellt und Richtung Süden (180°) ausgerichtet (siehe Abb. 5.2.1-1). Durch diese Orientierung und eine Neigung der Prüfflächen mit 30° zur Horizontalen sollte eine maximale Sonnenbestrahlung der Unterspannbahnen erreicht werden. Jeder Bewitterungsstand hatte eine Prüffläche von $160\text{ cm} \times 80\text{ cm}$ ($= 1,28\text{ m}^2$) und ist für Kurzzeitversuche bis zu drei Monate vorgesehen.



Abb. 5.2.1-1

Ansicht der Kleinbewitterungsstände

Neben den kleinen Prüfständen kam ein großes Freibewitterungsmodell zum Einsatz, das eine Gesamtprüffläche von $10\text{ m} \times 6\text{ m}$ (60 m^2) besaß. Die Konstruktion wurde ebenfalls gegen Süden ausgerichtet und hatte eine Dachneigung von 30° (siehe Abb. 5.2.1-2). Da geplant war, die Unterspannbahnen mindestens zwei Jahre auf diesem Modell zu belassen, wurde der Prüfstand auf Höhe eines Daches vergleichbar dem eines Einfamilienhaus errichtet. Dadurch sollten neben der solaren

Belastung auch die in der Praxis zu erwartenden Wind- und Regen- sowie Schlagregenereignisse auf die Unterspannbahnen gewährleistet werden.

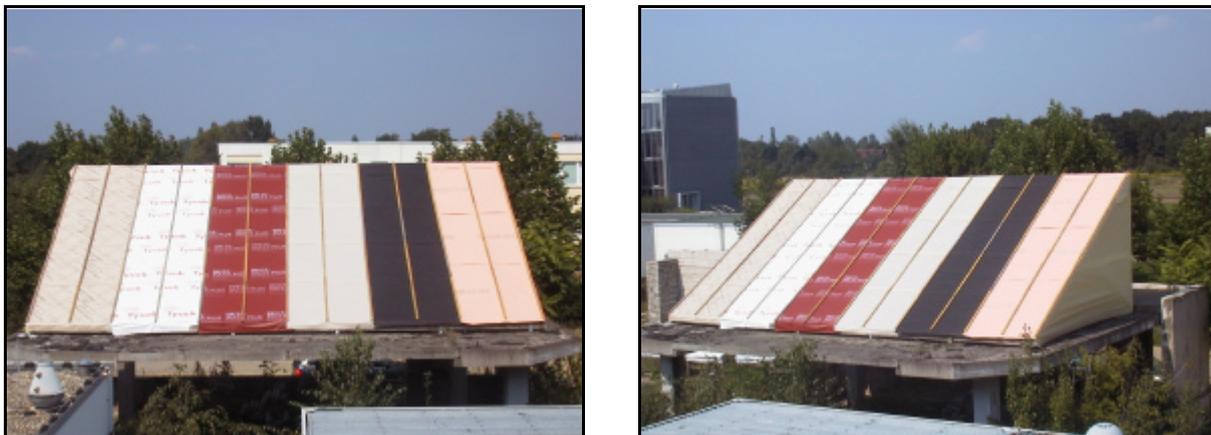


Abb. 5.2.1-2

Ansicht des Großbewitterungsstandes

Das Großbewitterungsmodell war so dimensioniert, dass für jede Unterspannbahn zwei Gefachbereiche von jeweils 80 cm Breite zur Verfügung stehen (siehe Abb. 5.2.1-2), aus denen alle 3 Monate ein Prüfstück entnommen und ersetzt wurde. Der Ersatz der entnommenen Probe stellte wieder die ursprünglichen Verhältnisse her. Weiterhin standen durch die ersetzten Prüfflächen erneut gealterte Proben für eine Weiterführung bzw. Wiederholung der Untersuchungen zur Verfügung.

Die Dachfolien waren bahnenweise gemäß den Regeln der Technik über beide Gefachbereiche verlegt. Auf den Sparren wurden die Unterspannbahnen zunächst in bauüblicher Weise mit Heftklammern gesichert, bevor dann die endgültige Befestigung mit einer Konterlattung erfolgt.

Auf die Anordnung einer Wärmedämmung unterhalb der Unterspannbahnen wurde verzichtet, da im Bestreben eines Vergleiches zwischen natürlicher und künstlicher Alterung diese Wärmedämmung bei den zeitlich beschleunigten Laborversuchen in den UV- und Klimaschränken auch keine Berücksichtigung findet.

Die Seitenflächen des großen Freibewitterungsmodells waren mit Holzplatten verkleidet und über eine Tür in der rückseitigen Ebene der Prüfstand zugänglich. Auf diese Weise konnten die Unterspannbahnen jederzeit auf eine mögliche Beschädigung visuell auch von der Folienunterseite überprüft werden.

Sowohl bei den kleinen Bewitterungsständen als auch im großen Prüfstand waren die verwendeten Holzwerkstoffe nicht mit Holzschutzmitteln behandelt.

Zur Quantifizierung der Prüfungsergebnisse der frei bewitterten Proben stand eine Wetterstation in unmittelbarer Nähe der beiden Prüfstände zur Verfügung. Diese zeichnete während des Versuchszeitraums die wesentlichen Wetterdaten wie Temperatur, relative Luftfeuchte, horizontale Globalstrahlung und Niederschlag auf.

5.2.2 Zeitlich beschleunigte Laborversuche

Zeitlich beschleunigte Laborversuche zur künstlichen Alterung bedürfen verschiedener technischer Einrichtungen. Neben Klima- und Trockenschränken zur Durchführung von Prüfungen bei bestimmten Temperaturen und Luftfechtigkeiten gibt es auch spezielle Geräte für Bewitterungsversuche. Diese können neben der UV-Strahlung auch hinsichtlich der Temperatur und Luftfeuchtigkeit reguliert werden. Eine Feuchtebelastung durch Regenereignisse wird durch Besprühen der Probekörper nachgebildet. Die Programmierung bestimmter Belastungszyklen ermöglicht die Simulation von Tag und Nacht sowie Trocken- und Feuchtperioden.

Für die künstliche Belastung der Unterspannbahnen mit UV-Strahlung wurde ein UV-Fluoreszenzröhrengerät der Firma Atlas verwendet (Abb. 5.2.2-1). Das Gerät mit der Bezeichnung UV-2000 erfüllt die Prüfanforderungen zahlreicher Normen (u.a. DIN, ISO und ASTM) und wurde insbesondere für die Überprüfung des Materialverhaltens gegenüber UV-Strahlung und Temperatur entwickelt. Eine Sprühvorrichtung war in dem verwendeten Gerät nicht vorhanden, so dass eine künstliche Belastung durch Feuchtigkeit nicht durchgeführt werden konnte. Allerdings ist diese in der Produktnorm für Unterspannbahnen (DIN EN 13859-1) zur künstlichen Alterung auch nicht verlangt.



Abb. 5.2.2-1

UV-Bewitterungsgerät Atlas UV-2000

Im UV-2000 können drei Arten von UV-Fluoreszenzröhren eingesetzt werden. In den Alterungsversuchen an Unterspannbahnen kommen die in DIN EN 13 859-1 gefor-

dernten UV-A Lampen zum Einsatz, die ihre maximale Bestrahlungsstärke bei einer Wellenlänge von 340 nm erreichen. Die Strahlungsverteilung der eingesetzten Lampen ist in Abbildung 5.2.2-2 dargestellt. Das verwendete Gerät ist in der Lage, die Bestrahlungsstärken aller acht im Prüfraum befindlichen Fluoreszenzröhren selbstständig zu regulieren, wodurch eine gleichmäßige Bestrahlung der Proben über den gesamten Prüfungszeitraum sichergestellt wird. Gleiches gilt für die Temperaturregelung, welche über ein Schwarztafelthermometer erfolgt.

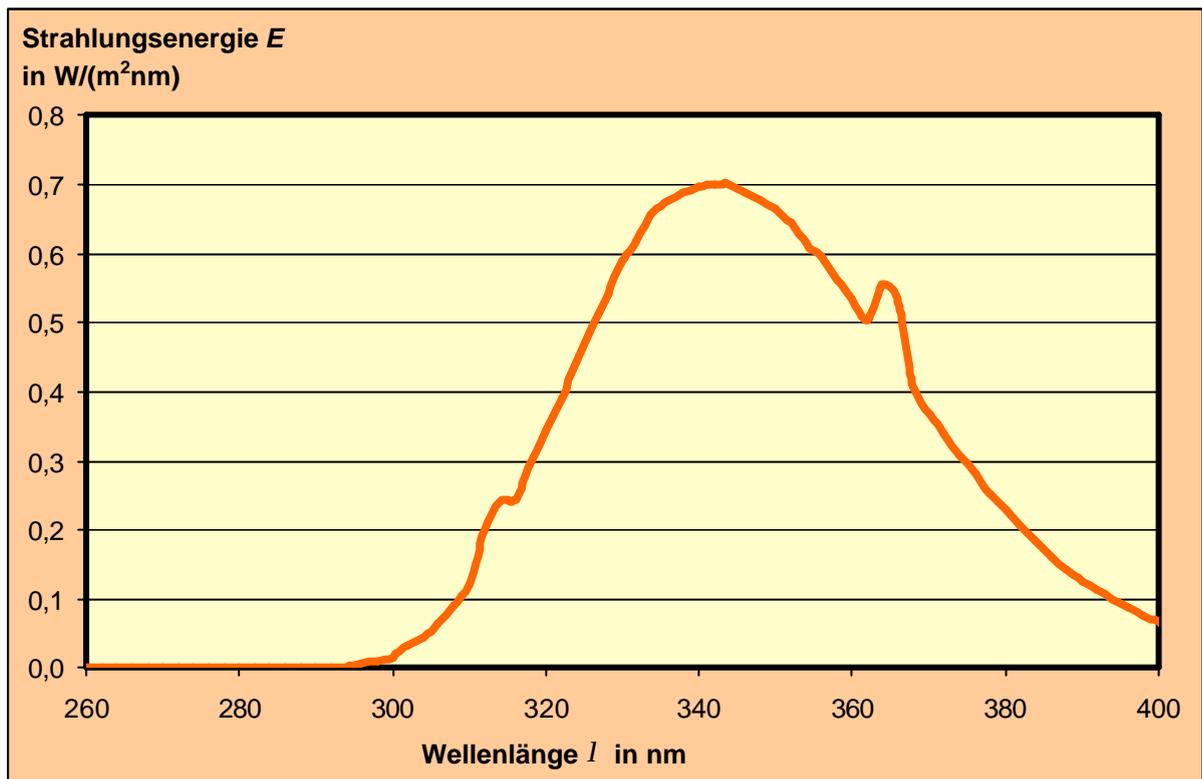


Abb. 5.2.2-2

Bestrahlungsstärken der im UV-2000 eingesetzten Fluoreszenzröhren UV-A 340 in Abhängigkeit der Wellenlängen

In der Prüfkammer lassen sich Einzelproben mit einer Maximalgröße von 500 mm Breite und 300 mm Höhe einsetzen. Bei vollständiger Ausnutzung dieser Abmessungen können vier Prüfkörper gleichzeitig in das Gerät eingesetzt werden.

Für die Temperatur- und Klimaprüfungen wurden neben dem UV-Gerät spezielle Prüfschränke verwendet (siehe Abbildung 5.2.2-3). Diese ermöglichten Prüfungen mit vorgegebenen Sollwerten temperierter bzw. klimatisierter Luftströmungen. Um gleichmäßige Luft- und Temperaturverteilung zu gewährleisten, wurden ausschließlich Geräte mit einem Umluftgebläse verwendet.



Abb. 5.2.2-3
Temperatur- und Klimaprüfstände

5.3 Ermittlung realer Belastungsgrößen auf Unterspannbahnen

Die Entwicklung geeigneter Testprogramme zur künstlichen Alterung von Unterspannbahnen erfordert Informationen über Witterungsbedingungen und Bedingungen, denen die Folien im Dach und auf den frei bewitterten Modellen ausgesetzt sind. Damit wird vermieden, dass im Labor Belastungen angesetzt werden, die weit über oder unter den real auftretenden Größen liegen. In einem solchen Fall sind auch die künstlich erzeugten Alterungserscheinungen schlecht mit den Ergebnissen der Freibewitterung vergleichbar.

5.3.1 Auswertung der Wetterdaten

Die in dieser Forschungsarbeit durchgeführten Alterungsuntersuchungen an frei bewitterten Unterspannbahnen erforderten eine Aufzeichnung der für den Zeitraum der Alterung herrschenden Witterungsbedingungen. Dies war notwendig, da die Testergebnisse stark von den jeweiligen örtlichen Gegebenheiten bzw. einer bestimmten Erscheinung in dieser Periode (z.B. extrem heißer Sommer u.ä.) abhängen und die Aufzeichnung der Randbedingungen eine Extrapolation auf andere Regionen erleichtert.

Die den Freibewitterungsmodellen nahe gelegene Wetterstation lieferte die Daten zu Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte, Globalstrahlung und Niederschlagsmengen als

stündliche Mittelwerte. Dabei sind für die künstlichen Alterungsversuche die Lufttemperatur und die Globalstrahlung von besonderem Interesse.

Abbildung 5.3.1-1 stellt den Temperaturverlauf für den Standort der Freibewitterungsmodelle im Zeitraum Juli 2002 bis Juni 2003 dar. Es ergibt sich eine durchschnittliche Jahrestemperatur von 9,2 °C bei einer maximalen Temperatur von 33,7 °C und einem Minimalwert von – 20,3 °C.

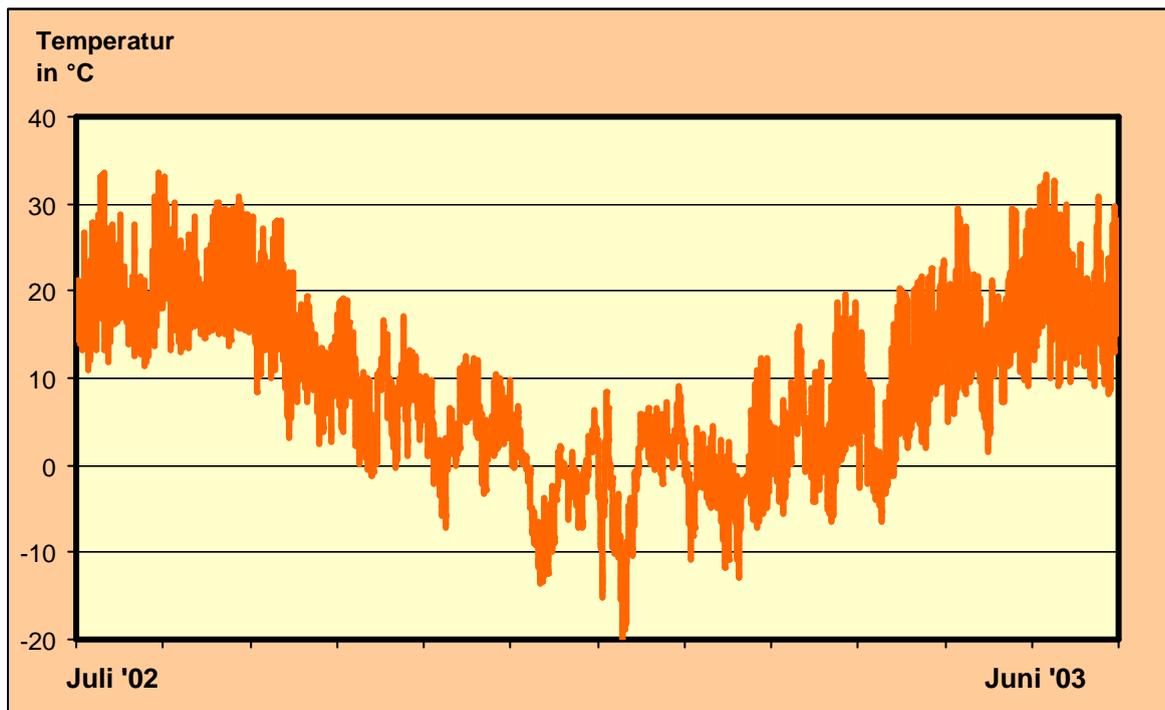


Abb. 5.3.1-1

Verlauf der Lufttemperatur im Zeitraum Juli 2002 bis Juni 2003

Wertet man die Temperaturdaten dahingehend aus, wie lange eine bestimmte Temperatur über- bzw. unterschritten wurde, so ist aus Abbildung 5.3.1-2 zu entnehmen, dass im Messzeitraum für 1276 Stunden (ca. zwei Monate) + 20 °C überschritten wurden und für etwas mehr als zwei Monate Werte unter dem Gefrierpunkt vorlagen.

Für die Entwicklung geeigneter Prüfprogramme zur Alterung infolge künstlicher UV-Belastung sind neben den Umgebungstemperaturen auch die strahlungsrelevanten Daten der Wetterstation auszuwerten. Die Abbildung 5.3.1-3 zeigt die im Zeitraum Juli 2002 bis Juni 2003 gemessenen Werte der Globalstrahlung. Danach ergibt sich eine maximale Bestrahlungsstärke von 924 W/m² und ein durchschnittlicher Wert von 125,6 W/m².

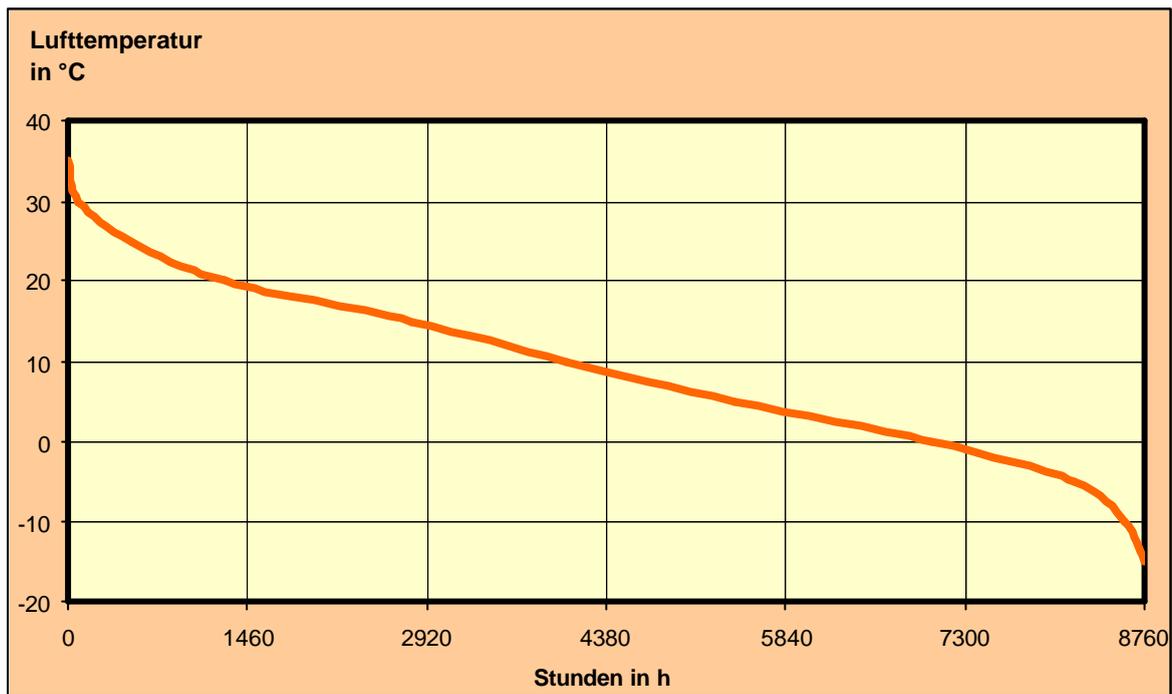


Abb. 5.3.1-2

Anzahl der Stunden einer Überschreitung einer bestimmten Lufttemperatur für den Zeitraum Juli 2002 bis Juni 2003

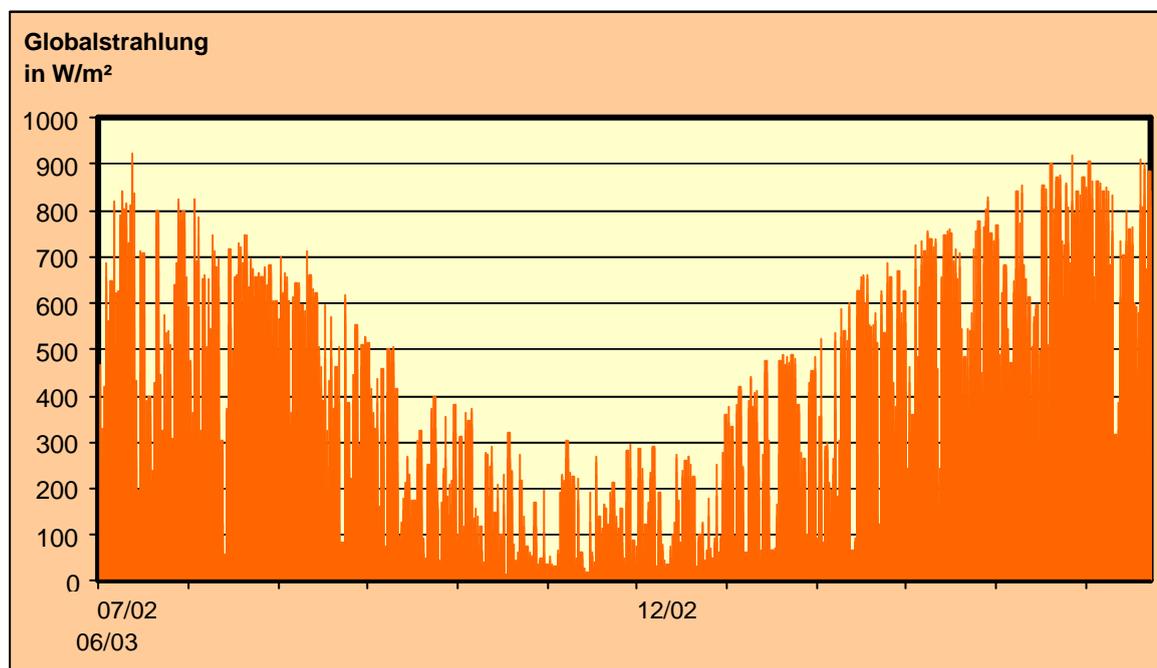


Abb. 5.3.1-3

Werte der horizontalen Globalstrahlung im Zeitraum Juli 2002 bis Juni 2003

Dieser mittlere Jahresdurchschnitt von $125,6 \text{ W/m}^2$ entspricht $3961 \text{ MJ}/(\text{m}^2\text{a})$. Um daraus den Wert der UV-Strahlendosis zu erhalten, muss mit dem Anteil der UV-Strahlung in der Globalstrahlung multipliziert werden. Nach Angaben des Deutschen

Wetterdienstes beträgt der UV-Anteil der Globalstrahlung 7 %. So ergibt sich die UV-Strahlendosis im Zeitraum Juli 2002 bis Juni 2003 für den Standort Cottbus zu 277 MJ/(m²a). Dabei ist anzumerken, dass bei der Bestimmung der UV-Strahlendosis eine energetische und keine spektrale Betrachtung vorgenommen wurde.

5.3.2 Temperaturmessungen an Unterspannbahnen

Temperaturmessungen an Unterspannbahnen konnten auf den Oberflächen der frei bewitterten Folien sowie einer durch eine Dachdeckung geschützten Bahn vorgenommen werden. Obwohl letztere nicht zu den für die Langzeituntersuchungen ausgewählten Unterspannbahnen gehörte, lieferte die Messung mit diesem Produkt gute Anhaltswerte über die unter einer Dachdeckung zu erwartenden Temperaturen.

Dabei ergab die kontinuierliche Messung unter der Dachdeckung die in Abbildung 5.3.2-1 dargestellten Temperaturverläufe für den Luftspalt zwischen Dachdeckung und Unterspannbahn sowie für die Oberflächentemperatur auf der Unterspannbahn. Es ist zu erkennen, dass bei Temperaturen der Außenluft von ca. 30 °C die Oberflächentemperatur der Folie unter der Dachdeckung im Bereich von 50 °C und mehr liegt.

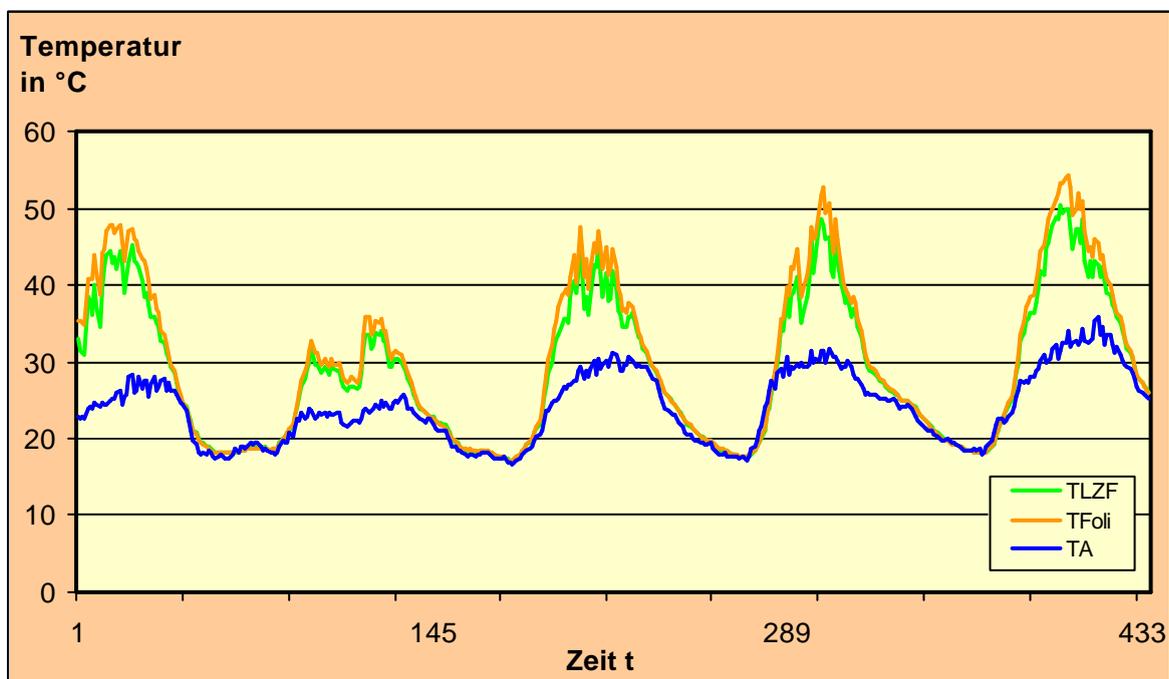


Abb. 5.3.2-1

Temperaturverläufe im Luftzwischenraum zwischen Dachdeckung und Unterspannbahn (TLZF) sowie Oberflächentemperatur der Unterspannbahn (TFoli)

Vergleicht man diese Werte mit Angaben aus der Literatur, so finden sich in [40] sogar höhere Temperaturen, die 70 °C über und 80 °C unter der Unterspannbahn überschreiten. Auch mit der in [41] angegebenen Berechnungsvorschrift ergeben sich für eine maximale sommerliche Außenlufttemperatur von 35 °C Temperaturen unter der Dachfolie von über 85 °C. Betrachtet man weiterhin die Oberflächentemperaturen der frei bewitterten und nicht durch eine Dachdeckung geschützten Unterspannbahnen, so sind vor allem an den dunkleren Folien Temperaturen bis knapp unter 70 °C feststellbar (siehe Abbildung 5.3.2-2). Im Winter wurden auf allen Probenoberflächen Werte unter – 30 °C gemessen.

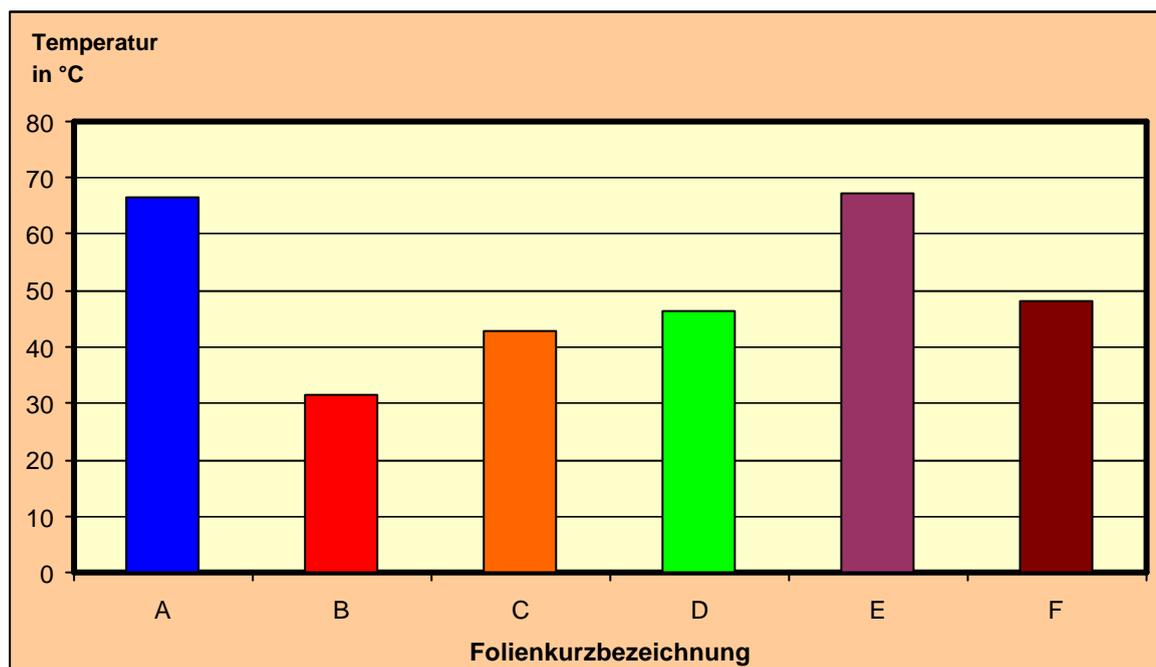


Abb. 5.3.2-2

Maximale Oberflächentemperaturen von frei bewitterten Unterspannbahnen; dabei stellten sich auf den dunkleren Produkten deutlich höhere Oberflächentemperaturen ein als auf den helleren Bahnen.

5.4 Prüfprogramm

Die Prüfungen zum Langzeitverhalten der Unterspannbahnen wurden an natürlich und künstlich gealterten Folien durchgeführt. Zu beachten waren insbesondere die nach DIN EN 13 859-1 für Unterdeck- und Unterspannbahnen in Dachkonstruktionen geforderten Untersuchungen der Materialeigenschaften (siehe Tabelle 5.4-1). Dabei war es in diesem Forschungsvorhaben nicht erforderlich, Versuche zum Brandverhalten, zur Formbeständigkeit und Maßhaltigkeit durchzuführen, da diese Prüfungen keine verwertbaren Daten zur Beschreibung des Alterungsverhaltens der Unterspannbahnen liefern.

In Hinblick auf eine dauerhaft funktionssichere Konstruktion sind die Luft- und Wasserdichtheit, der Widerstand gegen Wasserdurchgang sowie die Wasserdampfdurchlässigkeit und das Zug-Dehnungsverhalten als relevante Eigenschaften von Unterspannbahnen von Bedeutung. Aus diesem Grund werden diese Eigenschaften zur Beurteilung des Langzeitverhaltens als maßgebende Größen herangezogen.

Tabelle 5.4-1

Prüfnorm und Prüfumfang zur Bestimmung der Produkteigenschaften von Unterdeck- und Unterspannbahnen nach DIN EN 13 829-1

Produkteigenschaft	Prüfnorm	Prüfumfang
Länge, Breite, Gradheit flächenbezogene Masse	DIN EN 1848-2 und DIN EN 1849-2 Toleranzen nach DIN EN 13 859-1 Tab. 2	
Brandverhalten	Nach vorliegender Norm DIN EN (WI 00127065)	Zuordnung in Brand- klassen A bis F
Bestimmung der Wasser- dichtheit	Klasse A: DIN EN 1928 (mit veränderten Prüfbedingun- gen)	Wassersäule 200 mm für 2 h, 0,05 % Eosin Filterpapier 80 g/m ² ,
Widerstand gegen Wasser- durchgang	DIN EN 13 111	
Wasserdampfdurchlässigkeit	$s_d > 0,1$: Standardabwei- chung + Mittelwert $s_d < 0,2$: DIN EN ISO 12572 (Klima C) $s_d > 0,2$: DIN EN 1931	
Zug-Dehnungsverhalten	12 311-1 (mit verändertem Prüfumfang nach DIN EN 13 859-1, Anhang A)	Zugzylinder
Weiterreißwiderstand	EN 12 310-1 (mit veränder- tem Prüfumfang nach DIN EN 13 859-1, Anhang B)	wie Zug- Dehnungsprüfung
Maßhaltigkeit	EN 1107-1	
Kaltbiegeverhalten	EN 1109	
Beständigkeit gegen künstliche Alterung	DIN EN 1296 DIN EN 1297 (mit verändertem Prüfum- fang nach DIN EN 13 859-1, Anhang C)	2 Prüfsätze (je 5 quer, 5 längs), 400 mm x 250 mm waagrecht in Klimakammer legen

Diese relevanten Materialkennwerte wurden in Vorversuchen an fabrikneuen Proben, den so genannten „Nullproben“, bestimmt. Die Ergebnisse dienten dann als Referenzwert für die Untersuchungen nach einer Alterung (natürlich und künstlich).

Im nächsten Schritt waren die Effekte der Alterung aus natürlicher Langzeit- und beschleunigter Laborbewitterung zu untersuchen. Die beiden Versuchsreihen liefen parallel, um die zeitlich beschleunigten Versuchsergebnisse mit den natürlich bewitterten Langzeitproben abzugleichen. Stimmten die Ergebnisse in einigen Punkten nicht überein, mussten die Gründe der Abweichung geklärt werden (vgl. Abb. 1.5.4-1).

Bei der natürlichen Alterung kann mit Ausnahme der Probenausrichtung und -neigung kein Einfluss auf die auftretenden Belastungen genommen werden. Dagegen stehen bei den künstlichen Alterungsversuchen eine Vielzahl an Belastungsmöglichkeiten und deren Kombinationen zur Auswahl. Aus diesem Grund waren für den Fall unterschiedlicher Abbauerscheinungen nach natürlicher und künstlicher Alterung die Laborversuche zu optimieren.

Als erster Prüfansatz der künstlichen Alterung dienten die in der Praxis bestimmten Temperatur- und UV-Belastungen. Diese wurden zunächst getrennt auf die Unterspannbahnen aufgebracht, um so Erkenntnisse über das Ausmaß der Schädigung der einzelnen Belastungsgrößen Wärme und Strahlung zu gewinnen.

5.4.1 Alterung infolge natürlicher Belastungen

Für eine Alterung der diffusionsoffenen Unterspannbahnen unter natürlichen Umgebungsbedingungen hatte man die in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Freibewitterungsstände aufgebaut. Dabei war vorgesehen, die kleinen Prüfstände für Alterungsvorgänge von maximal drei Monaten einzusetzen. Sie dienten vor allem der Überprüfung von Alterungserscheinungen in den ersten Wochen der Freibewitterung. Dazu wurden aus diesen Prüfständen in Abständen von jeweils 4 Wochen (1 Monat) Proben entnommen und den genannten Untersuchungen der Materialeigenschaften unterzogen. Eine Auswertung dieser Proben konnte im Rahmen dieser Arbeit auf Grund des erheblichen Prüfaufwandes nicht vorgenommen werden.

Die diffusionsoffenen Unterspannbahnen auf dem Großbewitterungsstand waren maximal 24 Monate bzw. 96 Wochen der Witterung ausgesetzt. Dabei wurde in regelmäßigen Intervallen von 12 Wochen (3 Monate) jeder Bahn ein Prüfausschnitt entnommen und den Untersuchungen unterzogen.

Durch die südliche Ausrichtung der Freibewitterungsmodelle mit einer Neigung von 30° sollte die maximal mögliche natürliche Belastung der Unterspannbahnen erreicht werden. Zu verschärften Prüfbedingungen trugen auch die geographische Lage und die sich daraus ergebende Einstufung hinsichtlich des zu erwartenden Klimas bei. So wird Cottbus als Standort der Bewitterungsmodelle nach DIN 1055 in Windzone II und Schneelastzone III eingestuft. Hinsichtlich des sommerlichen Klimas gilt die Region nach DIN 4108-2 als „sommerheiß“.

5.4.2 Alterung infolge künstlicher Wärmebelastung

Bei Probekörpertemperaturen, die höher sind als unter natürlichen Bedingungen, können Abbaureaktionen künstlich beschleunigt werden. Die Alterung der Unterspannbahnen infolge erhöhter Wärmebelastung erfolgte mit den in Abschnitt 5.2.2 beschriebenen Klima- und Trockenschränken. Bei einer Alterung infolge künstlicher Wärmebelastung können zu hohe oder zu niedrige Temperaturen zu einer Verschlechterung der Übereinstimmung der Ergebnisse aus natürlichen Alterungsversuchen führen. Aus diesem Grund orientierten sich die minimal angesetzten Temperaturen an real gemessenen Werten. Eine beschleunigte Alterung wurde durch eine schrittweise Anhebung der Belastungen hervorgerufen.

Die Auswertung der in Kapitel 5.3 beschriebenen Aufzeichnungen der Wetterdaten in Verbindung mit den Messungen der Oberflächentemperaturen der Unterspannbahnen zeigt, dass bei Lufttemperaturen über 25 °C unter der Dachdeckung Temperaturen von bis zu 50 °C auftreten, die bei frei bewitterten Folien sogar 70 °C erreichen können. Aus Abbildung 5.3.1-2 ist zu entnehmen, dass sich im Jahresverlauf die Lufttemperaturen über 25 °C auf insgesamt ca. 21 Tage im Jahr addieren.

Um eine beschleunigte Alterung hervorzurufen, sind die Alterungsbelastungen anzuheben, was durch erhöhte Temperaturen und/oder längere Belastungszeiträume erreicht werden kann. Für die Laborversuche an den betrachteten Unterspannbahnen wurde die maximal gemessene Oberflächentemperatur der Folien von 70 °C auf 80 °C erhöht, wobei eine Belastungsdauer von 4 Wochen vorgesehen war.

Zum Vergleich der Alterungserscheinungen, die durch dieses Belastungsprogramm hervorgerufen wurden, war für den gleichen Zeitraum auch eine Lagerung der Unterspannbahnen bei 40 °C und 60 °C vorgesehen. Dadurch wurden Temperaturbereiche erfasst, die während eines Jahres für längere Zeit unterhalb einer Dachdeckung auftreten können (vgl. Abb. 5.3.2-1). Die Prüfprogramme für eine künstliche Wärmealterung sind in Tabelle 5.4.2-1 zusammengefasst.

Tabelle 5.4.2-1

Prüfprogramme für Unterspannbahnen unter reiner Wärmebelastung

Kurzbezeichnung Versuchsprogramm	Temperatur in °C	Belastungsdauer in Wochen
40 °C / 4 Wo.	40	4
60 °C / 4 Wo.	60	4
80 °C / 4 Wo.	80	4
70 °C / 12 Wo. ^{*)}	70	12

^{*)} Normversuch einer beschleunigten Alterung infolge erhöhter Temperatur nach DIN EN 1296. Diese erfolgt nach einer 14-tägigen UV-Belastung mit einer Bestrahlungsstärke von 45,1 W/m².

5.4.3 Alterung infolge künstlicher UV-Belastung

Die Bestimmung der Produkteigenschaften von Unterspannbahnen nach DIN EN 13 859-1 erfordert auch Untersuchungen nach einer künstlichen Alterung. Mit der in DIN EN 1297 verlangten mittleren UV-Bestrahlungsstärke in der Prüfkörperebene von 45 W/m² ergibt sich aus der in DIN EN 13 859-1 angegebenen Belastungsdauer von 336 Stunden eine Strahlungsbeanspruchung von 54 MJ/m². Wird diese mit der jährlichen UV-Strahlendosis am Freibewitterungsstandort (277 MJ/(m²a), (siehe Abschnitt 5.3.1)) verglichen¹⁾, so lässt sich durch Gleichung 5.4.3-1 eine äquivalente Dauer, der durch den Laborversuch aufgebracht UV-Strahlung, bestimmen:

$$\frac{H_{\text{Norm}}}{H_{\text{Standort}}} = \frac{54 \text{ MJ/m}^2}{277 \text{ MJ/m}^2\text{a}} = 0,19 \text{ a} \quad (5.4.3-1)$$

Bei 365 Tagen/Jahr entspricht diese Norm-UV-Belastung einer für Cottbus vergleichbaren Strahlendosis von 71 Tagen. Ob diese Strahlendosis in Verbindung mit den nach Norm geforderten 50 °C in der Prüfkammer auch vergleichbare Alterungserscheinungen bewirkt, war durch die entsprechenden Untersuchungen zu überprüfen.

Beschleunigte Alterungserscheinungen können durch eine Erhöhung der Strahlungsdosis (Bestrahlungsenergie) und/oder eine Verlängerung des Belastungszeitraums erreicht werden. Gleichzeitig ist es auch möglich, die Temperatur während der UV-Bestrahlung zu variieren. Es ergeben sich die in Tabelle 5.4.3-1 aufgeführten Belastungsprogramme.

¹⁾ Dabei handelt es sich um eine energetische Betrachtung der UV-Strahlung. Ein spektraler Einfluss wurde nicht berücksichtigt.

Tabelle 5.4.3-1

Prüfprogramme für Unterspannbahnen unter UV-Belastung bei 50 °C bzw. 70 °C

Kurzbezeichnung Versuchs- programm	Bestrah- lungsenergie in W/(m ² nm)	Bestrah- lungsstärke in W/m ²	Belas- tungsdauer in Stunden	Strahlungs- beanspru- chung in MJ/m ²
UV076/50/336 ^{*)}	0,76	45,1	336	54,5
UV076/50/408	0,76	45,1	408	66,2
UV076/70/408	0,76	45,1	408	66,2
UV095/50/672	0,95	56,4	672	136,4

^{*)} Normversuch einer beschleunigten Alterung infolge UV-Strahlung nach DIN EN 1297. Nach der UV-Belastung erfolgt eine 90-tägige Wärmelagerung bei 70 °C.

Nach Gleichung 5.4.3-1 bedeuten Strahlungsbeanspruchungen von 66,2 MJ/m² bzw. 136,4 MJ/m² einen äquivalenten Jahreszeitraum von 87 Tagen (12 Wochen) bzw. 178 Tagen (25 Wochen). Mit den so gewählten UV-Belastungen war ein Vergleich der künstlich gealterten Folien mit den über 3 bzw. 6 Monate frei bewitterten Unterspannbahnen möglich.

5.4.4 Alterung infolge künstlicher Wärme- und UV-Belastung

Für die kombinierte Belastung der Unterspannbahnen aus Wärme und UV-Strahlung hatte man die nach DIN EN 13 859-1 verlangten Belastungsgrößen auf die Unterspannbahnen aufgebracht. Dabei war eine mittlere UV-Bestrahlungsstärke von 45 W/m² (bei 50 °C) für 14 Tage und eine anschließende Wärmelagerung bei 70 °C über 90 Tage vorgesehen (siehe Tabelle 5.4.2-1 und 5.4.3-1).

5.5 Praxisrelevante Prüfungen an Unterspannbahnen

In den vorangegangenen Kapiteln wurden hinsichtlich einer dauerhaften und funktionssicheren Dachkonstruktion der Widerstand gegen Wasserdurchgang sowie die Wasserdampfdurchlässigkeit, die Luftdichtheit und das Zug-Dehnungsverhalten als die wesentlichsten Eigenschaften der Unterspannbahnen definiert.

Zur Bestimmung dieser Eigenschaften verweist DIN EN 13 859-1 auf weitere Normen und die darin beschriebenen Prüfverfahren (siehe Tabelle 5.4-1). Allerdings beziehen sich die Prüfungen auf die Bestimmung der Materialeigenschaften neuer Proben, weshalb zur Beurteilung des Langzeitverhaltens die in DIN EN 13 859-1 geforderten

Prüfungen für gealterte Materialien anzupassen sind, um bestimmte Kennwerte zu ermitteln.

5.5.1 Bestimmung des Widerstandes gegen Wasserdurchgang

Die Prüfung der Wasserdichtheit sollte nach DIN EN 1928 bzw. bei nicht Bestehen dieser Prüfung nach DIN EN 13 111 mit den in DIN EN 13 859-1 genannten Änderungen erfolgen. Allerdings ist das Ergebnis dieser Prüfungen lediglich eine Einstufung in eine Klasse A, B oder C, woraus sich für eine Beurteilung der Langlebigkeit keine Erkenntnisse gewinnen lassen.

Aus diesem Grund erfolgte die Bestimmung des Widerstandes gegen Wasserdurchgang in einem hydrostatischen Druckversuch nach EN 20 811. Diese aus dem Textilbereich stammende Prüfung wird von der Norm wie folgt beschrieben:

„Die hydrostatische Druckhöhe, die eine Trennlage dem Durchdringen von Wasser entgegensetzt, ist ein Maß für den Wasserdurchgang. Eine Probe wird unter Normalbedingungen einem stetig steigenden Wasserdruck auf einer Seite ausgesetzt, bis an drei Stellen eine Durchdringung erfolgt. Der Druck, bei dem das Wasser den Versuchskörper durchdringt wird notiert (max. h).“

Der Versuchsaufbau entspricht dabei dem der Prüfung auf Wasserdichtheit nach DIN EN 1928 jedoch ohne eine Begrenzung der Druckhöhe auf 200 mm und ohne stützende Glas- bzw. Plexiglasscheibe (Abb. 5.5.1-1). Dadurch wird ein ständig steigender Wasserdruck auf der Probenunterseite erzeugt.

Dabei entspricht das Ergebnis dem Verhalten einer Unterspannbahn, die (über einen gewissen Zeitraum) einem Wasserdruck ausgesetzt ist. Die Steigungsgeschwindigkeit des Wasserdruckes beträgt (60 ± 3) cm Wassersäule pro Minute, d.h. 1 cm/s. Nach Norm liegt ein Versagen immer dann vor, wenn der dritte einzelne Tropfen durch die Bahn tritt.

Die Prüfeinrichtung besteht nach Abbildung 5.5.1-1 aus einem zylindrischen Rahmen, in den die zu prüfende Unterspannbahn mit einem Klemmflansch eingespannt wird. Das kreisförmige Gefäß weist einen Durchmesser von 150 mm auf und stellt den Boden eines Wasserbehälters dar. An den Rahmen schließt sich ein Rohr mit einem nach oben offenen Ende an.

Damit bis zum Versagen der Unterspannbahn ein ausreichend großer Wasserdruck auf die Probe aufgebracht werden kann, befindet sich das offene Ende des Steigrohres 1000 cm (10 m) über der Flanschebene.

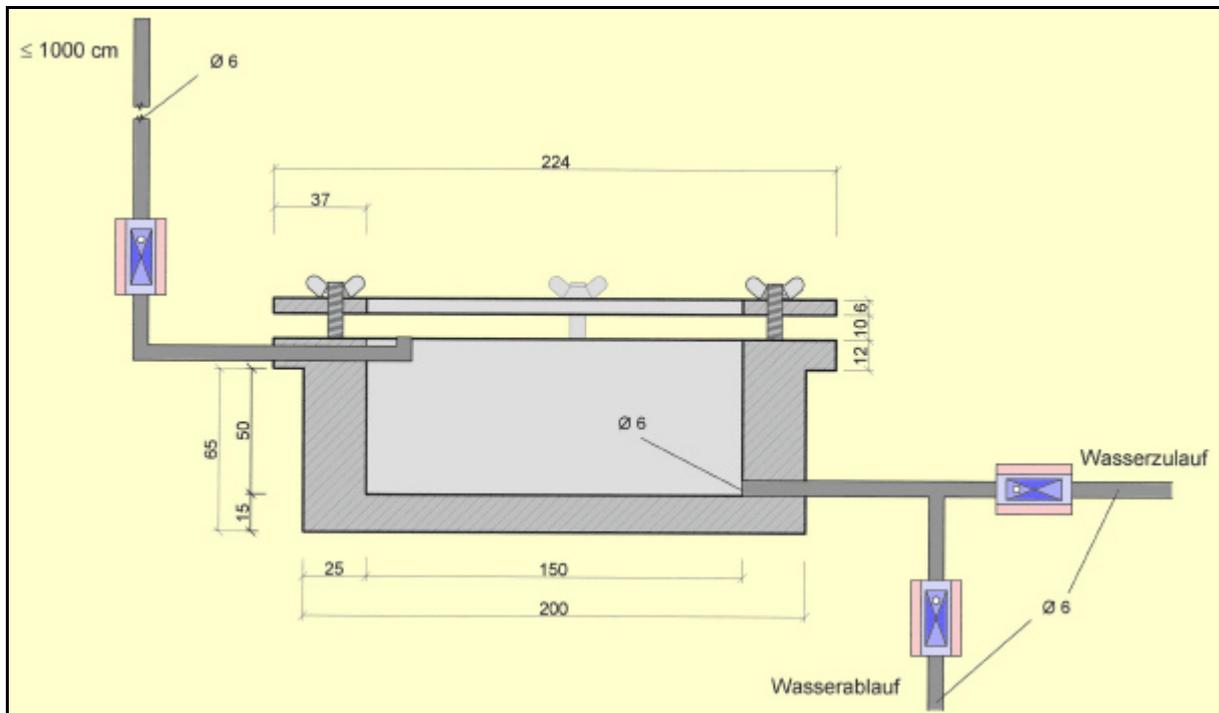


Abb. 5.5.1-1

Prüfanordnung zur Bestimmung der Wasserdichtheit von Unterspannbahnen (Klasse A) in Anlehnung an DIN EN 1928

Der Prüfkörper wird mit seiner Oberseite nach unten in die Prüfeinrichtung eingesetzt. Auf diese Weise kommt die der Witterung bzw. Feuchtigkeit ausgesetzte Oberfläche während der Prüfung mit dem Wasser in Berührung. Für die Prüfung werden in Anlehnung an DIN EN 13 859 drei Proben mit einem Durchmesser von (200 ± 2) mm aus einer Unterspannbahn entnommen und auf Wasserdurchgang geprüft.

5.5.2 Bestimmung der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke

Die Prüfung der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke (s_d -Wert) wurde nach DIN EN ISO 12 572 „Wärme- und Feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit“ sowie den in der Produktnorm DIN EN 13 859-1 beschriebenen Abweichungen der Norm durchgeführt. Dieses Verfahren wurde angewendet, obwohl einige der in Abschnitt 5.1 ausgewählten Unterspannbahnen s_d -Werte von kleiner 0,1 m aufweisen und somit außerhalb des Anwendungsbereiches der DIN EN ISO 12 572 liegen.

Aus verschiedenen Veröffentlichungen ist bekannt, dass das in der Norm beschriebene gravimetrische Verfahren für diffusionsoffene und extrem-diffusionsoffene Unterspannbahnen zu hohe s_d -Werte liefert [98], [99]. Zur Beurteilung des Langzeitverhaltens und der Entwicklung des s_d -Wertes nach einer Alterung ist die in DIN EN ISO 12 572 angegebene Messmethodik jedoch hinreichend genau, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten.

Die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke des Prüfkörpers wurde durch Bestimmung des Wasserdampf-Diffusionsstroms im stationären Zustand ermittelt. Der Prüfkörper bildete dabei den oberen Abschluss eines Gefäßes, in dem sich entweder ein Trockenmittel (trockenes Prüfgefäß) oder eine wässrige Lösung (nasses Prüfgefäß) befand und somit ein konstanter Wasserdampfdruck aufrechterhalten wurde.

Anschließend wurde die Anordnung in eine Klimakammer mit einem vom Gefäßinneren abweichenden konstanten Wasserdampfdruck gestellt. Infolge der unterschiedlichen Wasserdampfdrücke zwischen Prüfgefäß und Prüfkammer stellte sich im stationären Zustand ein konstanter Diffusionsstrom durch den Prüfkörper ein. Um die Wasserdampfdiffusionsstromdichte im stationären Zustand zu bestimmen, wurden periodische Wägungen der Prüfanordnung durchgeführt.

Für die Prüfung der Unterspannbahnen wurde ein kreisförmiger Probekörper gewählt, dessen Prüffläche $0,0079 \text{ m}^2$ (bei einem Durchmesser von $d = 10 \text{ cm}$) betrug und somit über der von der Norm geforderten Mindestfläche von $0,005 \text{ m}^2$ lag. Da die Probekörperfläche kleiner als $0,02 \text{ m}^2$ bzw. der Probekörperdurchmesser kleiner als 16 cm war, verlangte DIN EN ISO 12 572 die Prüfung von mindestens fünf Probekörpern.

Bei der Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit waren die Prüfbedingungen des Klimas C einzuhalten. Diese Klimarandbedingungen bedeuteten eine relative Luftfeuchte im Prüfgefäß von $(50 \pm 3) \%$ und im Klimaschrank von $(93 \pm 3) \%$ bei einer Temperatur von $(23 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$. Die Kurzbezeichnung des Klimas C lautet: 23 – 50/93.

Prüfungen im Klima C – also mit nassem Prüfgefäß – ergeben Hinweise zum Verhalten des Stoffes bei hoher Luftfeuchte. Bei höheren Luftfeuchten beginnen die Poren des Stoffes Wasser aufzunehmen, was den Transport von Wasser in flüssiger Phase erhöht und gleichzeitig den Dampftransport reduziert.

Zur Prüfungsvorbereitung wurde die gesättigte Salzlösung (Magnesiumnitrat-Hexahydrat) mit einer Mindestdiefe von 15 mm in jedes Prüfgefäß gegeben. Der genau abgemessene Probekörper wurde in das Gefäß eingedichtet. Dabei musste ein Luftraum zwischen gesättigter Lösung und Probekörper von mindestens (15 ± 5) mm verbleiben.

Die derart hergestellten Prüfanordnungen wurden in einen auf $(23 \pm 0,5)$ °C und (93 ± 3) % relative Feuchte eingestellten Prüfraum eingebracht und dann in zeitlichen Abständen gewogen.

Neben der Temperatur- und Feuchtemessung war auch der barometrische Druck im Prüflabor täglich während der Prüfung festzustellen bzw. bei der nächstliegenden meteorologischen Station zu erfragen.

Die Wägung erfolgte so lange, bis fünf aufeinander folgende Bestimmungen der Massenänderung je Zeiteinheit für jeden Probekörper innerhalb ± 5 % des Mittelwerts dieser Probekörper konstant waren und bis die Massenänderung der Prüfgefäßanordnung das Hundertfache der Wiederholbarkeit des Wägeverfahrens überstieg.

Zur Erleichterung des Erkennens der Massenkonstanz wurde eine Kurve der Massenänderung über die Zeit aufgetragen.

5.5.3 Prüfung des Zug-Dehnungsverhaltens

Die Prüfung der Zugfestigkeit wurde nach DIN EN 12 311-1 „Abdichtungsbahnen – Teil 1: Bitumenbahnen für Dachabdichtungen – Bestimmung des Zug-Dehnungsverhaltens“ mit den in der Produktnorm DIN EN 13 859-1 Anhang A beschriebenen Änderungen durchgeführt.

In der Prüfung wurde ein Probekörper mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit gedehnt, bis er reißt. Die Zugkraft und die entsprechende Längenänderung der Materialprobe wurden dazu während des Versuchs kontinuierlich aufgezeichnet.

Der Prüfkörper wurde gemäß Abbildung 5.5.3-1 in die nach DIN EN 13 859-1 mindestens 50 mm breiten Spannklemmen der Zugprüfmaschine eingespannt. Dabei war darauf zu achten, dass es am Einspannsystem zu keinem vorzeitigen Versagen des Prüfkörpers in oder an den Spannklemmen kommt. Die Prüfung erfolgte anschließend bei einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit der Klemmen von (100 ± 10) mm/min.

Dabei wurde die Höchstzugkraft über der Dehnung registriert, welche sich aus der aufgezeichneten Abstandsänderung der Klemmen berechnete und in Prozent der ursprünglichen lichten Prüflänge (100 mm^1) anzugeben war.

Die Abweichung gegenüber DIN EN 12 311-1 bestanden darin, dass der Prüfkörper einmal zu falten war, um ein Herausrutschen des Prüfkörpers aus den Klammern der Zugprüfmaschine zu verhindern (Abb. 5.5.3-2). Die auf die genormte Einspannbreite von 50 mm bezogene Angabe der Höchstzugkraft erfolgte durch die Halbierung des gemessenen Wertes der Zugkraft.

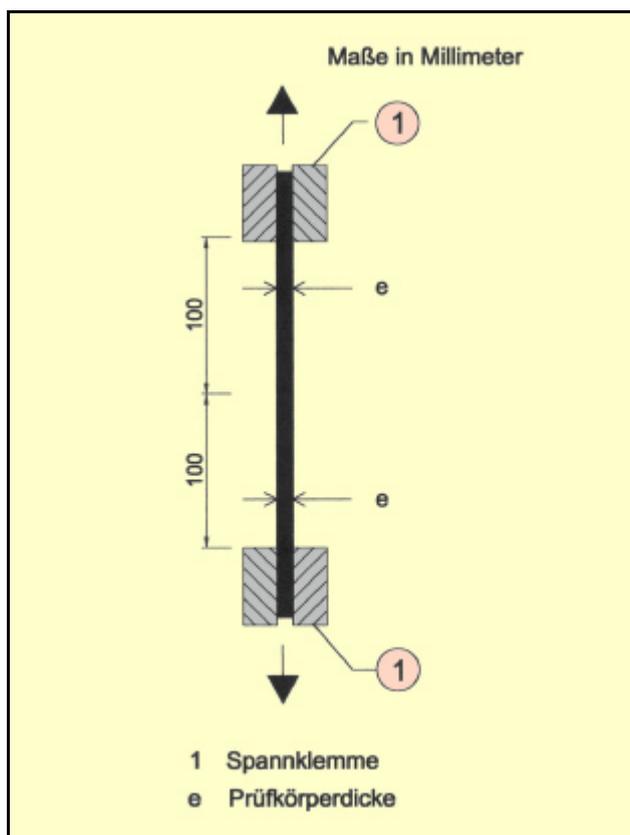
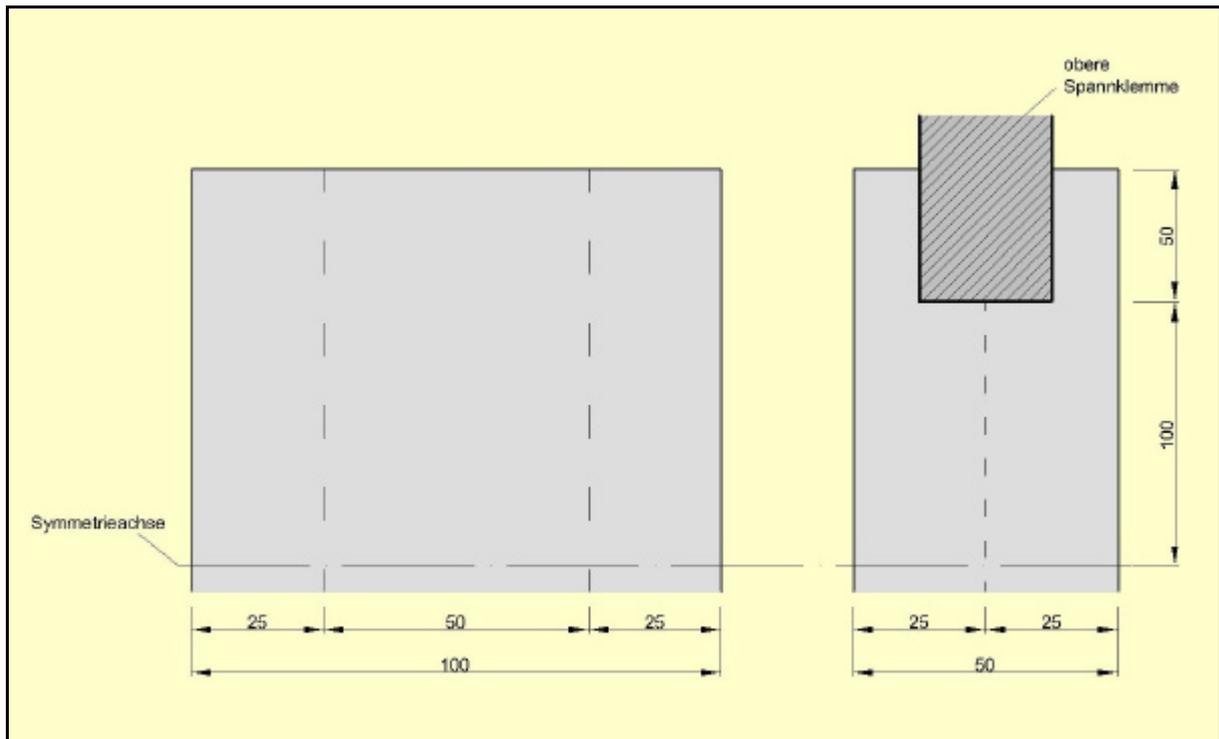


Abb. 5.5.3-1

Prüfanordnung zur Bestimmung der Zug-Dehnungseigenschaften von Unterspannbahnen) nach DIN EN 12 311-1 und DIN EN 13 859-1

Für die Bestimmung des Zug-/Dehnungsverhaltens war die Vorbereitung von zwei Prüfkörper-Sätzen erforderlich. Sowohl in Längs- als auch in Querrichtung der Unterspannbahn war ein Satz von je fünf Probekörpern zu entnehmen. Anschließend wurde der 100 mm breite Prüfkörper gemäß Abbildung 5.5.3-2 gefaltet und fest in die Spannklammern der Zugprüfmaschine eingesetzt, so dass die Längsachse des Prüfkörpers und die Achsen der Spannklammern übereinstimmten. Der lichte Abstand zwischen den Spannklammern musste (100 ± 1) mm betragen, wobei der Prüfkörper konzentrisch einzusetzen war. Vor Beginn des Versuchs wurde eine Vorkraft aufgebracht (maximal 5 N), um den Prüfkörper zu spannen.

¹⁾ Die Norm sieht eine Prüflänge von 200 mm vor. Diese wurde aufgrund der Dehnfähigkeit der Unterspannbahnen auf 100 mm reduziert.

**Abb. 5.5.3-2**

Falten und Einsetzen des Prüfkörpers in das Prüfgerät nach DIN EN 13 859-1

Die Höchstzugkraft und die dazugehörige Dehnung ergaben sich aus dem aufgezeichneten Zugkraft-Dehnungsverlauf. Die auf eine einlagige Probe umgerechnete Höchstzugkraft wurde in $N/50$ mm mit der zugehörigen Dehnung für die Prüfrichtung des Prüfkörpers angegeben. Für die fünf Prüfkörper wurden für jede Prüfrichtung die Einzelwerte für Zugkraft und Dehnung sowie die zugehörigen Mittelwerte (für die Zugkraft auf 5 N, für die Dehnung auf ein Prozent gerundet) angegeben.

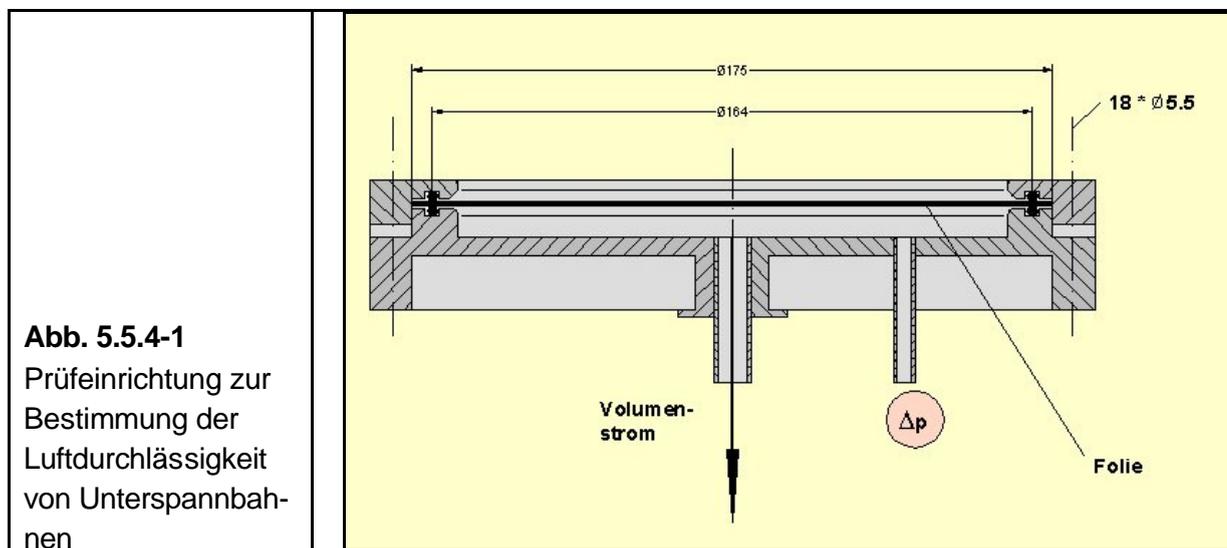
Nicht ausgewertet wurden Prüfergebnisse, bei denen der Bruch des Prüfkörpers weniger als 10 mm von der Spannklemme entfernt erfolgte oder bei unzulässigen Schlupf innerhalb der Spannklemmen. In diesen Fällen wurde der Versuch mit einem Ersatzprüfkörper wiederholt.

5.5.4 Bestimmung der Luftdurchlässigkeit

Die Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Unterspannbahnen sollte die Prüfungen zum Wasserdurchgang sowie zur Wasserdampfdurchlässigkeit ergänzen. Dabei simuliert der Test als Unterdruckversuch die Sogwirkungen, denen die Unterspannbahnen in ihrer Funktion als Noteindeckung bei (stärkeren) Windereignissen ausgesetzt sind. Werden bei der Verlegung der Unterspannbahnen die Überlappungen verklebt, bilden die Dachfolien eine geschlossene Ebene. Diese kann in Verbindung mit luftdichten Anschlüssen an der Tragkonstruktion auch zur Herstellung einer

luftdichten Gebäudehülle herangezogen werden. Obwohl die Überprüfung der Luftdurchlässigkeit in der Produktnorm DIN EN 13 859-1 nicht gefordert wird, sollte sie aus den genannten Gründen bestimmt werden, um Aussagen hinsichtlich möglicher Veränderungen nach einer Alterung zu liefern.

Die Prüfeinrichtung bestand aus einem runden Gefäß mit einem Durchmesser von 17,5 cm (siehe Abbildung 5.5.4-1). In dieses Gefäß wurde die zu prüfende Unterspannbahn als obere Abdeckung eingesetzt, so dass ein geschlossener Behälter entstand. Es befand sich lediglich eine Öffnung in der Mitte des Gefäßes, aus der im Versuch die Luft herausgesaugt wurde und so einen Unterdruck unter der Produktprobe erzeugte. Durch eine weitere Öffnung im Boden konnte die Druckdifferenz zwischen außen und innen gemessen werden.



Dabei war die erforderliche Druckdifferenz Δp zur Erzeugung eines messbaren Luftvolumenstroms durch die Folien von der Durchlässigkeit der Unterspannbahn abhängig und konnte nicht pauschal angegeben werden. Aus diesem Grund erfolgten Mehrfachmessungen, wobei die Druckdifferenz in 50 Pa Schritten zu steigern war.

5.5.5 Chemisch-analytische Untersuchungen

Die zuvor beschriebenen Prüfungen an Unterspannbahnen wurden durch chemisch-analytische Untersuchungsmethoden begleitet. So gibt es bei der Analyse von Alterungsvorgängen an Kunststoffen verschiedene Methoden, von denen üblicherweise die UV/VIS-Spektroskopie angewendet wird.

Da es nicht Ziel dieser Arbeit war, eine genaue Analyse chemischer Prozesse während der Folienalterung durchzuführen, sondern ausschließlich den für die Baupraxis relevanten Vorgang der Alterung zu verfolgen, sollte in dieser Forschungsarbeit die Röntgendiffraktometrie (XRD) als chemisch-analytische Methode eingesetzt werden.

Bei der Röntgendiffraktometrie handelt es sich um eine so genannte Beugungsmethode, mit der eine Bestimmung des kristallinen Anteils in teilkristallinen Polymeren möglich ist. Das Prinzip der Röntgenbeugung beruht auf der Analyse der Beugung von Röntgenstrahlen an Raumgittern, d.h. an regelmäßig räumlich angeordneten atomaren Bausteinen (Kristallen). Von diesen atomaren Bausteinen gehen infolge der Beugung kugelförmige Elementarwellen aus, die miteinander wechselwirken können [70].

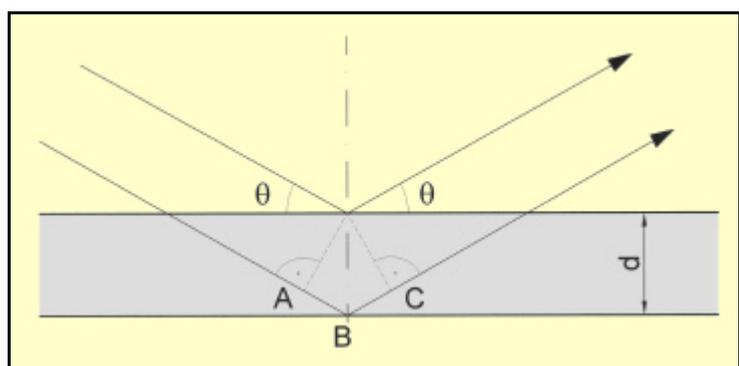
Aus der winkelabhängigen Intensität der am Gitter abgebeugten Röntgenstrahlung lässt sich die räumliche Anordnung der atomaren Bausteine des Gitters bestimmen (Gitterstrukturbestimmung). Röntgenstrahlen einer Wellenlänge λ können an einem System von parallelen, übereinander liegenden Netzebenen, die einen Abstand d besitzen, nur dann eine Beugungsinterferenz bzw. ein spezifisches Verstärkungs-Beugungs-Signal bilden, wenn die „Braggsche Gleichung“ erfüllt ist (Abb. 5.5.5-1):

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta \quad (5.5.5-1)$$

mit: n = Beugungsordnung
 θ = Braggscher Beugungs- oder Glanzwinkel

Abb. 5.5.5-1

Röntgenstrahlen ergeben an einer Netzebenenschar einer kristallinen Substanz nur dann ein Interferenz-Beugungs-Signal, wenn die Braggsche Gleichung erfüllt ist:
 $\sin \theta = AB/d \rightarrow$
 $AC = 2 \cdot AB = 2 \cdot d \cdot \sin \theta \rightarrow$
 $n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta$



Bei der Aufnahme des Beugungsdiagramms der Unterspannbahnen dreht sich die in symmetrischer Reflexionsstellung befindliche ebene Kunststoff-Folie mit der Winkelgeschwindigkeit ω , die Detektoreinheit mit der Geschwindigkeit 2ω (siehe Abbildung 5.5.5-2).

5 Vorbereitung der Alterungsprüfungen

Dadurch befindet sich die Probe bei jedem Winkel θ in Braggscher-Reflexionsstellung. Aufgezeichnet wird dann die von der Probe abgebeugte Röntgenintensität I als Funktion des Beugungswinkels θ , meist als Funktion des doppelten Beugungswinkels 2θ ($I = f(2\theta)$).

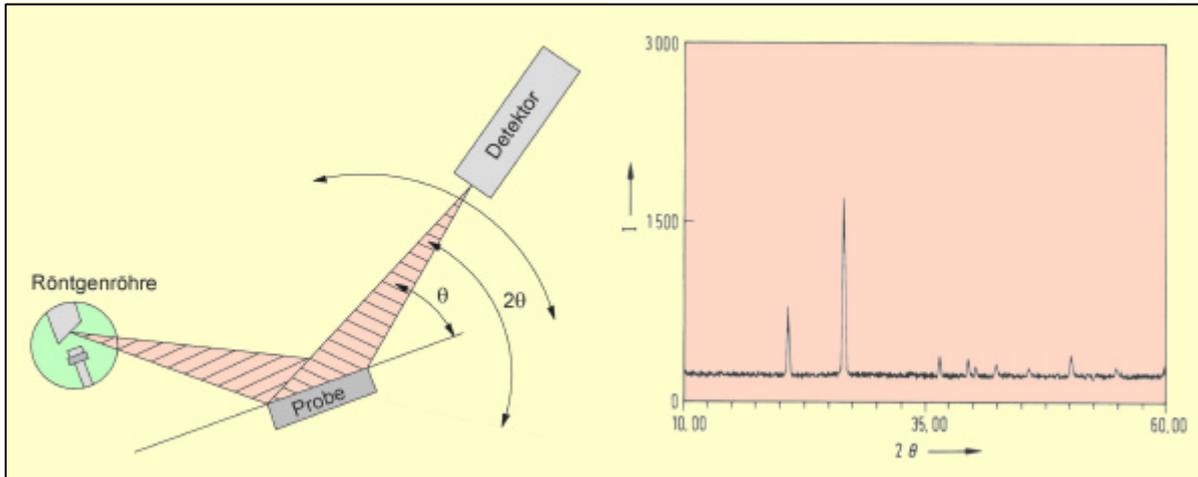


Abb. 5.5.5-2

Anordnung von Röntgenröhre, Detektor sowie Probekörper in einem Röntgendiffraktometer (links). Exemplarische Darstellung eines Röntgenbeugungsdiagramms einer SiO_2 -Probe (rechts).

6 Versuchsergebnisse aus natürlicher und künstlicher Bewitterung

Dieser Abschnitt stellt die Ergebnisse der in Kapitel 5.5 beschriebenen Prüfungen vor. Dabei wurden den Untersuchungen an natürlich und künstlich gealterten Unterspannbahnen die Ergebnisse der nicht gealterten, neuen Proben als Referenzwerte zu Grunde gelegt.

Die Darstellung der Resultate erfolgt in diesem Kapitel zunächst gemeinsam für alle untersuchten Unterspannbahnen. Dabei sollen die allgemeinen Tendenzen der Alterungserscheinungen aufgezeigt werden, denen die Folien folgen. Weiterhin ist durch die gewählte Darstellung ein Vergleich der unterschiedlichen Produkte möglich, wodurch sich unter Umständen Gesetzmäßigkeiten des Materialabbaus hinsichtlich der jeweiligen Folieneigenschaften ableiten lassen.

In Anhang C werden ausgewählte Versuchsergebnisse getrennt für die einzelnen Unterspannbahnen dargestellt. Damit ist es möglich, baupraktisch relevante Werte aus den Diagrammen abzulesen.

6.1 Bestimmung des Widerstandes gegen Wasserdurchgang

Die Bestimmung des Widerstandes gegen Wasserdurchgang wurde nach EN 20 811 durchgeführt. Mit der genauen Feststellung der hydrostatischen Druckhöhe bei der das Wasser den Versuchskörper an drei Stellen durchdrungen hat, konnte eine Aussage über zu- bzw. abnehmende Werte nach einer Alterung erfolgen.

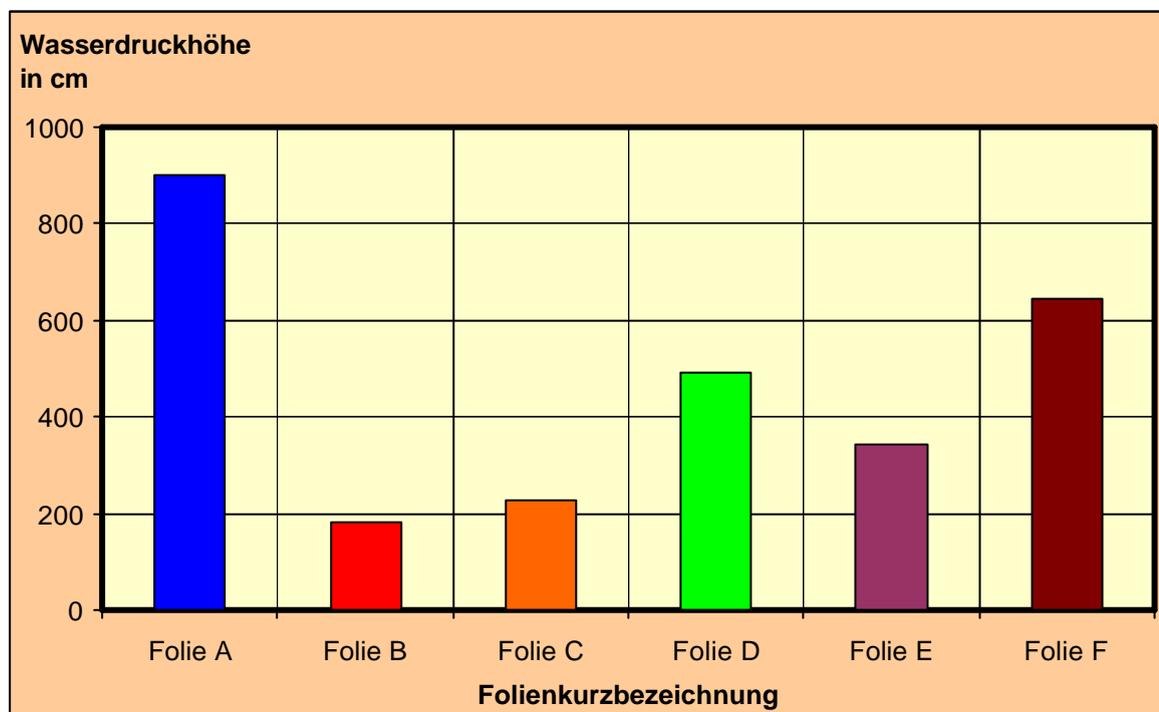
6.1.1 Widerstand gegen Wasserdurchgang neuer Unterspannbahnen

Die Wasserdruckhöhe war zunächst für neue, nicht gealterte Unterspannbahnen zu bestimmen, um diesen Wert mit den Ergebnissen der Prüfungen von gealterten Bahnen vergleichen zu können. In Tabelle 6.1.1-1 wurden die im Laborversuch ermittelten Druckhöhen, als Mittelwert aus mindestens drei Messungen, den Angaben der Hersteller gegenüber gestellt. Die Prüfung ergab für alle Unterspannbahnen Wasserdruckhöhen von deutlich über 100 cm (siehe Abbildung 6.1.1-1).

Tabelle 6.1.1-1

Wasserdruckhöhe neuer Unterspannbahnen im Vergleich zu den Herstellerangaben

Kurzbezeichnung der Unterspannbahn	Wasserdruckhöhe (Herstellerangabe) in cm	Wasserdruckhöhe (Laborprüfung) in cm
A	„dicht“	900
B	> 100	180
C	> 150	227
D	> 150	489
E	> 400	344
F	700	644

**Abb. 6.1.2-1**

Maximale Wasserdruckhöhen neuer, nicht gealterter Unterspannbahnen; die erreichten Druckhöhen liegen deutlich über 100 cm.

Obwohl die maximale Druckhöhe von $h_{\max} = 900$ cm durch die zweilagige Bahn A erreicht wurde, ist für die anderen Produkte ein Zusammenhang zwischen Lagenzahl, Gewicht und dem Widerstand gegen Wasserdurchgang erkennbar. Bahnen mit einer oder zwei Lagen erreichten in der Regel eine geringere Wasserdruckhöhe als Bahnen, welche aus drei oder mehr Lagen zusammengesetzt sind. Bei gleicher Lagenzahl besaß die Bahn mit dem höheren Gewicht den größeren Widerstand gegen Wasserdurchgang (siehe Tabelle 6.1.1-2).

Tabelle 6.1.1-2

Maximale Wasserdruckhöhe neuer Unterspannbahnen in Abhängigkeit von Anzahl der Lagen und Foliengewicht

Kurzbezeichnung der Unterspannbahn	Anzahl der Lagen	Gewicht in g/m^2	maximale Wasserdruckhöhe h_{max} in cm
B	1	60	180
C	2	105	227
E	3	155	344
D	3	175	489
F	5	700	644

Die zweilagige Folie A stellte mit einer Wasserdruckhöhe von 900 cm eine Ausnahme zu der in Tabelle 6.1.1-2 aufgezeigten Abhängigkeit zwischen Lagenanzahl und erreichbarem Widerstand gegen Wasserdurchgang dar. Allerdings liegt das Gewicht dieser Unterspannbahn mit 190 g/m^2 über dem der beiden dreilagigen Bahnen. Lediglich die fünfteilige Folie F ist mit 700 g/m^2 noch schwerer (vgl. Tab. 6.1.1-2), wobei sie nicht die Druckhöhe $h_{\text{max}} = 900 \text{ cm}$ der Bahn A erreichte.

Betrachtet man die Ausgangsstoffe der Unterspannbahnen, so ist das Produkt A als einziges mit einer PU-Schicht versehen. Dies könnte als Grund des hohen Widerstands gegen Wasserdurchgang gedeutet werden. Bei den anderen Folientypen zeigte sich, dass das Produkt aus Polyethylen (Folie B) der geringsten Wasserdruckhöhe standhielt. Auch bei den dreilagigen Bahnen besaß das Produkt E, welches aus zwei äußeren Schichten PP und einer Mittellage PE zusammengesetzt ist, weniger Widerstand gegen Wasserdurchgang als Bahn D, die aus drei Lagen PP besteht.

6.1.2 Widerstand gegen Wasserdurchgang natürlich gealterter Unterspannbahnen

Die Bestimmung der Wasserdruckhöhe für natürlich gealterte Unterspannbahnen erfolgte an Produktproben, die dem Freibewitterungsmodell in regelmäßigen Abständen entnommen wurden. Die ermittelten Druckhöhen sind in Abbildung 6.1.2-1 für die einzelnen Folien dargestellt.

Mit Ausnahme von Folie B zeigten alle Produkte eine abnehmende Tendenz in der Wasserdruckhöhe. War bei einigen Unterspannbahnen die Druckhöhe bereits in den ersten drei Monaten stark abgefallen (über 50 % bei den Folien C, D und E), konnte bei der Folie F innerhalb der ersten 1 ½ Jahre ein sehr gleichmäßiger Rückgang

erkannt werden. Bei der Folie B stellte sich über den gesamten Untersuchungszeitraum nahezu keine Veränderung ein.

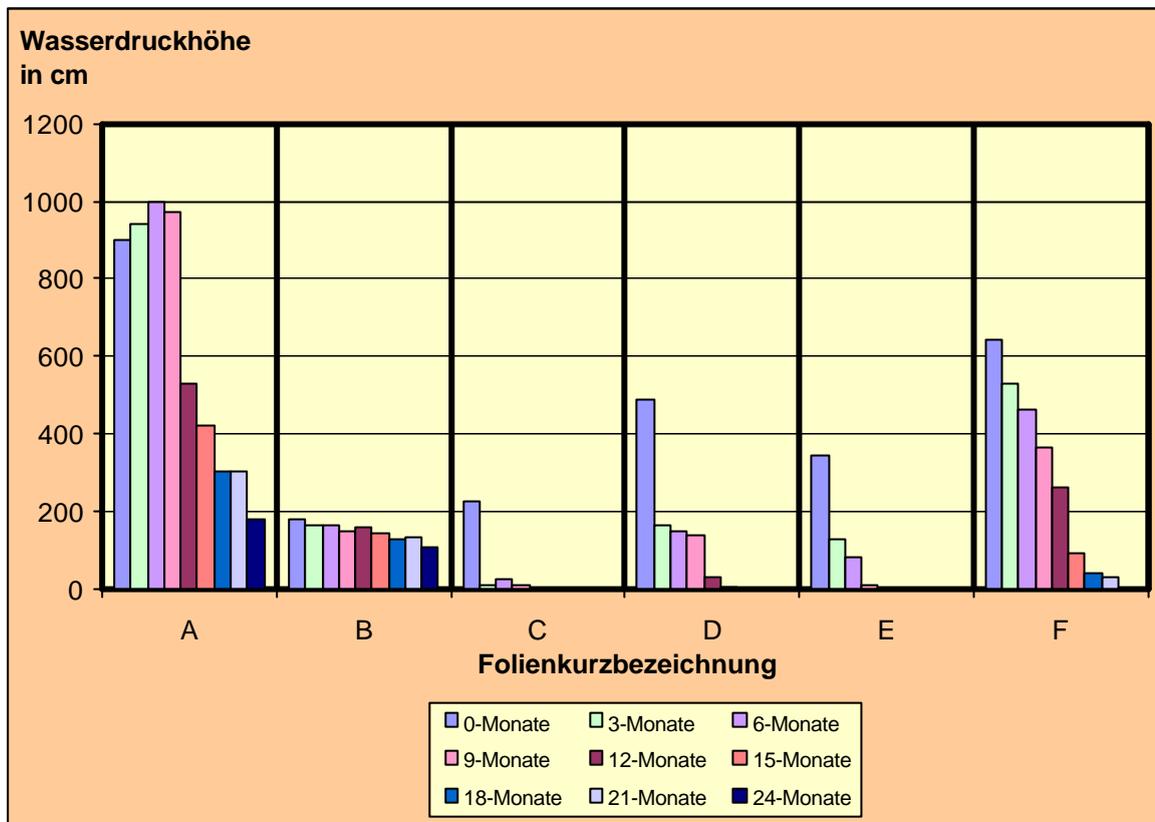


Abb. 6.1.2-1

Maximale Wasserdruckhöhen natürlich gealterter Unterspannbahnen; alle Folien wiesen eine mit der Zeit abnehmende Wasserdruckhöhe auf. Bei den Produkten C, D und E nahm die Wasserdruckhöhe bereits in den ersten drei Monaten stark ab, während die Folie B einen sehr langsamen und gleichmäßigen Rückgang zeigte. Bei dem Produkt A stellte sich erst nach neun Monaten Freibewitterung ein abnehmender Widerstand gegen Wasserdurchgang ein.

Die Unterspannbahn A besaß von allen geprüften Produkten den größten Widerstand gegen Wasserdurchgang. Dieser befand sich auch nach 12-monatiger Freibewitterung noch bei einem Wert, der über den maximalen Druckhöhen der nicht gealterten Folien B, C, D und E lag.

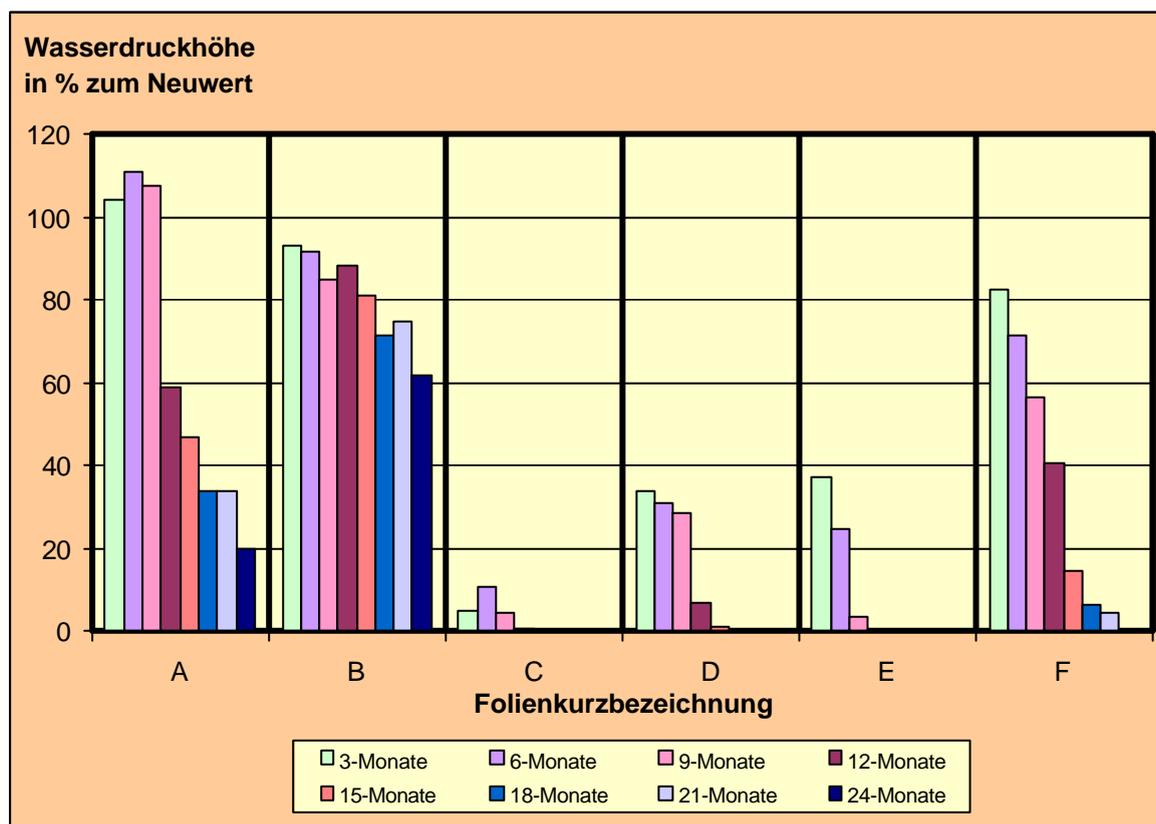
Nahezu keine Auswirkungen hatte die Freibewitterung auf die Bahn B, deren geringe Ausgangswasserdruckhöhe von 180 cm nach 12 Monaten lediglich um 11 % abgefallen war. Damit wies sie zu diesem Zeitpunkt höhere Werte auf als die Folien C, D und E. Diese besaßen ursprünglich einen größeren Ausgangswert der Wasserdruckhöhe. Die prozentualen Veränderungen der Wasserdruckhöhe gegenüber dem Neuzustand sind in Tabelle 6.1.2-1 und Abbildung 6.1.2-2 dargestellt.

Tabelle 6.1.2-1

Änderung der Wasserdruckhöhe der Unterspannbahnen infolge der natürlichen Belastung durch Freibewitterung (Änderung in % zum Neuwert)

	Belastung	A	B	C	D	E	F
	keine ^{*)}	100	100	100	100	100	100
natürliche Alterung	3-Monate	104	93	5	34	37	83
	6-Monate	111	92	11	31	25	72
	9-Monate	108	85	4	28	3	57
	12-Monate	59	88	0	7	0	41
	15-Monate	47	81	0	1	0	14
	18-Monate	34	72	0	0	0	7
	21-Monate	34	75	0	0	0	5
	24-Monate	20	62	0	0	0	0

^{*)} neues, nicht gealtertes Produkt

**Abb. 6.1.2-2**

Änderung der maximalen Wasserdruckhöhen der Unterspannbahnen infolge der natürlichen Belastung durch Freibewitterung (Änderung in % zum Neuwert); während bei den Folien A, B und F die Wasserdruckhöhe mindestens sechs Monate nicht unter 60 % des Neuwertes abgefallen war, kam es bei den Produkten C, D und E bereits in den ersten drei Monaten der Freibewitterung zu einer mehr als 50 %-igen Abnahme der Wasserdruckhöhe. Nach einem Jahr natürlicher Belastung war der Widerstand gegen Wasserdurchgang dieser Folien auf Null abgefallen (= vollständige Wasserdurchlässigkeit).

6.1.3 Widerstand gegen Wasserdurchgang künstlich gealterter Unterspannbahnen

Die künstliche Alterung der Unterspannbahnen erfolgte gemäß den in Abschnitt 5.4.2 und 5.4.3 beschriebenen Prüfprogrammen. Die Ergebnisse sollen im Folgenden getrennt für Wärme- und UV-Alterung dargestellt werden. Abbildung 6.1.3-1 zeigt die Resultate einer Wärmebelastung der Unterspannbahnen bei 40 °C, 60 °C und 80 °C über einen Zeitraum von vier Wochen (672 Stunden), während in Abbildung 6.1.3-3 die Ergebnisse der UV-Bestrahlung bei verschiedenen Strahlungsbeanspruchungen dargestellt sind.

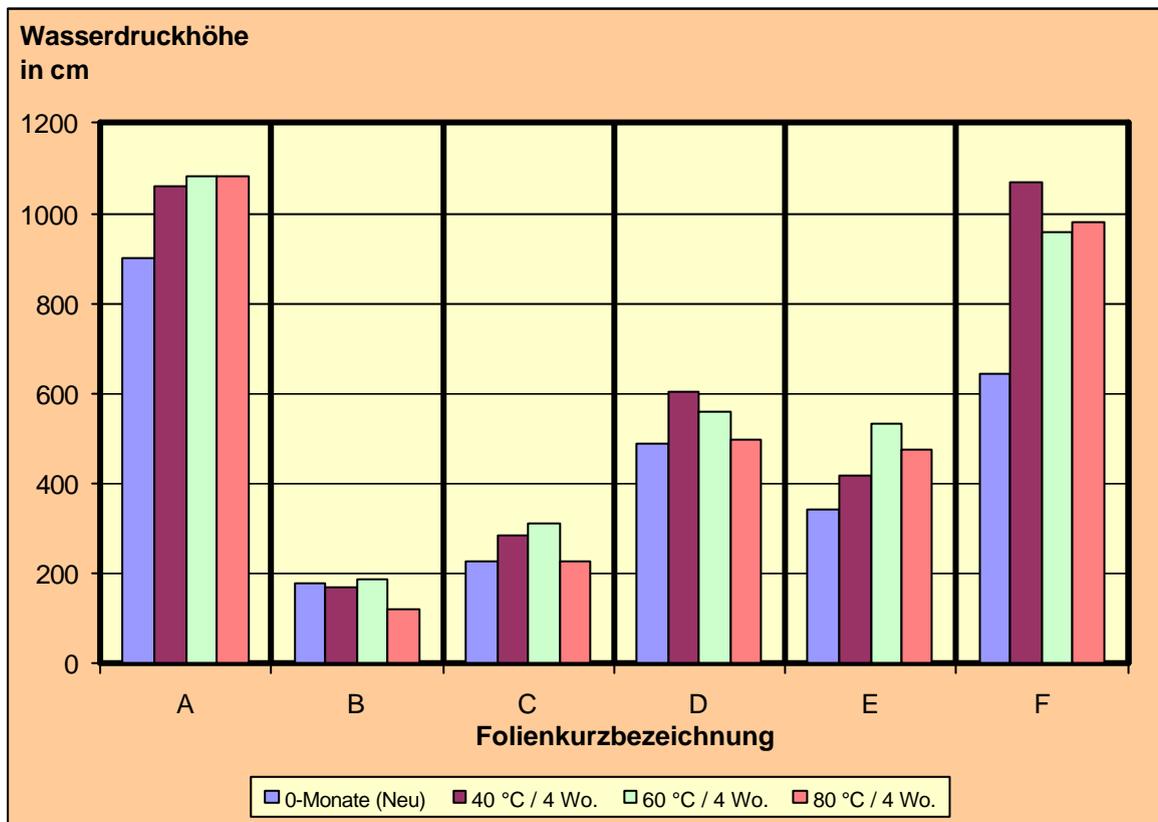


Abb. 6.1.3-1

Wasserdruckhöhe künstlich gealterter Unterspannbahnen durch Wärmebelastungen von 40 °C, 60 °C und 80 °C; die Wasserdruckhöhen der Unterspannbahnen bleiben unverändert oder steigen an. Lediglich bei Folie B führt die Belastung mit 80 °C zu einem leichten Rückgang der Druckhöhe.

Es ist deutlich zu erkennen, dass durch die Wärmelagerungen bei 40 °C, 60 °C und 80 °C über 4 Wochen in der Regel keine Abnahme des Widerstands gegen Wasserdurchgang stattfand. Die Werte blieben entweder unverändert oder sie lagen über der am neuen Produkt bestimmten Druckhöhe. Lediglich die Folie B zeigte bei 80 °C

eine geringere Wasserdruckhöhe gegenüber dem Neuprodukt (vgl. Tabelle 6.1.3-1 und Abbildung 6.1.3-2).

Tabelle 6.1.3-1

Änderung der Wasserdruckhöhe der Unterspannbahnen infolge der künstlichen Belastung durch Wärmelagerung (Änderung in % zum Neuwert)

	Belastung	A	B	C	D	E	F
	keine ^{*)}	100	100	100	100	100	100
künstliche Alterung	40 °C 4 Wo.	118	94	126	124	121	166
	60 °C 4 Wo.	120	105	138	115	155	149
	80 °C 4 Wo.	121	68	101	101	138	152

^{*)} neues, nicht gealtertes Produkt

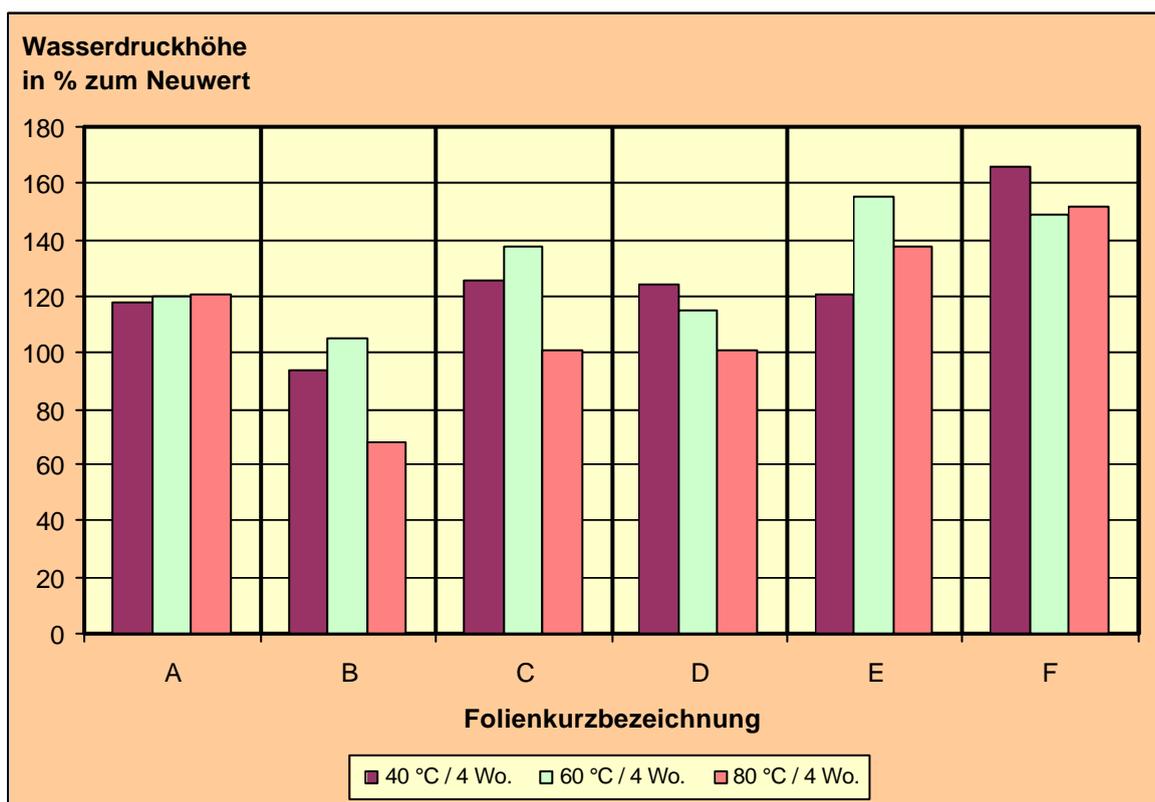


Abb. 6.1.3-2

Änderung der maximalen Wasserdruckhöhen der Unterspannbahnen infolge der künstlichen Belastung durch Wärmelagerung (Änderung in % zum Neuwert); die Wärmelagerung bewirkte bei den Folien A, C, D, E und F keinen Rückgang der Wasserdruckhöhe. Zum Teil stiegen die Werte um mehr als 40 % gegenüber der Wasserdruckhöhe des Neuproduktes. Lediglich die Unterspannbahn B verlor bei einer Wärmebelastung von 80 °C etwas über 30 % der anfänglich erreichten Druckhöhe.

Nach der UV-Lagerung war dagegen keine eindeutige Tendenz erkennbar. Nur das Produkt C zeigte bei allen aufgetragenen Belastungen durch UV-Strahlung eine deutlich abnehmende Wasserdruckhöhe. Dabei war die Verringerung der Wassersäule abhängig von der Intensität der aufgetragenen Strahlung (vgl. Abb. 6.1.3-3).

Alle anderen Unterspannbahnen erreichten durch eine UV-Belastung von $66,2 \text{ MJ/m}^2$ bei 50 °C gleich bleibende oder bessere Druckhöhen. Der Normversuch mit einer Strahlungsbeanspruchung von insgesamt $54,5 \text{ MJ/m}^2$ führte nur bei zwei Unterspannbahnen zu einem leichten Anstieg der Wasserdruckhöhe (Folie A und F). Bei allen anderen Produkten nahm der Widerstand gegen Wasserdurchgang ab, wobei zwei Bahnen nur geringfügige Veränderungen zeigten (Folie B und D). Bei den Produkten C und E trat nach der Normbelastung ein starker Abfall der Wasserdruckhöhe ein (siehe Abb. 6.3.1-3).

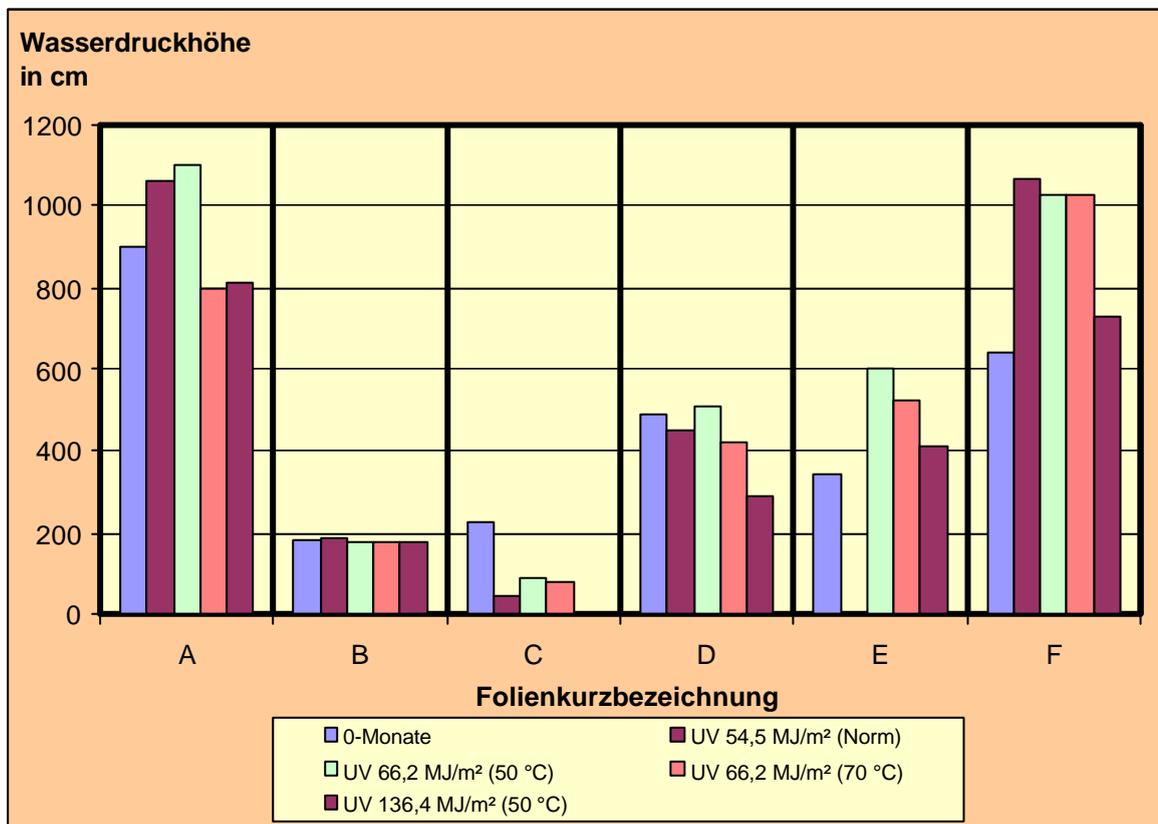


Abb. 6.1.3-3

Wasserdruckhöhe künstlich gealterter Unterspannbahnen durch UV-Bestrahlungen mit $54,4$ bis $164,4 \text{ MJ/m}^2$; die Folien zeigten keine eindeutige Tendenz. Bei einigen Unterspannbahnen stieg die Wasserdruckhöhe nach einer bestimmten UV-Bestrahlungsstärke an, während sie bei einer anderen Strahlungsintensität abfiel. Nur die Folie C wies bei allen UV-Belastungen eine abnehmende Tendenz auf. Keinen Einfluss hatte die UV-Bestrahlung auf die Bahn B.

Tabelle 6.1.3-2 sowie Abbildung 6.1.3-4 zeigen die Relativwerte der Veränderung der Wasserdruckhöhe nach der UV-Bestrahlung gegenüber dem Neuprodukt. Dabei wurden – wie auch nach der Wärmelagerung – bei einigen Unterspannbahnen Steigerungen der Wasserdruckhöhe von mehr als 40 % des Neuwertes festgestellt. Dagegen erreichte das Produkt C nach keiner der aufgetragenen UV-Belastungen Werte über 50 % der Wasserdruckhöhe der nicht gealterten Folie.

Tabelle 6.1.3-2

Änderung der Wasserdruckhöhe der Unterspannbahnen infolge der künstlichen Belastung durch UV-Bestrahlung (Änderung in % zum Neuwert)

	Belastung	A	B	C	D	E	F
		keine ^{*)}	100	100	100	100	100
künstliche Alterung	UV 66,2 MJ/m ² (50 °C)	122	99	39	104	176	160
	UV 66,2 MJ/m ² (70 °C)	89	99	34	86	152	160
	UV 136,4 MJ/m ² (50 °C)	90	99	0	59	119	113
	UV 54,5 MJ/m ² (Norm)	118	105	19	92	0	166

^{*)} neues, nicht gealtertes Produkt

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich durch eine reine Wärmelagerung der Unterspannbahnen kaum schlechtere Werte im Sinne einer abnehmenden Wasserdruckhöhe einstellen. Vielmehr waren nach einer Belastung durch erhöhte Temperaturen bei einigen Produkten verbesserte Ergebnisse erreicht worden. Dagegen ließen sich nach der Norm-Belastung durch UV-Bestrahlung und anschließender Wärmelagerung bei zwei Unterspannbahnen deutlich geringere Wasserdruckhöhen feststellen.

Eine abschließende Bewertung der Ergebnisse ist schwierig, da weder hinsichtlich des Folienmaterials (PE, PP oder PU), noch des Gewichts oder der Anzahl der Lagen eindeutige Aussagen bezüglich eines Verhaltens nach der künstlichen Alterung möglich sind.

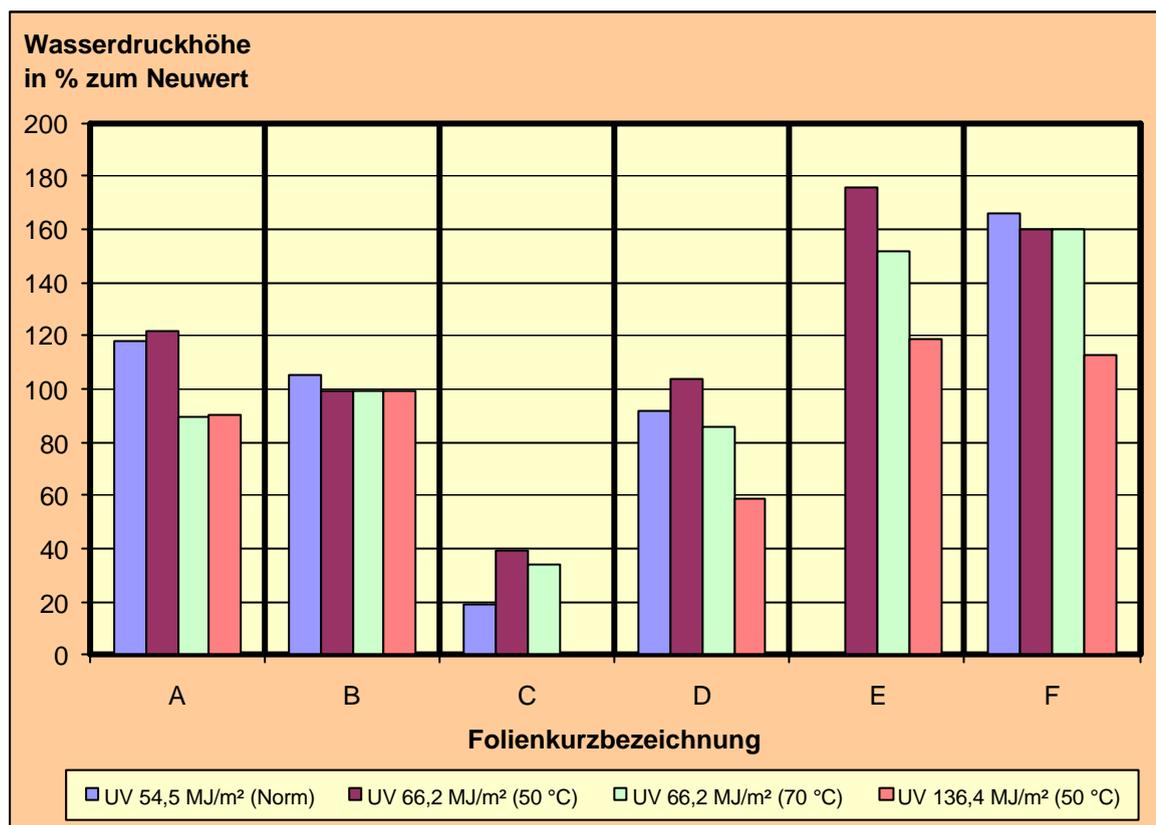


Abb. 6.1.3-4

Änderung der maximalen Wasserdruckhöhen der Unterspannbahnen infolge der künstlichen Belastung durch UV-Bestrahlung (Änderung in % zum Neuwert); es wird deutlich, dass insbesondere die künstliche Alterung nach Norm nur geringe Auswirkungen auf die erreichte Wasserdruckhöhe hatte. Während sich bei den Produkten A und B die Werte kaum oder nur wenig veränderten, nahm die Druckhöhe der Folien E und F zu. Lediglich die Unterspannbahnen C und D zeigten eine deutliche Abnahme im Vergleich zum Neuwert.

6.1.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den Versuchen zum Widerstand gegen Wasserdurchgang nach natürlicher und künstlicher Alterung

Stellt man die Ergebnisse des Widerstands gegen Wasserdurchgang nach natürlicher und künstlicher Alterung gegenüber, so ergeben sich unterschiedliche Feststellungen. War bei den Folien C und E bereits nach den ersten drei Monaten der Freibewitterung ein starker Abfall der Wasserdruckhöhe zu erkennen, erhält man ein ähnliches Ergebnis nach einer 4-wöchigen UV-Bestrahlung mit einer Gesamtbestrahlungsstärke von $66,2 \text{ W/m}^2$ (bei 50 °C). Anders ist das Resultat nach einer reinen Wärmelagerung bei erhöhter Temperatur. Wie aus Tabelle 6.1.3-1 zu entnehmen ist, ergab sich mit Ausnahme von Folie B für alle anderen Produkte nach einer Temperaturbelastung von 40 °C und 60 °C sowie 80 °C (über 4 Wochen) ein höherer Widerstand gegen Wasserdurchgang.

Die Folie B zeigte nach einer natürlichen Alterung kaum Veränderungen in der Wasserdruckhöhe. Dies war auch das Ergebnis nach den verschiedenen künstlichen Belastungsversuchen durch erhöhte Temperatur und UV-Bestrahlung. Lediglich bei 80 °C über 4 Wochen nahm die Druckhöhe der Unterspannbahn B deutlich ab. Im Gegensatz zu diesem relativ gleichmäßigen Verhalten zeigte das Produkt D bereits nach den ersten drei Monaten Freibewitterung einen größeren Abfall der Wasserdruckhöhe. Dieser stagnierte in den Folgemonaten und ging anschließend gleichmäßig auf Null zurück. Diese Alterungserscheinungen waren für die Folie durch die künstlich aufgebrauchten Belastungen nicht festzustellen. Bei Wärmebelastung nahm die Wasserdruckhöhe zu, während durch die UV-Belastung keine wesentliche Veränderung eintrat.

Die Folien A und F wiesen von allen geprüften Unterspannbahnen den höchsten Widerstand gegen Wasserdurchgang auf. Während die Bahn A erst nach 12 Monaten einen stärkeren Rückgang der Wassersäule verzeichnete, war bei der Folie F nach jedem Entnahmeintervall ein nahezu gleichmäßiger Rückgang der Wasserdruckhöhe zu erkennen.

Auch bei der künstlichen Alterung verhielten sich die beiden Folien vergleichbar. Sie besaßen sowohl nach den Wärmelagerungen, als auch nach den verschiedenen UV-Bestrahlungen einen größeren Widerstand gegen Wasserdurchgang als in ihrem Neuzustand.

6.2 Bestimmung der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke

Die Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit erfolgte nach dem in DIN EN ISO 12 572 beschriebenen Verfahren im Klima C (siehe Abschnitt 5.5.2). An jeweils fünf runden Prüfkörpern der Unterspannbahnen wurde die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke an neuen und gealterten Proben ermittelt.

6.2.1 Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke neuer Unterspannbahnen

Die Ergebnisse der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicken fabrikneuer Unterspannbahnen sind in Tabelle 6.2.1-1 aufgeführt. Vergleicht man die im Labor ermittelten s_d -Werte mit den Herstellerangaben, so ergab sich nur für wenige Unterspannbahnen eine gute Übereinstimmung. Ursache hierfür können die unterschiedlichen Verfahren zur Bestimmung der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luft-

schichtdicke sein, da die Hersteller zum Teil von der Norm abweichende Verfahren zur Ermittlung des s_d -Wertes heranziehen (siehe [89], [90]). Mit Ausnahme eines Produktes lagen die nach DIN EN ISO 12 572 bestimmten s_d -Werte der geprüften Unterspannbahnen zum Teil deutlich über den von den Herstellern angegebenen Werten (siehe Tabelle 6.2.1-1 und Abbildung 6.2.1-1).

Tabelle 6.2.1-1

Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke (s_d -Wert) neuer Unterspannbahnen im Vergleich zu den Herstellerangaben

Kurzbezeichnung der Unterspannbahn	s_d -Wert (Herstellerangabe) in m	s_d -Wert (Laborprüfung) in m
A	0,15	0,1217
B	0,02	0,0283
C	0,02	0,0726
D	0,02	0,0437
E	0,04	0,0406
F	0,30	0,3510

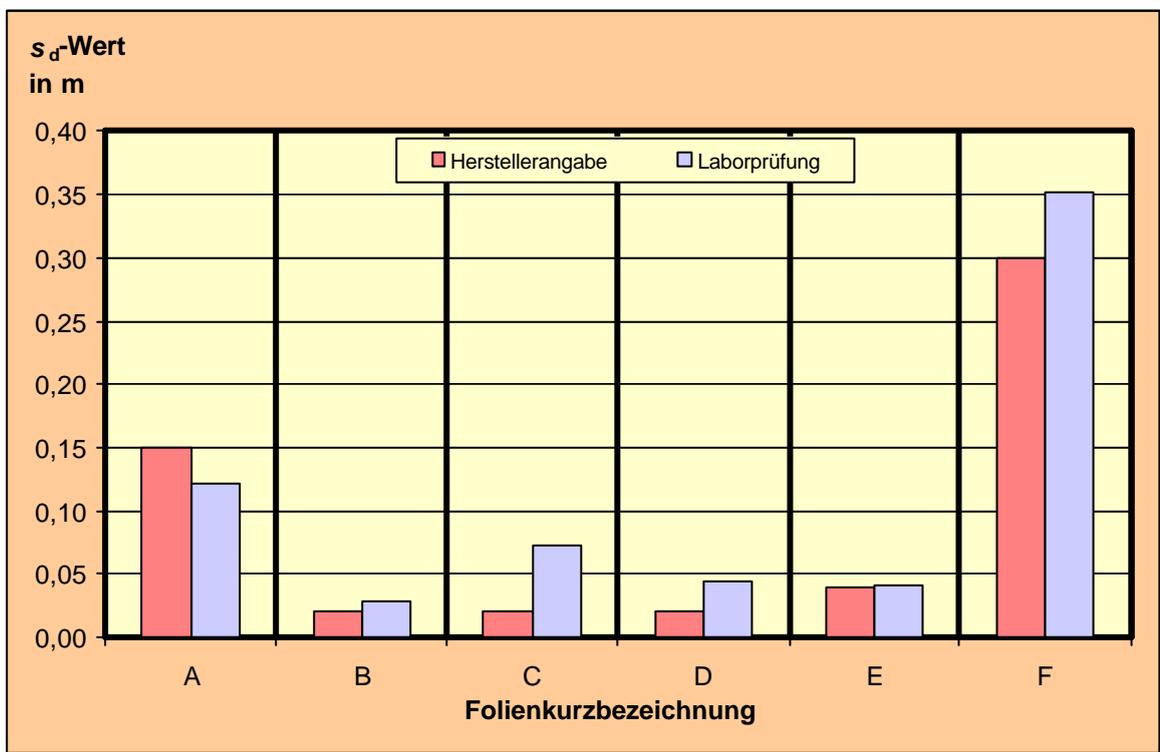


Abb. 6.2.1-1

Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke (s_d -Wert) neuer Unterspannbahnen im Vergleich zu den Herstellerangaben; die s_d -Werte der geprüften Unterspannbahnen liegen zum Teil deutlich über den von den Herstellern angegebenen Werten.

Versucht man, aus den im Laborversuch bestimmten s_d -Werten eine Abhängigkeit zu den verwendeten Ausgangsstoffen der Folien, deren Lagenanzahl oder dem Gewicht herzustellen, ist dies nur eingeschränkt möglich. Zum Beispiel besitzt die einzige einlagige Unterspannbahn (Produkt B), die gleichzeitig mit 60 g/m^2 auch das leichteste Produkt darstellt, den geringsten Widerstand gegen Wasserdampfdurchgang. Dagegen ergibt sich für die fünfplagige Folie F, die ein Gewicht von 700 g/m^2 ausweist, der größte s_d -Wert. Dieser Zusammenhang zwischen Anzahl der Lagen, Foliengewicht und dem s_d -Wert lässt sich jedoch nicht auf die zwei- und dreilagigen Produkte übertragen.

6.2.2 Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke natürlich gealterter Unterspannbahnen

Die Bestimmung der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke für natürlich gealterte Unterspannbahnen wurde an Produktproben, die dem Freibewitterungsmodell in regelmäßigen Abständen von jeweils 3 Monaten entnommen wurden, durchgeführt. Die Ergebnisse sind der Tabelle 6.2.2-1 zu entnehmen.

Tabelle 6.2.2-1

Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke (s_d -Wert) natürlich gealterter Unterspannbahnen im Vergleich zu den Werten neuer Bahnen

Kurzbezeichnung der Unterspannbahn	s_d -Wert neu in m 0-Monate	s_d -Wert gealtert in m			
		3-Monate	6-Monate	9-Monate	12-Monate
A	0,1217	0,2265	0,2174	0,1804	0,3046
B	0,0283	0,0301	0,0287	0,0262	0,0308
C	0,0726	0,0471	0,0240	0,0189	0,0161
D	0,0437	0,0749	0,0524	0,0570	0,0417
E	0,0406	0,0495	0,0399	0,0393	0,0181
F	0,3510	0,5711	0,2766	0,6346	0,2989

Kurzbezeichnung der Unterspannbahn	s_d -Wert neu in m 0-Monate	s_d -Wert gealtert in m			
		15-Monate	18-Monate	21-Monate	24-Monate
A	0,1217	0,3337	0,2964	0,3184	0,3367
B	0,0283	0,0269	0,0204	0,0189	0,0223
C	0,0726	0,0129	0,0100	0,0107	0,0097
D	0,0437	0,0224	0,0201	0,0215	0,0157
E	0,0406	0,0145	0,0167	0,0141	0,0137
F	0,3510	0,5384	0,2536	0,2002	0,3448

Werden die relativen s_d -Werte der gealterten Proben mit ihren Neuwerten verglichen (siehe Tabelle 6.2.2-2), so behielt lediglich die Folie B ihren s_d -Wert über 24 Monate bei. In diesem Zeitraum lag der Diffusionswiderstand nur geringfügig ober- bzw. unterhalb des im Neuzustand bestimmten Wertes. Bei den anderen Produkten war entweder eine deutliche Zu- (Folie A) oder Abnahme (Folien C, D, E und F) der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke zu erkennen.

In Abbildung 6.2.2-1 sind die Ergebnisse der s_d -Wert-Bestimmung und die sich daraus ergebenden Tendenzen nach einer natürlichen Alterung eingetragen. Abbildung 6.2.2-2 zeigt die prozentuale Veränderung der s_d -Werte nach ihrer Alterung im Vergleich zum Neuprodukt (vgl. Tabelle 6.2.2-2).

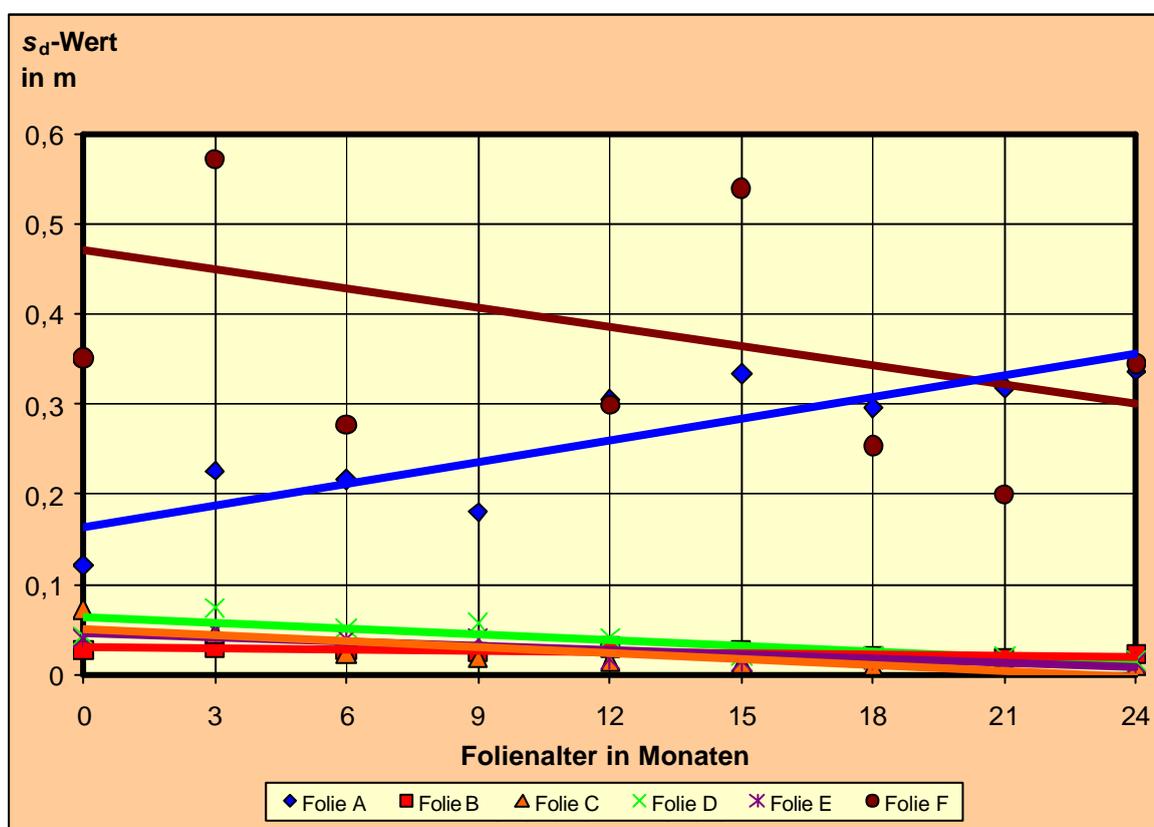


Abb. 6.2.2-1

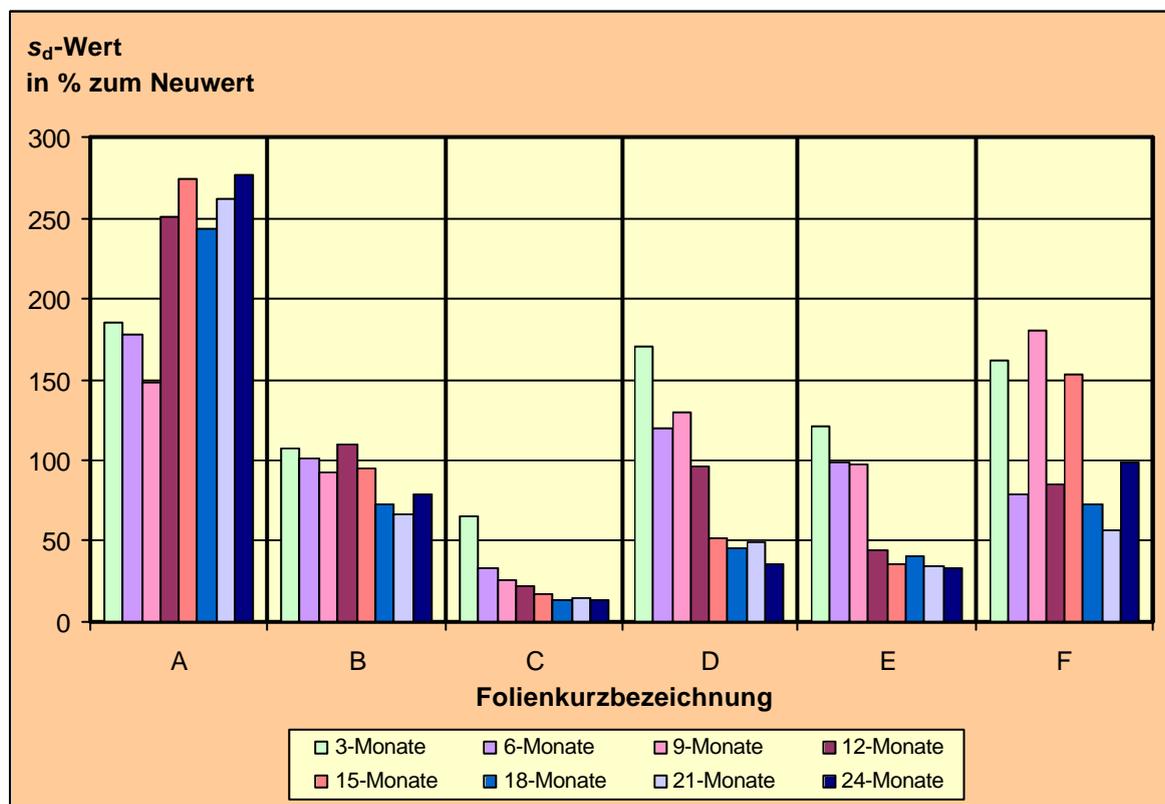
Ergebnisse der s_d -Wert-Bestimmung vor und nach einer natürlichen Alterung sowie die sich daraus ergebenden Trendlinien; mit Ausnahme von Folie B veränderten die Unterspannbahnen ihren s_d -Wert. Bei der Folie A stellten sich nach der Freibewitterung höhere s_d -Werte ein, während alle anderen Produkte mit zunehmender Alterung diffusionsoffener wurden.

Während die Unterspannbahnen C, D und E leicht fallende s_d -Werte aufzeigten, stellte sich bei der Folie A eine Zunahme der wasserdampfäquivalenten Luftschichtdicke ein. Dabei wies diese Folie von Beginn an einen höheren s_d -Wert auf.

Tabelle 6.2.2-2

Änderung des s_d -Wertes der Unterspannbahnen infolge natürlicher Belastung durch Freibewitterung (Änderung in % zum Neuwert)

	Belastung	A	B	C	D	E	F
	keine	100	100	100	100	100	100
natürliche Alterung	3-Monate	186	106	65	171	122	163
	6-Monate	179	101	33	120	98	79
	9-Monate	148	93	26	130	97	181
	12-Monate	250	109	22	95	45	85
	15-Monate	274	95	18	51	36	153
	18-Monate	241	72	14	46	41	72
	21-Monate	259	67	15	49	35	57
	24-Monate	277	79	13	36	34	98

**Abb. 6.2.2-2**

Änderung der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke der Unterspannbahnen infolge der natürlichen Belastung durch Freibewitterung (Änderung in % zum Neuwert); die Folien B, C, D, E und F wurden mit zunehmender Alterung diffusionsoffener. Bei der Unterspannbahn A lagen die s_d -Werte über denen des Neuproduktes.

Betrachtet man die Entwicklung des Widerstands gegen Wasserdampfdurchgang von Produkt A, war nach den ersten drei Monaten der Freibewitterung (Juli-September) ein starker Anstieg des s_d -Wertes erkennbar. Im anschließenden

Winterhalbjahr fand ein leichter Rückgang statt, bevor in den Monaten April bis September wieder eine starke Zunahme der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke erfolgte. In diesem Fall könnte die unregelmäßige Entwicklung des s_d -Wertes jahreszeitlich bedingt sein.

Ebenso wie bei der Unterspannbahn A stellte sich auch bei Folie D zunächst ein starker Anstieg des s_d -Wertes ein. Dieser ging in den Wintermonaten wieder zurück. Allerdings setzte sich die abnehmende Tendenz im Sommer des zweiten Freibewitterungszyklus fort, so dass Bahn D ab diesem Zeitpunkt immer diffusionsoffener wurde. Die Produkte C und E behielten dagegen von Beginn an ihre nach drei Monaten begonnene Tendenz eines geringer werdenden Widerstands gegen Wasserdampfdurchgang bei.

6.2.3 Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke künstlich gealterter Unterspannbahnen

Vergleichbar den Ergebnissen aus natürlicher Alterung waren auch bei den künstlich gealterten Unterspannbahnen entweder zu- oder abnehmende wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicken festzustellen. Während eine Wärmebelastung von 40 °C über einen Zeitraum von 4 Wochen bei keiner der betrachteten Unterspannbahnen größere Auswirkung auf den s_d -Wert hatte (Ausnahme: Folie F), zeigten die Folien A und F bei den höheren Wärmebelastungen einen ansteigenden Widerstand gegen Wasserdampfdiffusion (siehe Tabelle 6.2.3-1). Bei den anderen Produkten waren nahezu keine Auswirkungen der erhöhten Temperaturen auf die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke erkennbar (Folie B, C, D und E, siehe Abb. 6.2.3-1).

Tabelle 6.2.3-1

Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke (s_d -Wert) nach Wärmelagerung im Vergleich zu den Nullproben

Kurzbezeichnung der Unterspann- bahn	s_d -Wert neu in m 0-Monate	s_d -Wert künstlich gealtert		
		in m		
		40 °C 4 Wochen	60 °C 4 Wochen	80 °C 4 Wochen
A	0,1217	0,1948	0,1732	0,2546
B	0,0283	0,0246	0,0318	0,0317
C	0,0726	0,0811	0,0949	0,0921
D	0,0437	0,0623	0,0488	0,0623
E	0,0406	0,0610	0,0445	0,0436
F	0,3510	1,1614	0,6167	1,2434

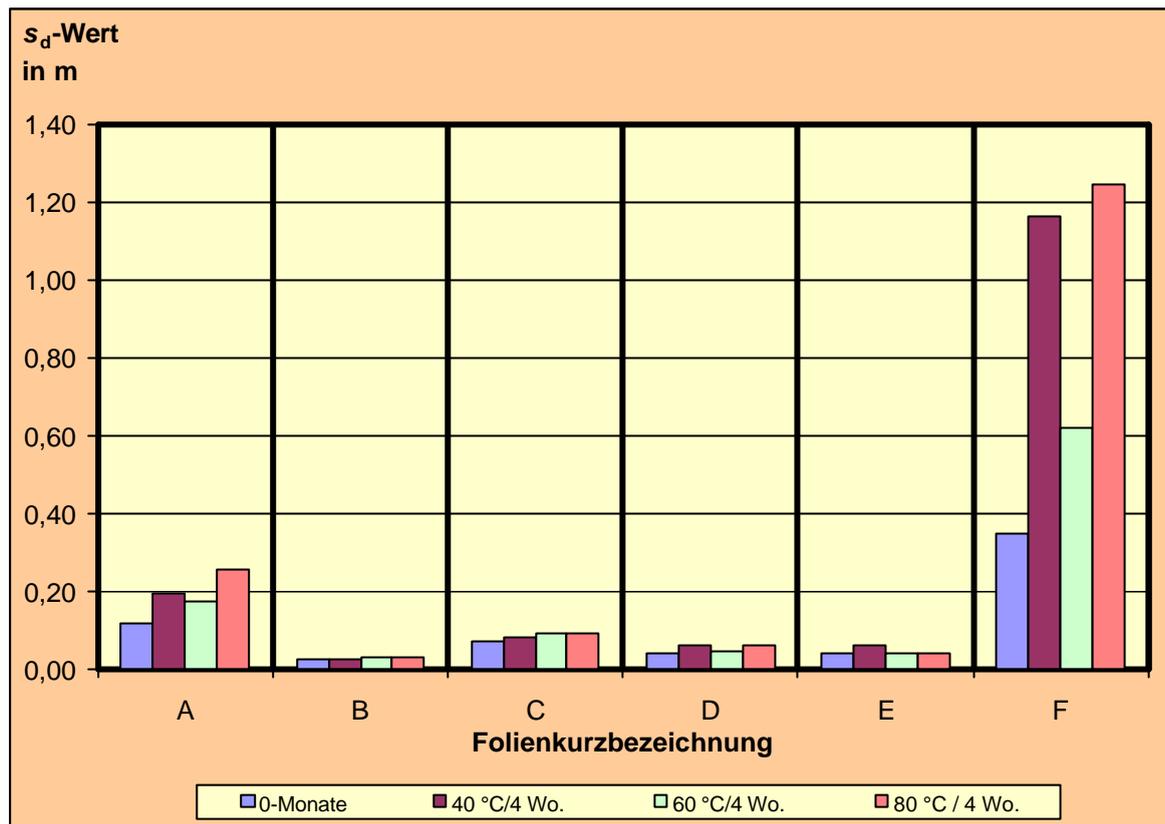


Abb. 6.2.3-1

Ergebnisse der s_d -Wert-Bestimmung vor und nach einer künstlichen Alterung durch Wärmebelastung; der Einfluss der Wärmelagerung auf den s_d -Wert der Folien war gering. Durch erhöhte Temperaturen konnte nur bei den Produkten A und F eine wesentliche Veränderung in Form höherer s_d -Werte festgestellt werden.

Betrachtet man die s_d -Werte der wärme- und UV-gealterten Unterspannbahnen in Tabelle 6.2.3-1 und 6.2.3-2, wurden nach einer reinen Wärmelagerung bei erhöhten Temperaturen von 60 °C und 80 °C die Folien in der Regel etwas diffusionsdichter. Dies konnte für die Folien A, D und E auch bei der UV-Bestrahlung festgestellt werden. Bei der Bahn C führte die UV-Lagerung zur Verringerung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes und somit zu einem kleiner werdenden s_d -Wert (siehe Abb. 6.2.3-2).

Diese Ergebnisse sind auch an den Relativwerten der s_d -Wert Bestimmung nach einer künstlichen Alterung durch Wärme- und UV-Lagerung zu erkennen (siehe Tabelle 6.2.3-1). Während die Wärmelagerung bei allen Folien eine Abnahme der Diffusionsoffenheit (gleichbedeutend mit einer Zunahme des s_d -Wertes) ergab (Ausnahme: Produkt B bei einer Temperatur von 40 °C), führte die UV-Lagerung zu unterschiedlichen Ergebnissen. Dabei kam es bei den Folien A, D und E ebenfalls zu einer Verringerung der Diffusionsoffenheit. Dagegen nahm bei den Bahnen B und C der s_d -Wert ab und somit die Wasserdampfdurchlässigkeit zu.

Tabelle 6.2.3-2

Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke (s_d -Wert) nach UV-Bestrahlung im Vergleich zu den Nullproben

Kurzbezeichnung der Unterspannbahn	s_d -Wert neu in m 0-Monate	s_d -Wert künstlich gealtert in m			
		54,5 MJ/m ² (Norm)	66,2 MJ/m ² (50 °C)	66,2 MJ/m ² (70 °C)	136,4 MJ/m ² (50 °C)
		A	0,1217	0,2143	0,2933
B	0,0283	0,0219	0,0229	0,0246	0,0287
C	0,0726	0,0713	0,0239	0,0394	0,0187
D	0,0437	0,0580	0,0833	0,0904	0,0581
E	0,0406	0,0599	0,0704	0,0463	0,0484
F	0,3510	0,5807	0,5754	0,3885	0,3151

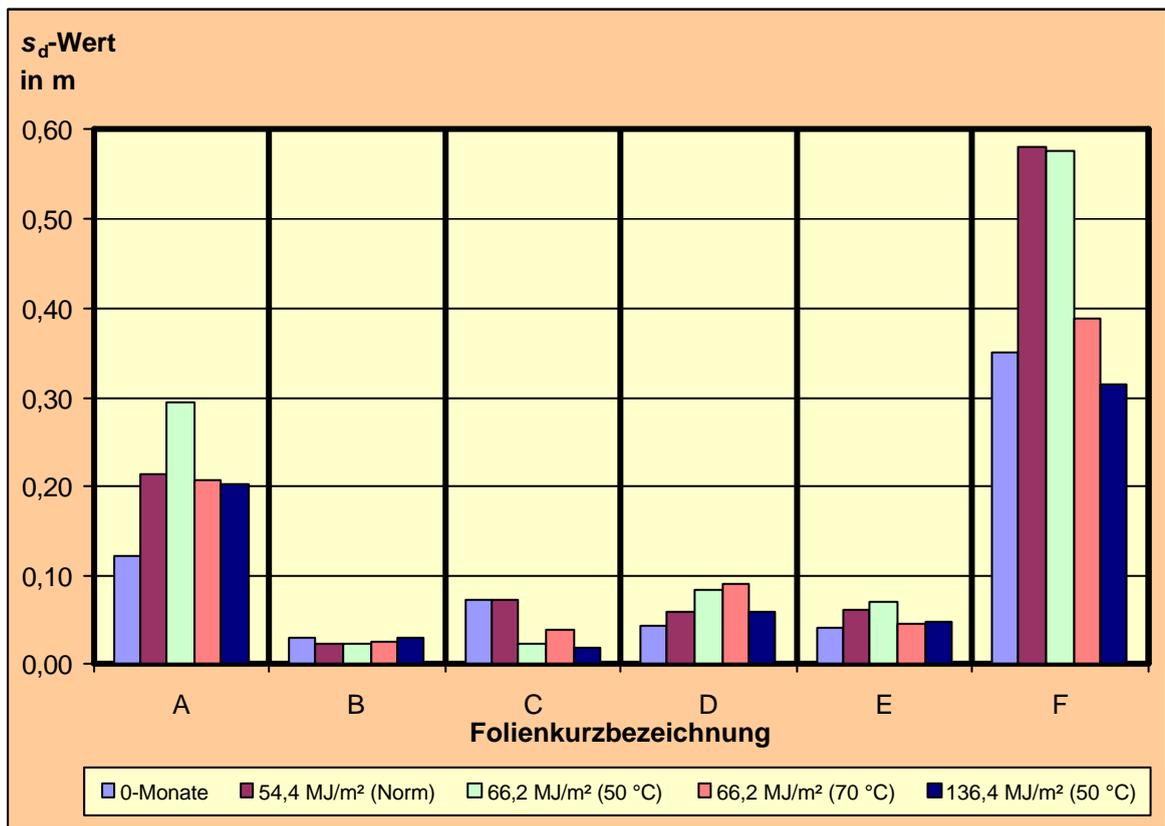


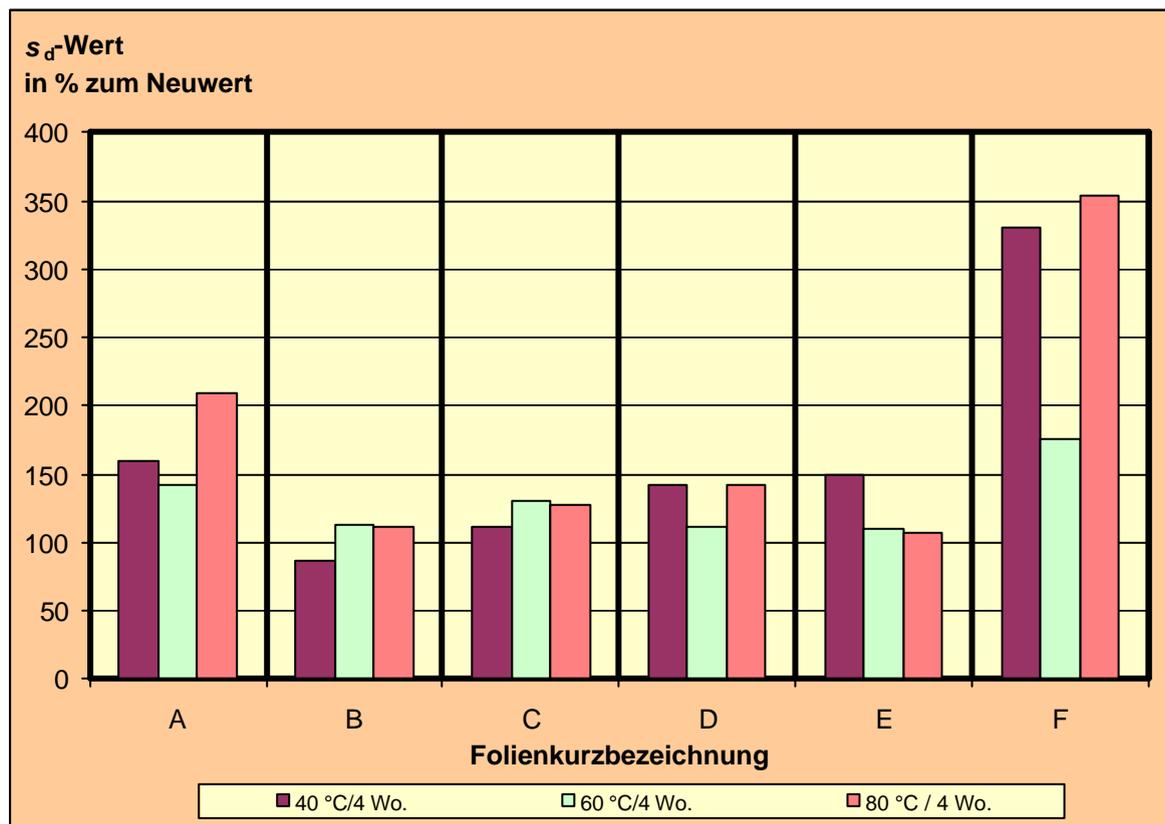
Abb. 6.2.3-2

Ergebnisse der s_d -Wert-Bestimmung vor und nach einer künstlichen Alterung durch UV-Bestrahlung; bei den Unterspannbahnen wurden unveränderte oder gestiegene s_d -Werte festgestellt. Lediglich die Folie C wurde durch die UV-Belastungen von 66,2 MJ/m² (50 °C sowie 70 °C) und 136,4 MJ/m² diffusionsoffener, während im Normversuch keine Veränderung auftrat.

Tabelle 6.2.3-3

Änderung des s_d -Wertes der Unterspannbahnen infolge und künstlicher Belastungen durch Wärme- und UV-Lagerung (Änderung in % zum Neuwert)

	Belastung	A	B	C	D	E	F
	keine	100	100	100	100	100	100
natürliche Alterung	40 °C / 4 Wo.	158	87	112	143	150	331
	60 °C / 4 Wo.	142	112	131	112	110	176
	80 °C / 4 Wo.	209	112	127	143	107	354
	UV 54,5 MJ/m ² (Norm)	176	77	98	133	148	165
	UV 66,2 MJ/m ² (50 °C)	241	81	33	191	173	164
	UV 66,2 MJ/m ² (70 °C)	169	87	54	207	114	111
	UV 136,4 MJ/m ² (50 °C)	166	101	26	133	119	90

**Abb. 6.2.3-3**

Änderung des s_d -Wertes der Unterspannbahnen infolge der künstlichen Belastung durch Wärmelagerung (Änderung in % zum Neuwert); die Wärmelagerung führte bei allen Folien zu einer Zunahme des s_d -Wertes (= Erhöhung des Widerstandes gegen Wasserdampfdurchgang). Lediglich das Produkt B wurde bei einer Temperatur von 40 °C etwas diffusionsoffener.

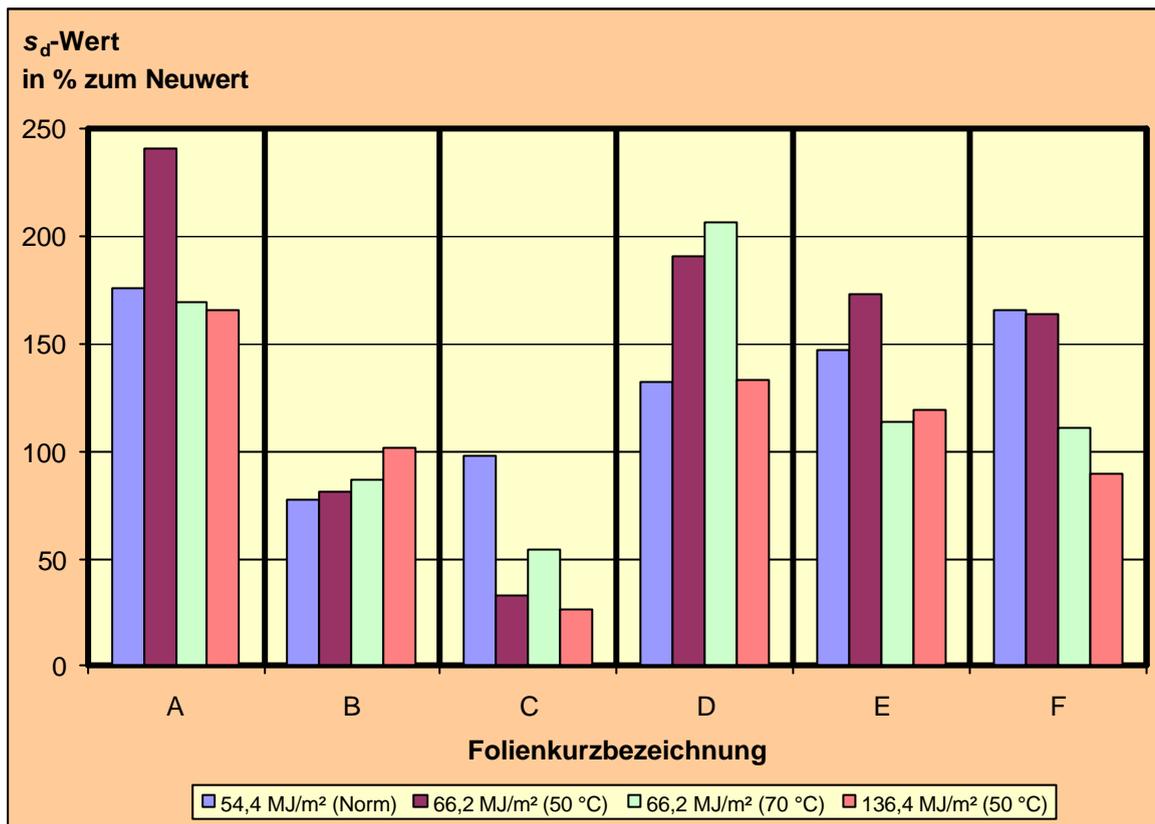


Abb. 6.2.3-4

Änderung des s_d -Wertes der Unterspannbahnen infolge der künstlichen Belastung durch UV-Bestrahlung (Änderung in % zum Neuwert); die UV-Lagerung führte bei den Folien A, D, E und F zu einer Verringerung der Diffusionsoffenheit. Dagegen nahm bei den Bahnen B und C der s_d -Wert ab und somit die Wasserdampfdurchlässigkeit zu.

6.2.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke nach natürlicher und künstlicher Alterung

Werden die Ergebnisse der Prüfung der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke nach natürlicher und künstlicher Alterung gegenübergestellt, sind für die reine Wärmelagerung und die Freibewitterung einige gute Übereinstimmungen feststellbar.

Diese treffen insbesondere für das Alterungsverhalten der Bahnen A und D zu, deren s_d -Wert in den Sommermonaten der Freibewitterung stärker anstieg als in der übrigen Zeit (vgl. Abschnitt 6.2.2). Es ist davon auszugehen, dass die höheren Temperaturen im Sommer zu einer Reduzierung der Diffusionsoffenheit führten. Wie aus Tabelle 6.2.3-3 hervorgeht, zeigen auch die Versuche mit erhöhten Temperaturen eine Zunahme des s_d -Wertes dieser Produkte (vgl. Abb. 6.2.3-3).

Auch für das Produkt B ergibt sich eine Übereinstimmung für die Ergebnisse aus natürlicher Alterung und Wärmelagerung. Diese hatte – ebenso wie die Freibewitterung – kaum Einfluss auf den s_d -Wert der Unterspannbahn B. Eine Feststellung, die gleichermaßen auf die Resultate der UV-Bestrahlung dieser Folie zutrifft.

Insgesamt führte die reine Wärmelagerung bei den Unterspannbahnen zu einer geringfügigen Vergrößerung der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke und somit zur Verminderung der Wasserdampfdurchlässigkeit. Da die Folien in der natürlichen Alterung mit der Zeit abnehmende s_d -Werte aufwiesen, muss diese Entwicklung auf den Einfluss der UV-Strahlung zurückzuführen sein. Dies konnte aus den Resultaten der UV-Versuche aber nur für Folie C nachgewiesen werden (siehe Tabelle 6.2.3-3 und Abbildung 6.2.3-4). Bei den Produkten A, D und E stellten sich auch nach der UV-Lagerung höhere s_d -Werte ein.

6.3 Prüfung des Zug-Dehnungsverhaltens

Die Prüfung des Zug-Dehnungsverhaltens der Unterspannbahnen erfolgte nach den Vorgaben der DIN EN 12 311 an jeweils fünf Proben sowohl in Längs- als auch in Querrichtung. Aufgrund der Dehnfähigkeit einiger Folien war es erforderlich, die nach Norm geforderte Probekörperlänge von 200 mm auf 100 mm (bei gleich bleibender Probenbreite von 50 mm) zu reduzieren.

6.3.1 Zug-Dehnungsverhalten neuer Unterspannbahnen

Die Ergebnisse der Zug-Dehnungsprüfung für fabrikneue Unterspannbahnen sind in Tabelle 6.3.1-1 aufgeführt. Dabei handelt es sich um den Mittelwert der jeweils fünf Einzelproben, die in Folienlängs- bzw. -querrichtung entnommen wurden.

Aus der Tabelle geht hervor, dass mit Ausnahme einer Probe (Produkt B) alle Unterspannbahnen in Folienlängsrichtung eine höhere Zugkraft aufweisen als in Querrichtung. Unabhängig von der Prüfrichtung liegt die Zugkraft für alle untersuchten Unterspannbahnen über 100 N/50mm.

In den Abbildungen 6.3.1-1 und 6.3.1-2 sind die aus dem Mittelwert der fünf Einzelprüfungen gebildeten Zug-Dehnungsdiagramme in Bahnlängs- und -querrichtung der unterschiedlichen Dachfolien dargestellt. Dabei wird deutlich, dass sich maximale Zugkraft und Dehnungsvermögen der einzelnen Produkte stark voneinander unterscheiden.

Tabelle 6.3.1-1

Zug-Dehnungswerte neuer Unterspannbahnen in Folienlängs- und -querrichtung im Vergleich zu den Herstellerangaben

Kurzbezeichnung der USB	Zugkraft in N/50 mm (Herstellerangabe)		Zugkraft in N/50 mm (Laborprüfung)	
	längs	quer	längs	quer
A	350	350	401	271
B	140	140	138	137
C	150	120	189	110
D	445	325	224	182
E	200	200	265	229
F	600	600	483	405

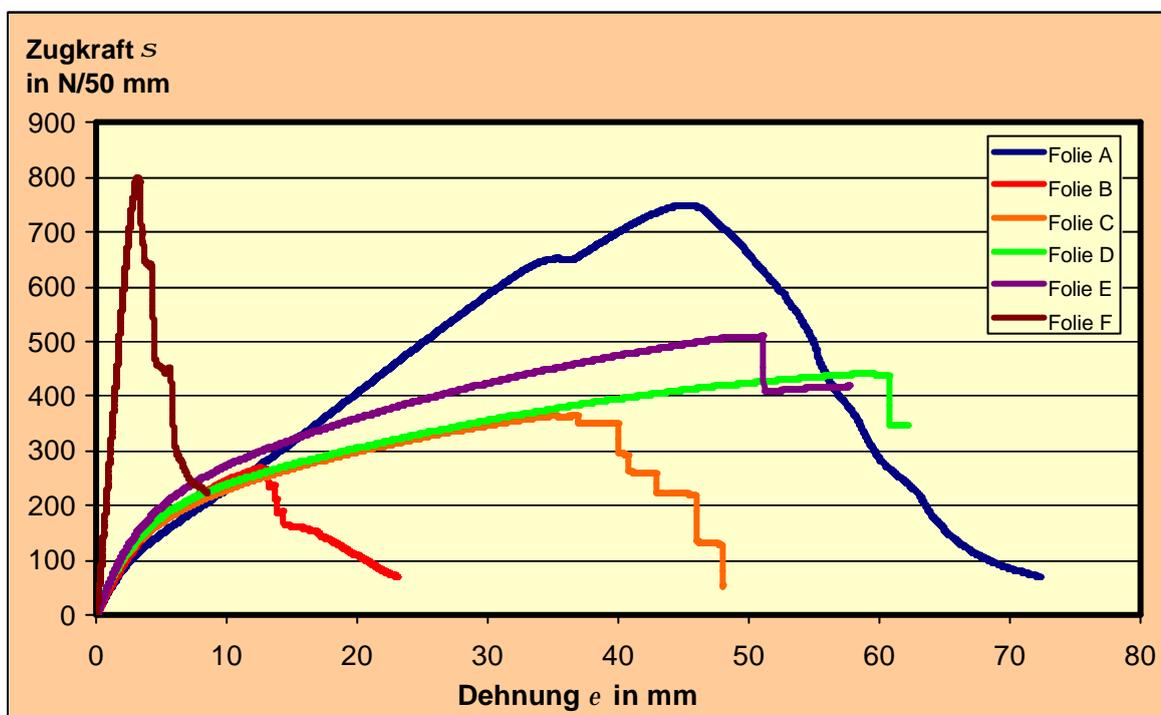


Abb. 6.3.1-1

Zug-Dehnungsdiagramm neuer Unterspannbahnen in Folienlängsrichtung einer Einzelmessung; die Folien zeigten unterschiedliches Zug-Dehnungsverhalten. Das Produkt A besaß eine hohe Zugkraft und große Dehnfähigkeit. Demgegenüber hatte die Folie F eine vergleichbar hohe Zugkraft bei deutlich geringerer Dehnung. Die anderen Unterspannbahnen erreichten nicht die hohen Zugkräfte der Folien A und F.

Das fünf-lagige Produkt F zeigte für beide Prüfrichtungen eine hohe maximale Zugkraft bei sehr geringer Dehnfähigkeit, während die ein-lagige Unterspannbahn B eher geringe Dehnungen und Zugspannungen aufwies. Für die anderen Produkte A, C, D und E ergaben sich hohe Dehnfähigkeiten bei Zugkräften, die zwischen den

Werten der Folie B und F lagen. Das Verhältnis der maximal erreichten Zugkräfte längs und quer zur Bahnrichtung ist in Abbildung 6.3.1-3 dargestellt.

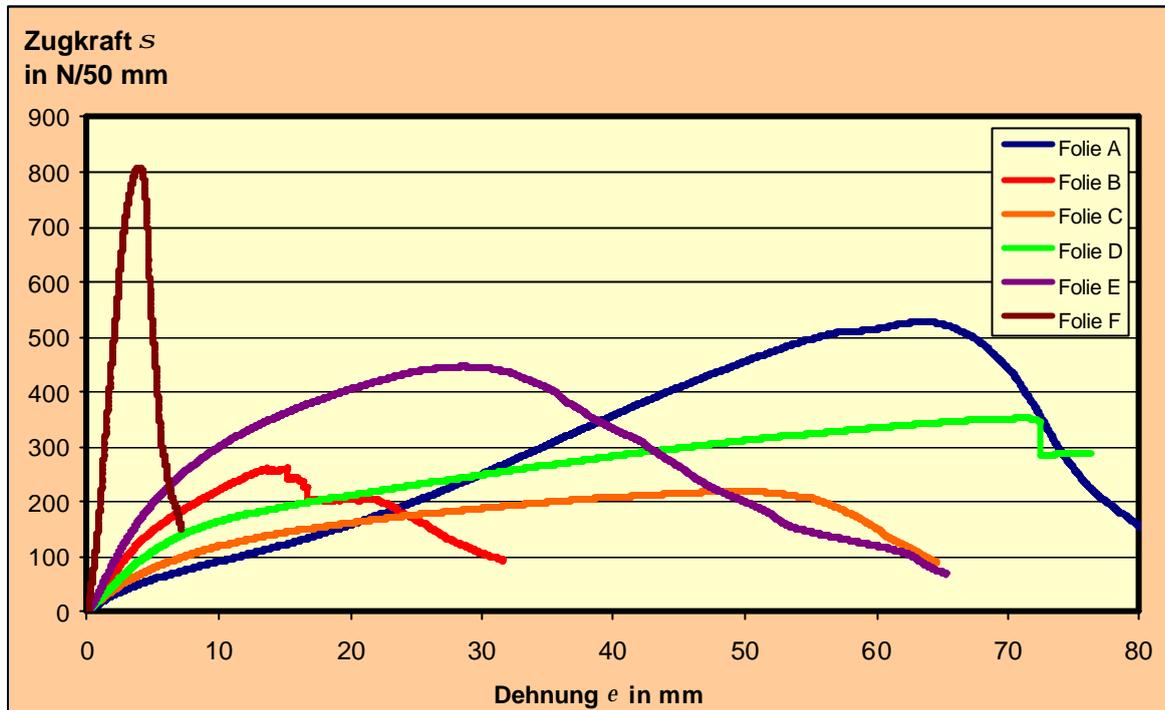


Abb. 6.3.1-2

Zug-Dehnungsdiagramm neuer Unterspannbahnen in Folienuerrichtung einer Einzelmessung; die Produkte zeigen ähnliches Verhalten wie in Längsrichtung (vgl. Abb. 6.3.1-1). Dabei liegen die erreichten Zugkräfte unter denen längs zur Bahn.

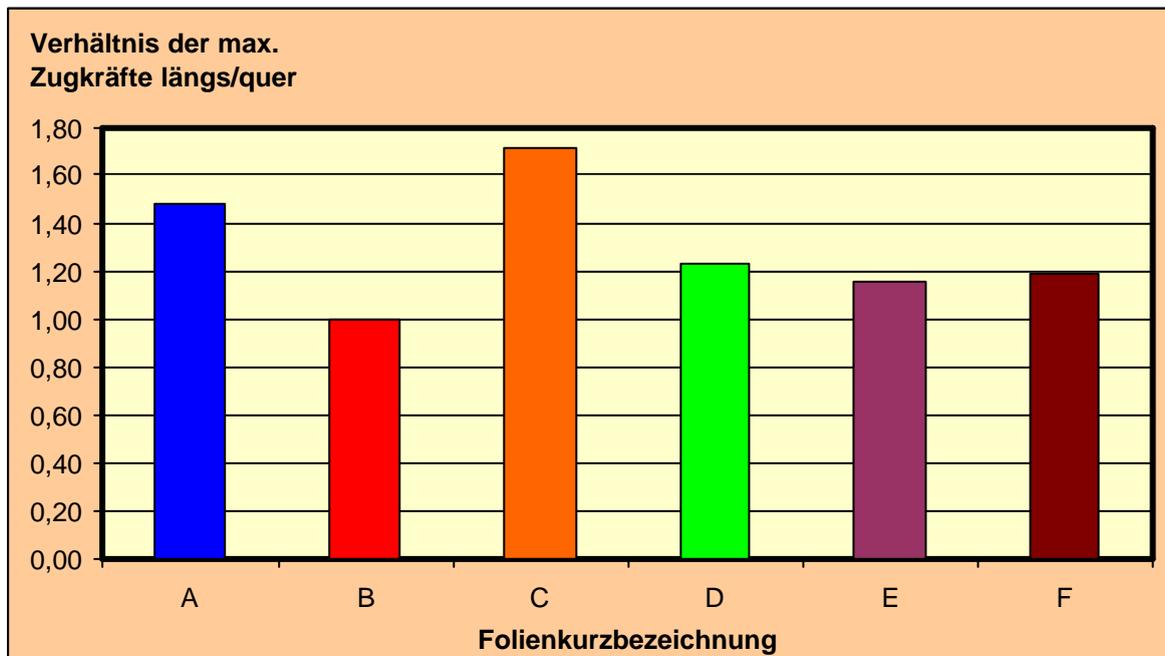


Abb. 6.3.1-3

Verhältnis längs/quer der maximalen Zugkräfte neuer Unterspannbahnen

Bei den Zugversuchen an neuen Produkten erfolgte das Versagen der Unterspannbahnen nicht durch das plötzliche Reißen der Folie, sondern es versagten – je nach Produkt – entweder einzelne Faserstränge oder Lagen. Teilweise riss die eingespannte Unterspannbahn nur an einer Seite. Zu erkennen sind diese Vorgänge in der Abbildung 6.3.1-1 entweder an dem starken Abfall der Zugkraft ohne weitere Dehnung (siehe Folie B, D und E) oder an der stetig abnehmenden Zugkraft bei fortlaufender Dehnung der Unterspannbahn (z.B. Folie A).

Betrachtet man sich die Ergebnisse aus den Zug-Dehnungsversuchen, ist hinsichtlich der maximal erreichten Zugkraft eine Abhängigkeit zwischen Foliengewicht und den verwendeten Ausgangsstoffen (PE/PP/PU) zu erkennen. Dies zeigte auch die Betrachtung der mit 60 g/m^2 leichtesten Folie B, die sehr geringe Zugkräfte in Längs- und in Querrichtung aufwies. Dagegen konnte das Produkt F mit 700 g/m^2 die größte Zugkraft aufnehmen (anzumerken ist, dass eine der Lagen von Folie F eine Verstärkungslage aus einem Kunststoffgitternetz darstellt).

Dabei beeinflusste das Gewicht die erreichbare Zugkraft mehr als das Folienmaterial. Dieses nahm erst bei nahezu gleichem Gewicht Einfluss. Vergleicht man zum Beispiel die Folien D und E, war die Zugkraft der Bahn E mit einer mittleren Lage PE geringer, als die Zugkraft der aus drei Lagen PP bestehenden Unterspannbahn D.

Aus den Kurvenverläufen der Abbildungen 6.3.1-1 und 6.3.1-2 ist weiterhin zu entnehmen, dass bis zu einer Zugkraft von $s \approx 100 \text{ N/50 mm}$ alle Unterspannbahnen dem Hook'schen Gesetz der Gleichung 6.3.1-1 folgen.

$$s_s = e \cdot E \quad (6.3.1-1)$$

mit: s_s = Zugspannung bis 100 N/50 mm
 e = Dehnung in mm
 E = Elastizitätsmodul in N/mm^2

Durch einfache Umformung der Gleichung konnten mit den Zug-Dehnungswerten der einzelnen Unterspannbahnen die E-Module der jeweiligen Folien bestimmt werden. Tabelle 6.3.1-2 und Abbildung 6.3.1-4 stellen die E-Module der unterschiedlichen Unterspannbahnen in Längs- und in Querrichtung gegenüber. Dabei ist ein Einfluss der Folienzusammensetzung, der Anzahl der Lagen oder dem Foliengewicht auf den E-Modul nicht zu erkennen.

Tabelle 6.3.1-2

E-Module der Unterspannbahnen in Folienlängs- und -querrichtung

Kurzbezeichnung der USB	Spannung in N/50 mm	Dehnung in mm	E-Modul (längs) in N/mm ²
A	100,04948	2,650410	0,7550
B	100,01760	2,318476	0,8628
C	100,07082	2,042592	0,9798
D	100,08168	1,995526	1,0031
E	100,07092	1,846364	1,0840
F	101,29434	0,465619	4,3510

Kurzbezeichnung der USB	Spannung in N/50 mm	Dehnung in mm	E-Modul (quer) in N/mm ²
A	100,00180	11,543040	0,1733
B	100,12396	2,988652	0,6700
C	100,04422	7,363816	0,2716
D	100,01226	4,424668	0,4521
E	100,09762	2,228290	0,8984
F	100,47496	0,5745032	3,4978

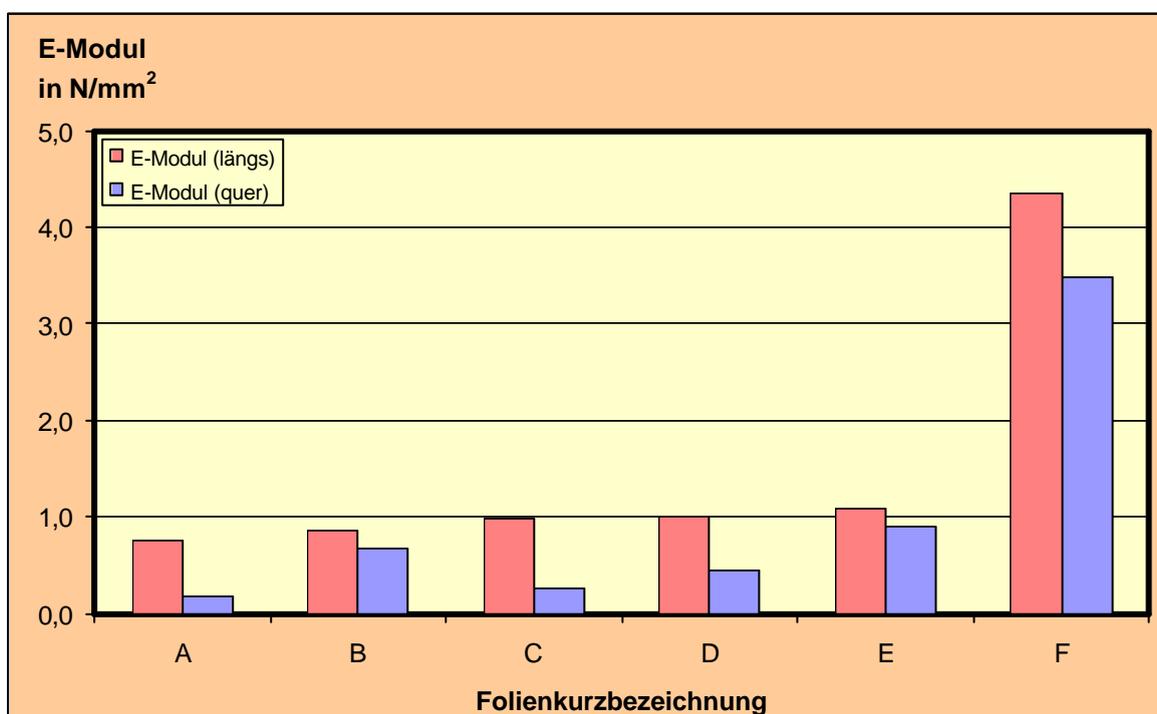


Abb. 6.3.1-4

E-Modul der neuen Unterspannbahnen in Folienlängs- und -querrichtung; in Folienlängsrichtung wurden höhere Werte des E-Moduls erreicht. Das fünfflagige Produkt F wies von allen Produkten den höchsten Elastizitätsmodul auf.

Der E-Modul lag für die ein- bis dreilagigen Produkte in Längsrichtung zwischen $0,75 \text{ N/mm}^2$ und $1,10 \text{ N/mm}^2$ (siehe Tabelle 6.3.1-2). Die Folie F wies als einzige fünfplagige Unterspannbahn mit $4,35 \text{ N/mm}^2$ einen besonders hohen Elastizitätsmodul auf.

In Folienquerrichtung ergaben sich deutlich geringere E-Module, die für die Folien A bis E zum Teil deutlich unter $1,0 \text{ N/mm}^2$ lagen. Auch hier bildete das Produkt F mit einem E-Modul von $3,50 \text{ N/mm}^2$ eine Ausnahme. Abbildung 6.3.1-5 zeigt das Verhältnis der E-Module längs/quer.

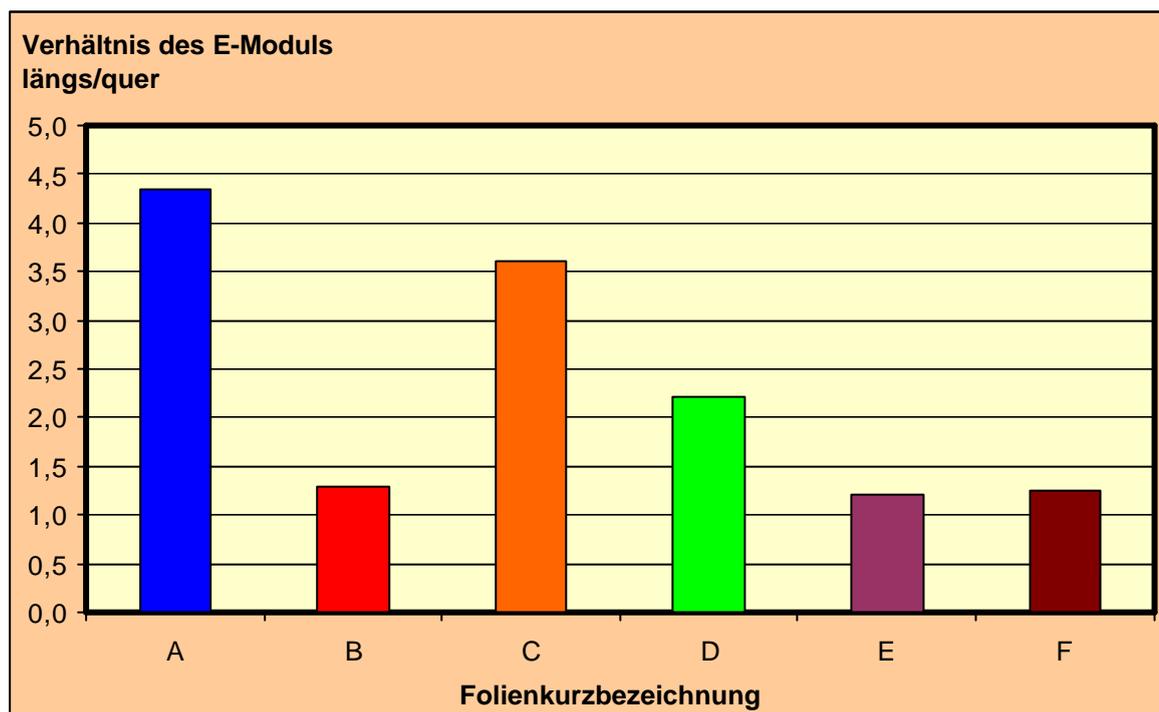


Abb. 6.3.1-5

Verhältnis des E-Moduls längs/quer zur Folienrichtung neuer Unterspannbahnen; bei den Produkten B, E und F lag das Verhältnis nahe 1,0.

6.3.2 Zug-Dehnungsverhalten natürlich gealterter Unterspannbahnen

Betrachtet man die Ergebnisse des Zug-Dehnungsverhaltens der natürlich gealterten Unterspannbahnen, waren für die maximal und minimal erreichten Zugspannungen sowohl in Längs- als auch in Querrichtung abnehmende Werte erkennbar. In den Abbildungen 6.3.2-1 und 6.3.2-2 sind die Resultate der Zugversuche als Mittelwert von fünf Einzelproben frei bewitterter Unterspannbahnen für die verschiedenen Produkte gegenübergestellt. Die Abbildungen 6.3.2-3 und 6.3.2-4 zeigen die Entwicklung des E-Moduls mit zunehmender Alterung.

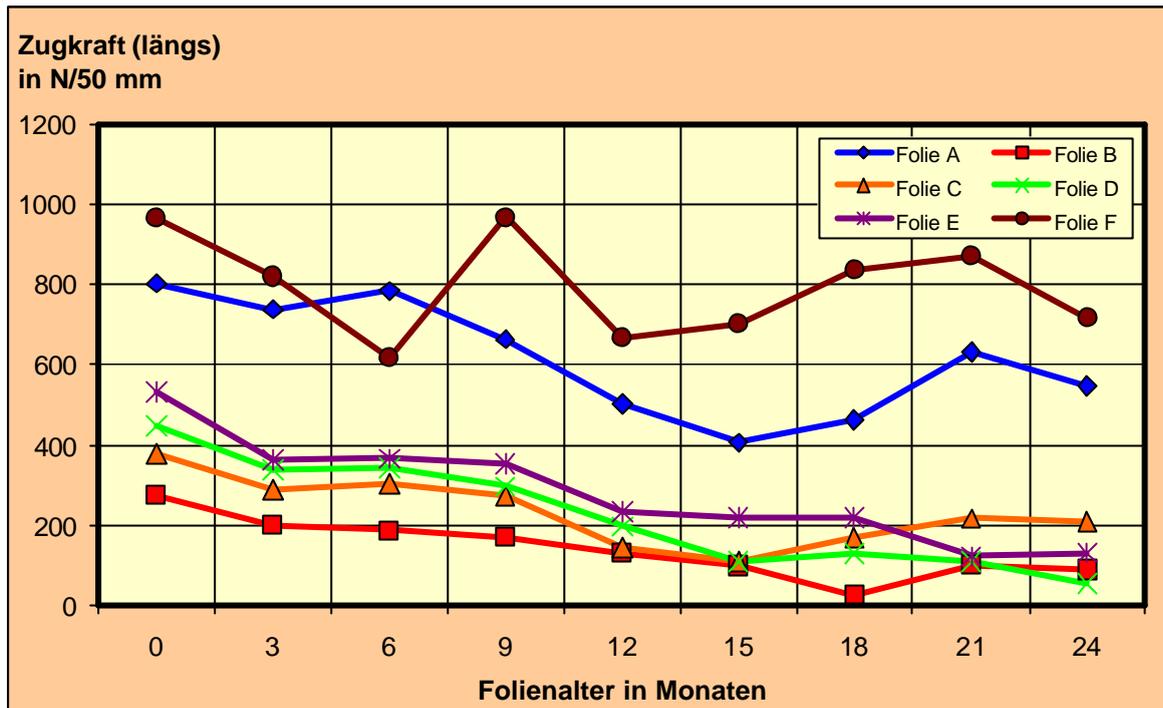


Abb. 6.3.2-1

Zugfestigkeit natürlich gealterter Unterspannbahnen in Folienlängsrichtung; die Zugkraft der Folien verringerte sich mit zunehmender Alterung. Die Relativwerte der Veränderung gegenüber dem Neuzustand sind in Abschnitt 6.3.4 dargestellt.

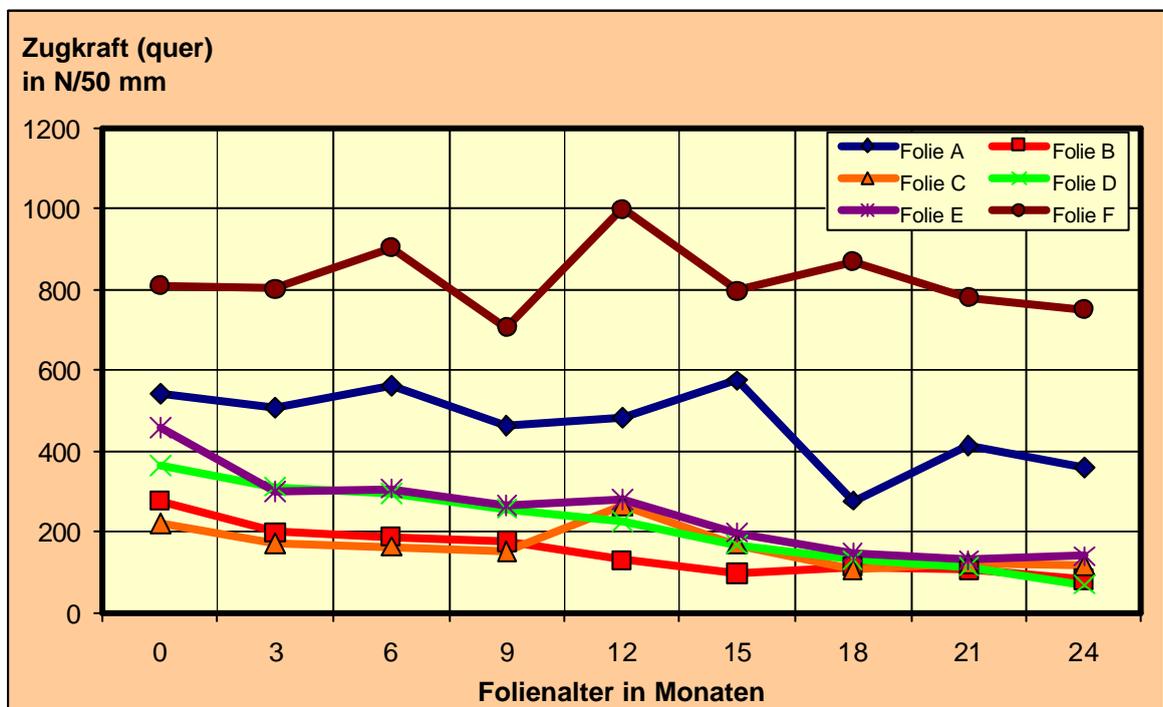


Abb. 6.3.2-2

Zug-Dehnungsdiagramm natürlich gealterter Unterspannbahnen in Folienquerrichtung; die Zugkraft der Folien verringerte sich mit zunehmender Alterung. Die Relativwerte der Veränderung gegenüber dem Neuzustand sind in Abschnitt 6.3.4 dargestellt.

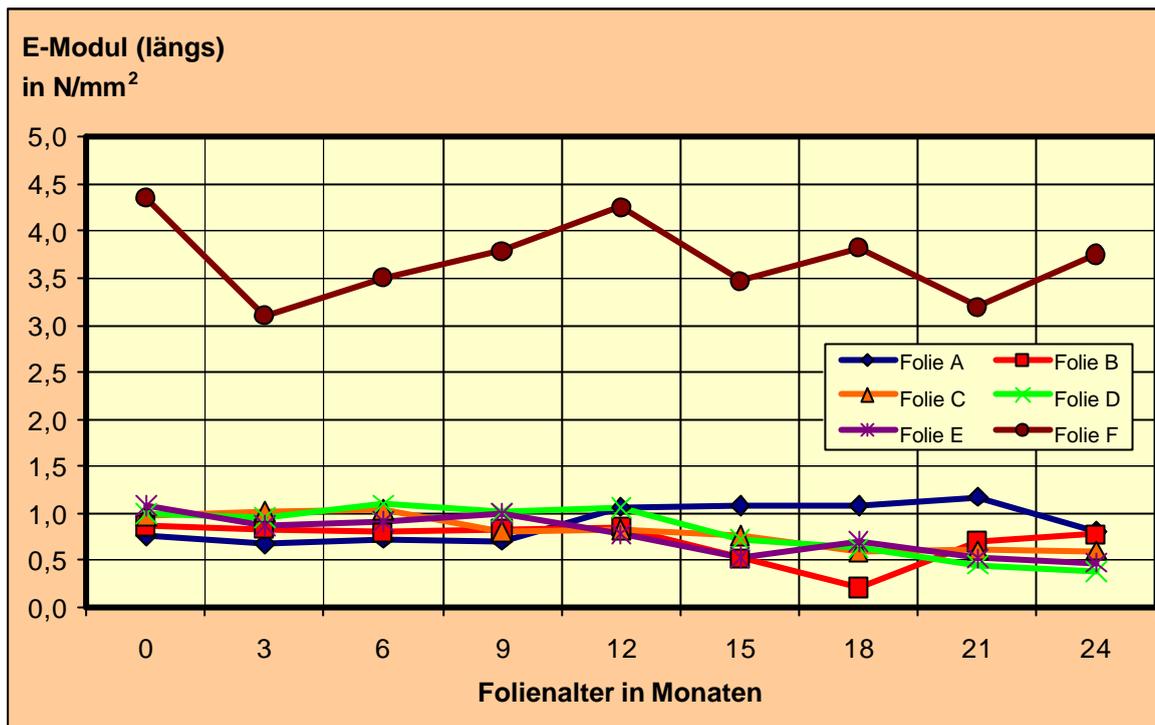


Abb. 6.3.2-3

E-Modul der Unterspannbahnen nach einer natürlichen Alterung (in Bahnlängsrichtung); der E-Modul blieb über die Dauer der Freibewitterung nahezu unverändert.

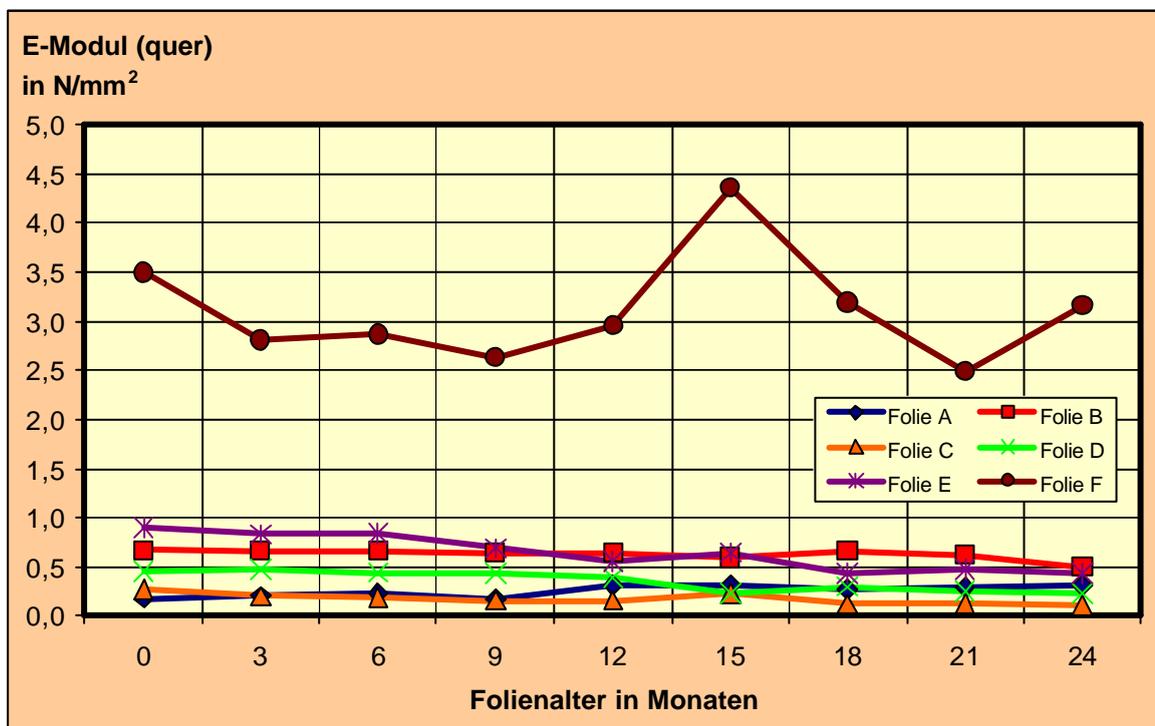


Abb. 6.3.2-4

E-Modul der Unterspannbahnen nach einer natürlichen Alterung (in Bahnquerrichtung); der E-Modul blieb über die Dauer der Freibewitterung nahezu unverändert (Ausnahme: Folie F nach 15 Monaten).

Während in Längsrichtung die Produkte A bis E mehr oder weniger konstant abnehmende Werte zeigten, waren in Querrichtung nur geringfügige Änderungen der Zugkraft zu verzeichnen. Die Folie F verhielt sich mit steigenden und fallenden Werten im Vergleich zu den anderen Produkten eher unbeständig. Auffallend ist, dass bei einigen Folien in den ersten drei Monaten der Freibewitterung (Juli bis September) ein stärkerer Abfall der Zugkraft eintrat. Diese Feststellung gilt insbesondere für die Produkte B bis E in Folienlängsrichtung. In diesem Fall könnte eine jahreszeitliche Abhängigkeit gegeben sein.

Betrachtet man den E-Modul der Unterspannbahnen in den Abbildungen 6.3.2-3 und 6.3.2-4, war auch in diesem Fall bei Folie F keine eindeutige Tendenz erkennbar. Demgegenüber behielten die anderen Produkte mit nur geringfügigen Abweichungen den E-Modul einer neuen Unterspannbahn auch nach der Freibewitterung bei. Dies gilt sowohl in Folienlängs- als auch in Folienquerrichtung.

Die Verhältnisse der Zugkräfte längs/quer zur Bahnrichtung sowie die Verhältnisse der E-Module nach der natürlichen Alterung sind in Anhang C dargestellt.

6.3.3 Zug-Dehnungsverhalten künstlich gealterter Unterspannbahnen

Die Ergebnisse des Zug-Dehnungsverhaltens künstlich gealterter Unterspannbahnen sind in den Abbildungen 6.3.3-1 und 6.3.3-2 für eine Belastung unter reiner Wärmelagerung und in den Abbildungen 6.3.3-3 und 6.3.3-4 für Belastungen infolge UV-Strahlung bei gleichzeitiger Einwirkung erhöhter Temperatur (50 °C bzw. 70 °C) dargestellt. Dabei ist festzustellen, dass die Lagerung bei erhöhten Temperaturen nur wenig Einfluss auf die letztendlich erreichte Zugkraft ausübte. Lediglich für das Produkt B ergaben sich in Längs- und Querrichtung Werte, die deutlich hinter der Zugkraft der nicht gealterten Folie zurückblieben.

Eindeutiger waren die Ergebnisse der künstlichen Alterung durch UV-Bestrahlung bei gleichzeitig erhöhter Temperatur. Vor allem in Bahnlängsrichtung zeigten die Folien einen stärkeren Abfall der Zugkraft (insbesondere die Folien A und B). Während die Produkte C, D und E die Zugkraft der neuen Produkte nur geringfügig unterschritten, stieg die erreichte Zugkraft der Folie F in einigen Versuchen an (z.B. in Längs- und Querrichtung des Normversuchs). Der geringe Einfluss der künstlichen Alterung auf das Zug-Dehnungsverhalten der Unterspannbahnen zeigte sich auch im E-Modul (siehe Abbildungen 6.3.3-5 bis 6.3.3-8). Die erreichten Werte lagen nach den verschiedenen Wärme- bzw. UV-Belastungen nur unwesentlich über oder unter dem E-Modul der neuen Unterspannbahnen (vgl. Abb. 6.3.1-4).

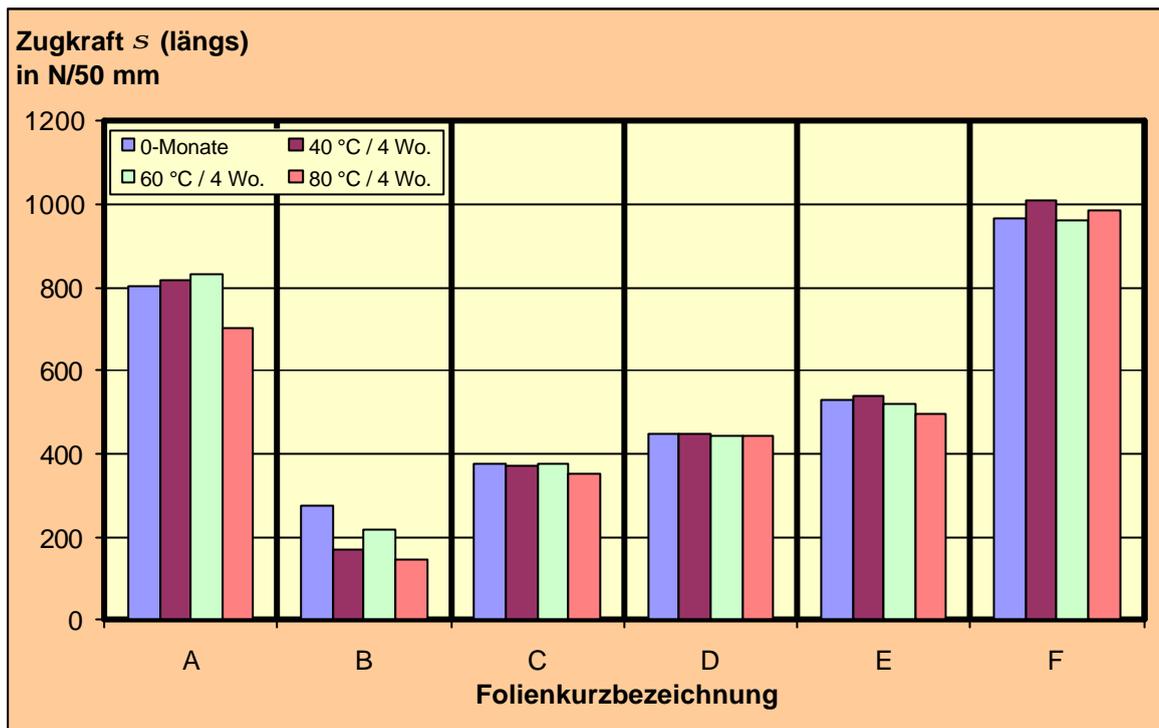


Abb. 6.3.3-1

Zugkraft künstlich durch Wärmelagerung gealterter Unterspannbahnen in Folienlängsrichtung; die Relativwerte sind in Abschnitt 6.3.4 aufgeführt.

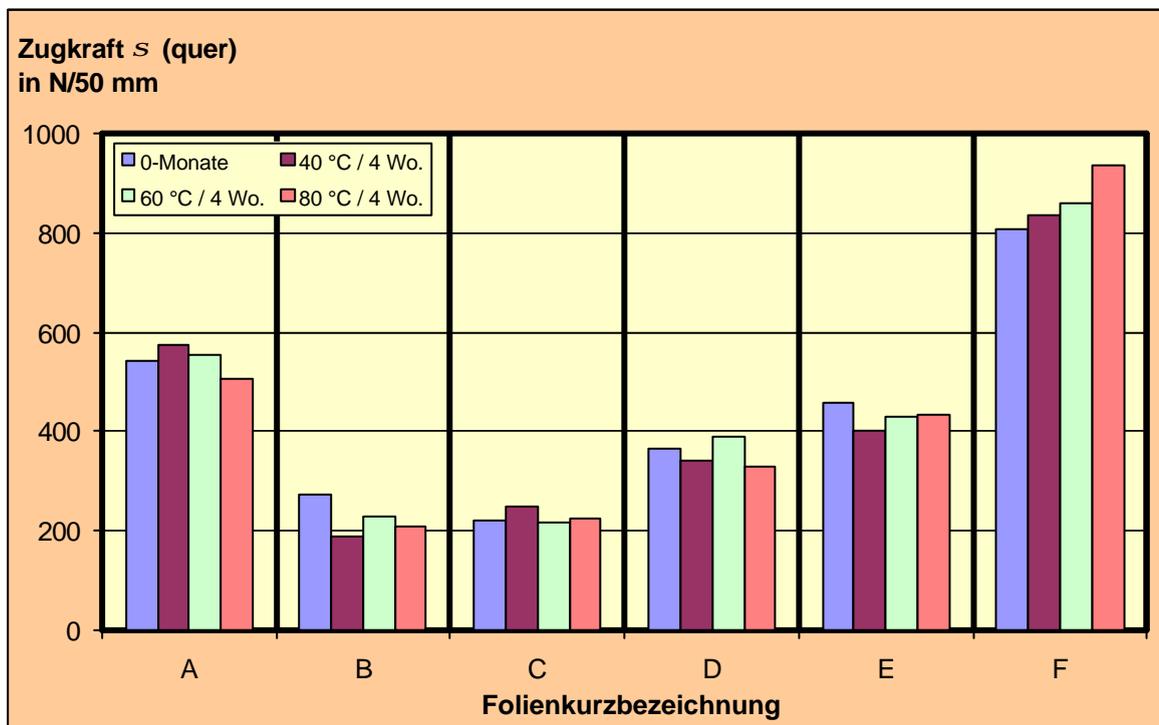


Abb. 6.3.3-2

Zugkraft künstlich durch Wärmelagerung gealterter Unterspannbahnen in Folienquerrichtung; die Relativwerte sind in Abschnitt 6.3.4 aufgeführt.

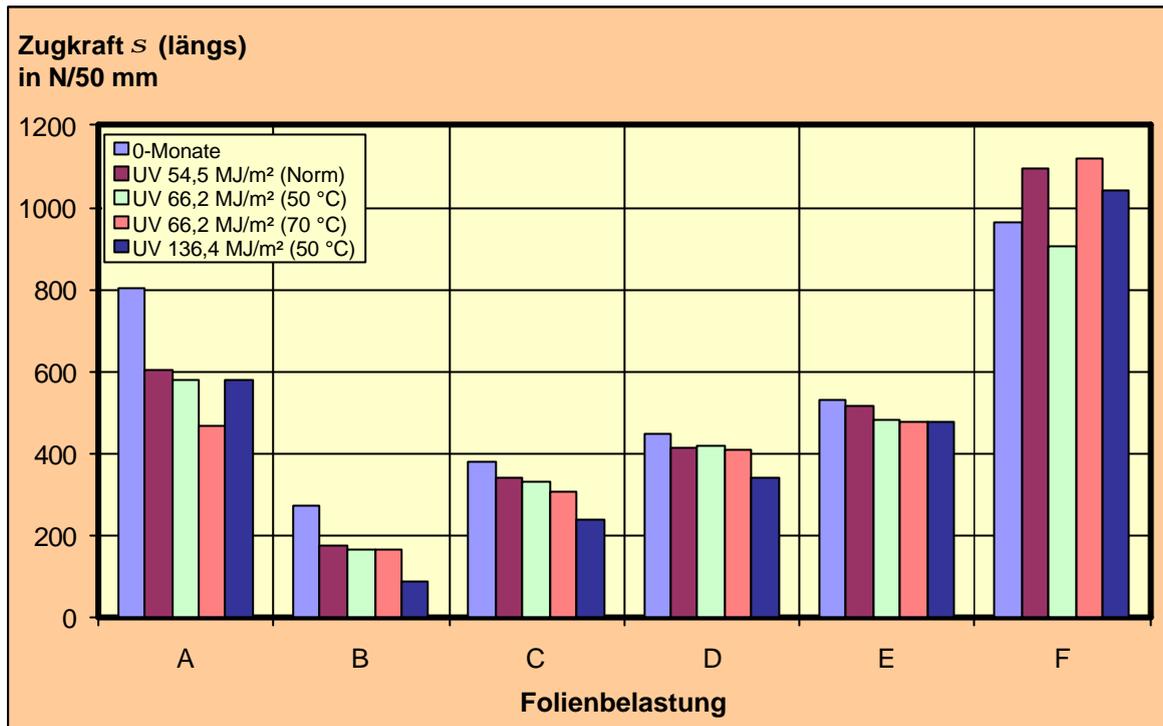


Abb. 6.3.3-3

Zugkraft künstlich durch UV-Bestrahlung gealterter Unterspannbahnen in Folienlängsrichtung; die Relativwerte sind in Abschnitt 6.3.4 aufgeführt.

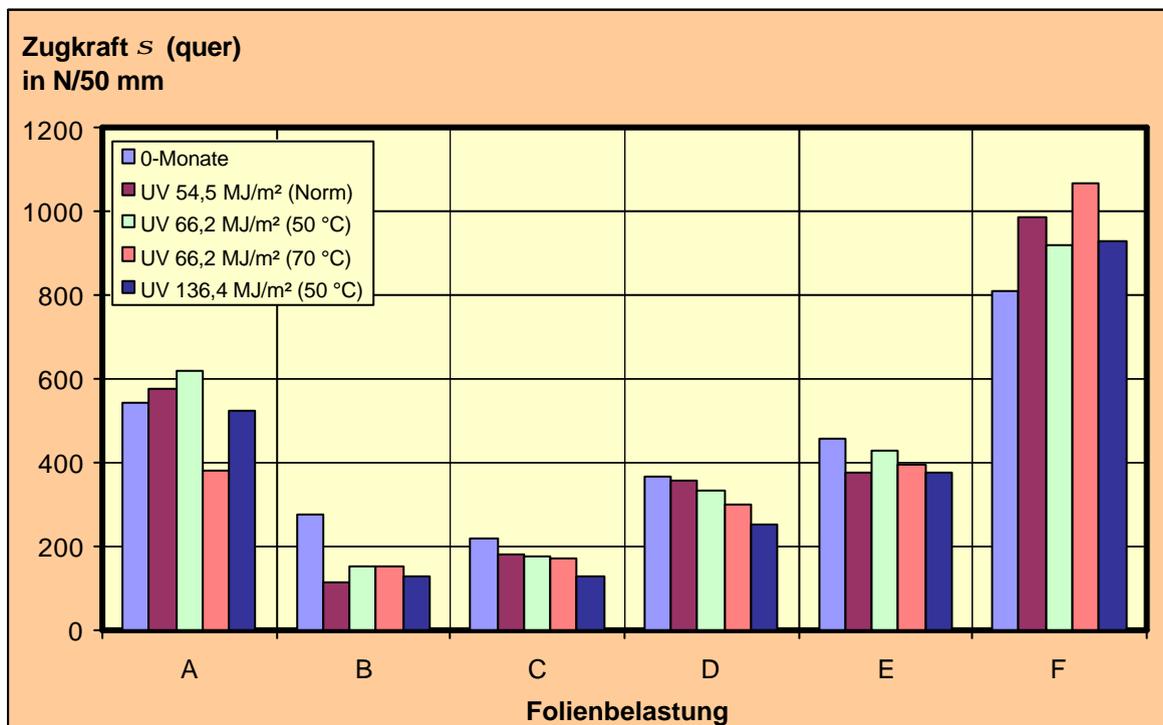


Abb. 6.3.3-4

Zugkraft künstlich durch UV-Bestrahlung gealterter Unterspannbahnen in Folienquerrichtung; die Relativwerte sind in Abschnitt 6.3.4 aufgeführt.

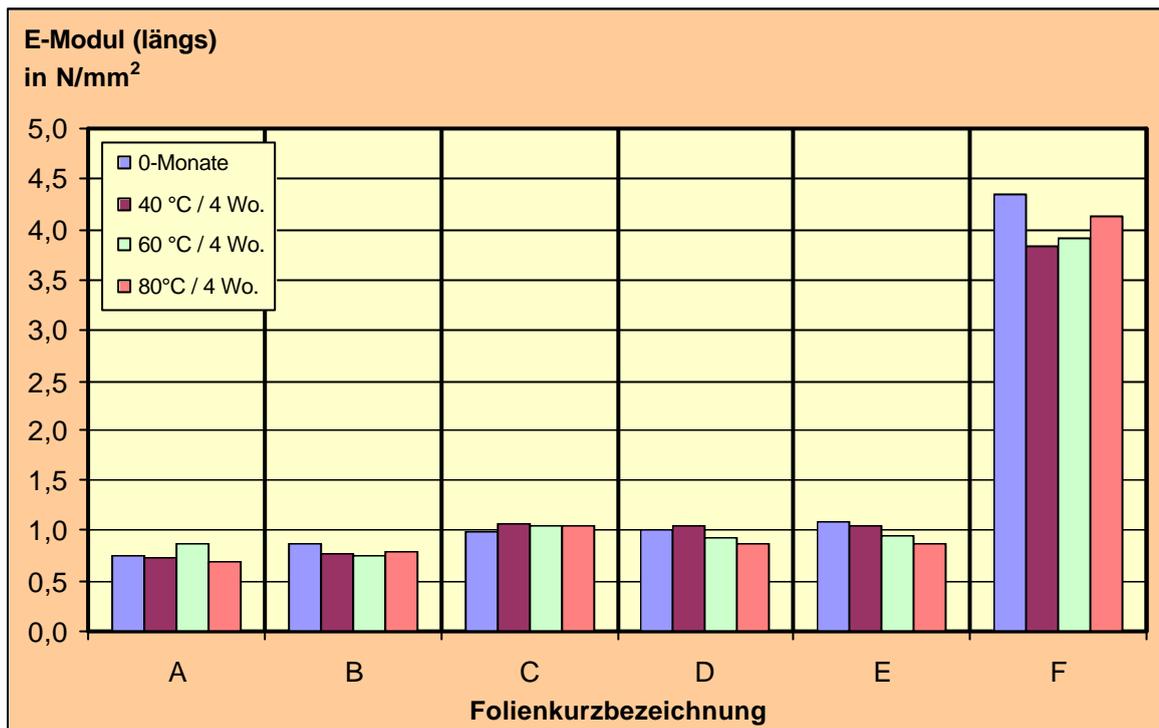


Abb. 6.3.3-5

E-Modul künstlich durch Wärmelagerung gealterter Unterspannbahnen in Folienlängsrichtung; die Relativwerte sind in Abschnitt 6.3.4 aufgeführt.

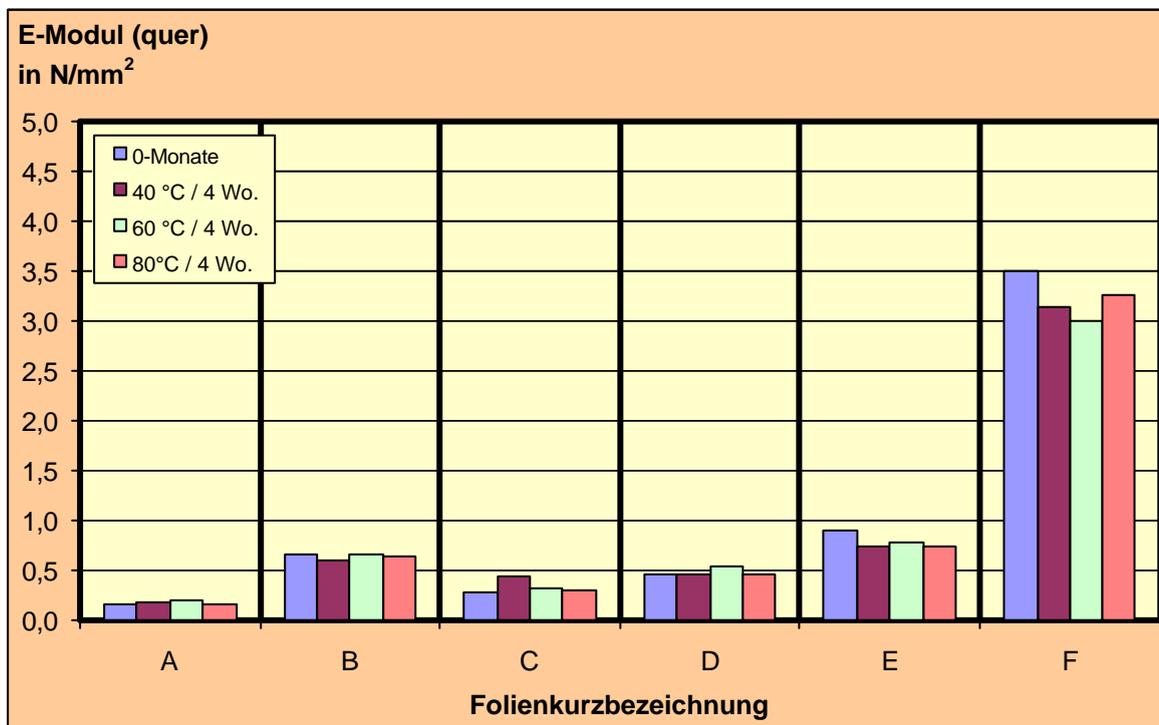


Abb. 6.3.3-6

E-Modul künstlich durch Wärmelagerung gealterter Unterspannbahnen in Folienquerichtung; die Relativwerte sind in Abschnitt 6.3.4 aufgeführt.

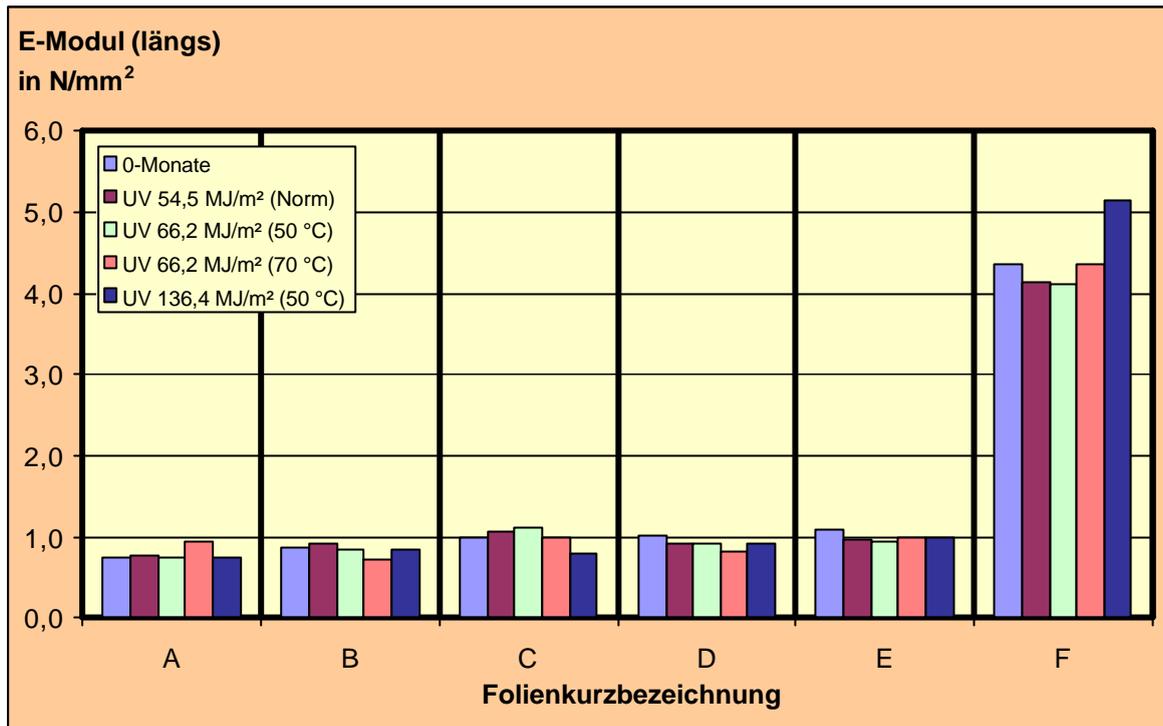


Abb. 6.3.3-7

E-Modul künstlich durch UV-Bestrahlung gealterter Unterspannbahnen in Folienlängsrichtung

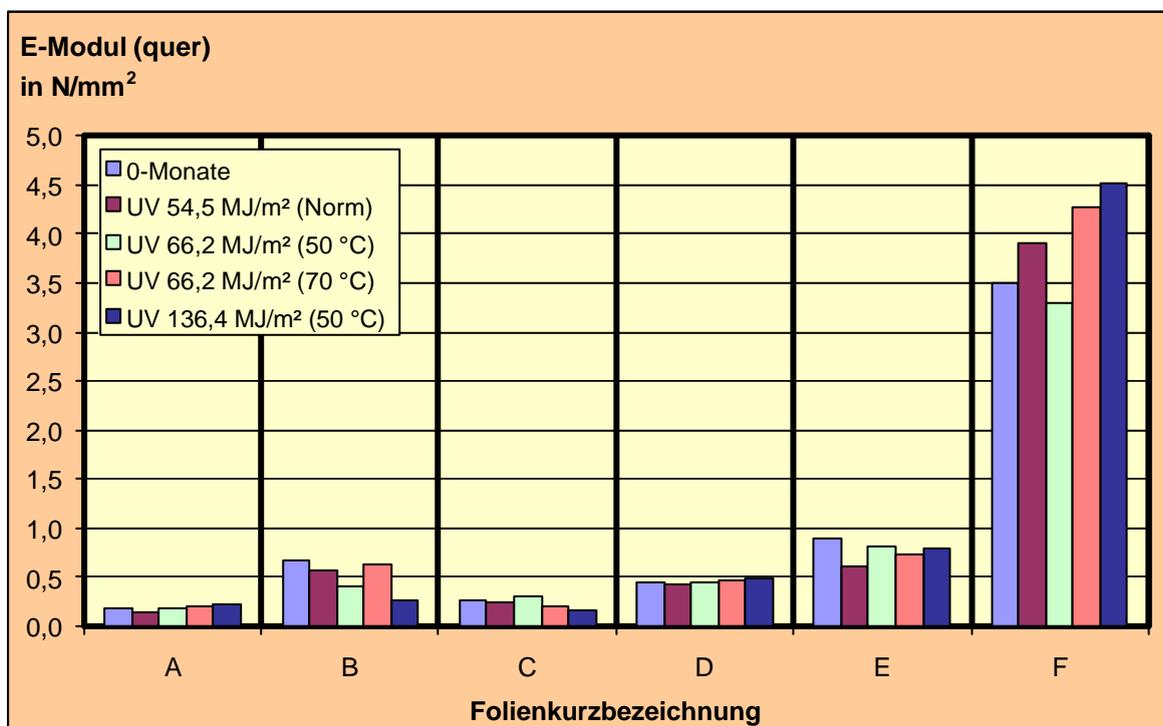


Abb. 6.3.3-8

E-Modul künstlich durch UV-Bestrahlung gealterter Unterspannbahnen in Folienquerrichtung

6.3.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse des Zug-Dehnungsverhaltens nach natürlicher und künstlicher Alterung

Zeigte die natürliche Alterung der Unterspannbahnen durch Freibewitterung Tendenzen einer mit der Zeit abnehmenden Zugkraft, konnte dieser Effekt durch eine reine Wärmelagerung bei erhöhten Temperaturen nur bei einem Produkt festgestellt werden. Dies belegen auch die prozentualen Veränderungen zum Neuprodukt (siehe Tabellen 6.3.4-1 bis 6.3.4-4). Die Belastung der Folien mit Temperaturen von 40 °C, 60 °C und 80 °C über einen Zeitraum von 4 Wochen hatte lediglich bei Folie B in beide Bahnrichtungen (längs und quer) Auswirkungen auf die Zugkraft (Abb. 6.3.4-2 und 6.3.4-5). Bei den übrigen Produkten führte nur die höchste Temperaturbelastung zu einer Veränderung, die aber meist auf eine Prüfrichtung beschränkt blieb (siehe Folie A und F).

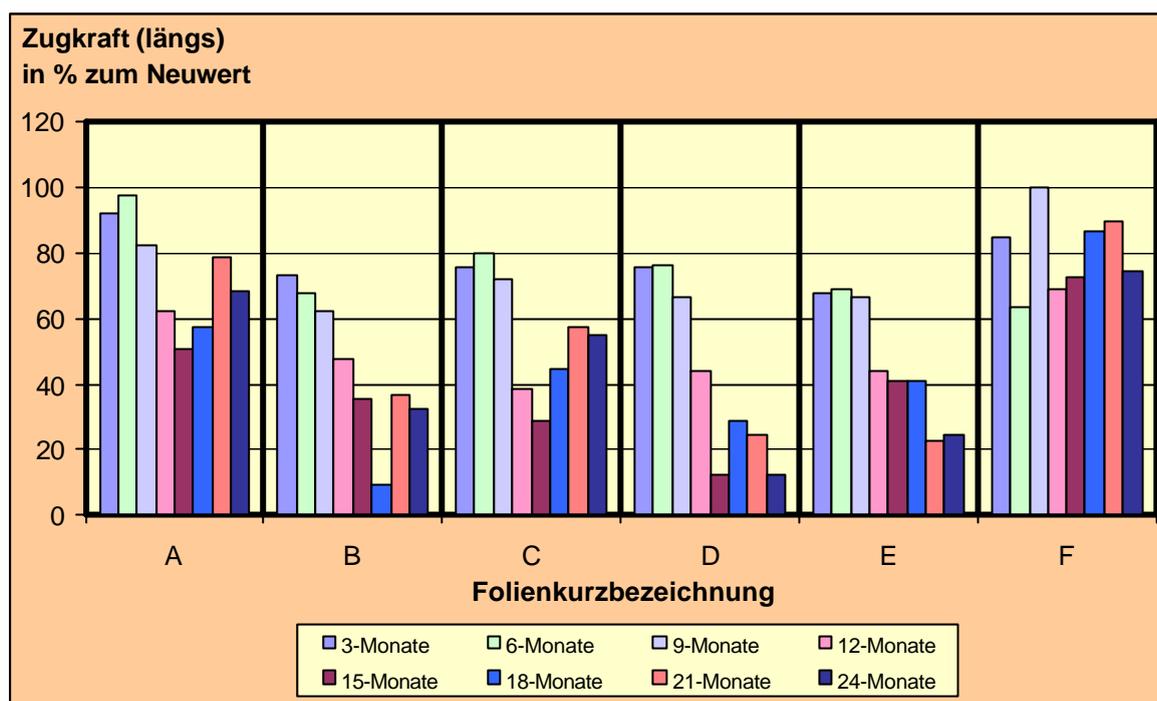
Tabelle 6.3.4-1

Änderung der Zugkraft in Folienlängsrichtung infolge natürlicher Belastung durch Freibewitterung (Änderung in % zum Neuwert)

	Belastung	A	B	C	D	E	F
	keine ^{*)}	100	100	100	100	100	100
natürliche Alterung	3-Monate	92	73	76	76	68	85
	6-Monate	98	68	80	76	69	64
	9-Monate	83	62	72	66	67	100
	12-Monate	62	48	38	44	44	69
	15-Monate	51	36	29	12	41	73
	18-Monate	58	9	45	29	41	87
	21-Monate	79	37	57	24	23	90
	24-Monate	68	32	55	12	25	74

^{*)} neues, nicht gealtertes Produkt

Im Gegensatz zu der reinen Wärmelagerung ergab die Belastung der Unterspannbahnen mit UV-Strahlung geringfügig abnehmende Werte der Zugkraft. Diese lagen für die Prüfung in Folienlängsrichtung bei Werten, die mit denen einer 6- bis 9-monatigen Freibewitterung vergleichbar sind. Dagegen zeigten sich durch die UV-Belastungen nur in Querrichtung der Bahn Alterungserscheinungen. Diese entsprachen denen einer 3 bis 6-monatigen Freibewitterung (siehe Tabellen 6.3.4-1 bis 6.3.4-4).

**Abb. 6.3.4-1**

Änderung der Zugkraft (längs) der Unterspannbahnen infolge natürlicher Belastung durch Freibewitterung (Angaben in % zum Neuwert); alle Produkte zeigten tendenziell eine Abnahme der Zugkraft mit zunehmender Alterung.

Tabelle 6.3.4-2

Änderung der Zugkraft in Folienlängsrichtung infolge verschiedener künstlicher Belastungen (Änderung in % zum Neuwert)

	Belastung	A	B	C	D	E	F
	keine ^{*)}	100	100	100	100	100	100
Künstliche Alterung	40 °C / 4 Wo.	102	61	97	100	101	105
	60 °C / 4 Wo.	104	79	100	99	98	100
	80 °C / 4 Wo.	87	53	92	99	93	102
	UV 54,5 MJ/m ² (Norm)	75	63	90	93	98	113
	UV 66,2 MJ/m ² (50 °C)	72	60	87	93	91	94
	UV 66,2 MJ/m ² (70 °C)	58	60	81	91	90	116
	UV 136,4 MJ/m ² (50 °C)	72	32	63	76	90	108

^{*)} neues, nicht gealtertes Produkt

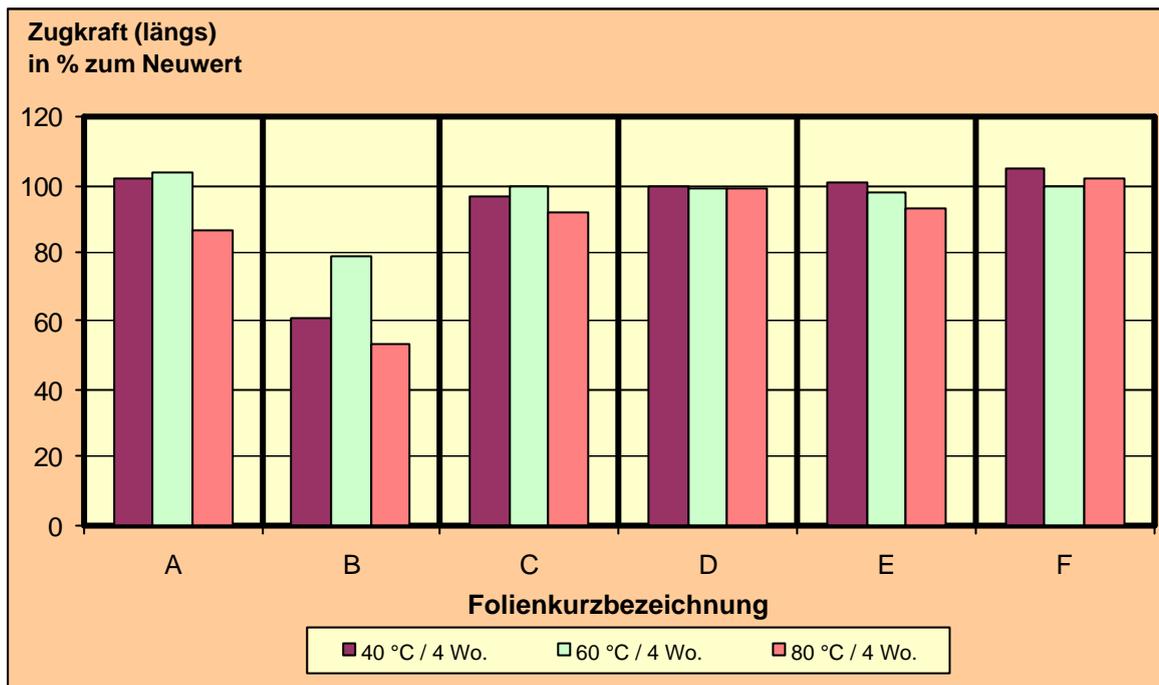


Abb. 6.3.4-2

Änderung der Zugkraft (längs) der Unterspannbahnen infolge künstlicher Belastung durch Wärmelagerung (Angaben in % zum Neuwert); mit Ausnahme des Produktes B waren die Auswirkungen der Wärmelagerung auf die Folien gering.

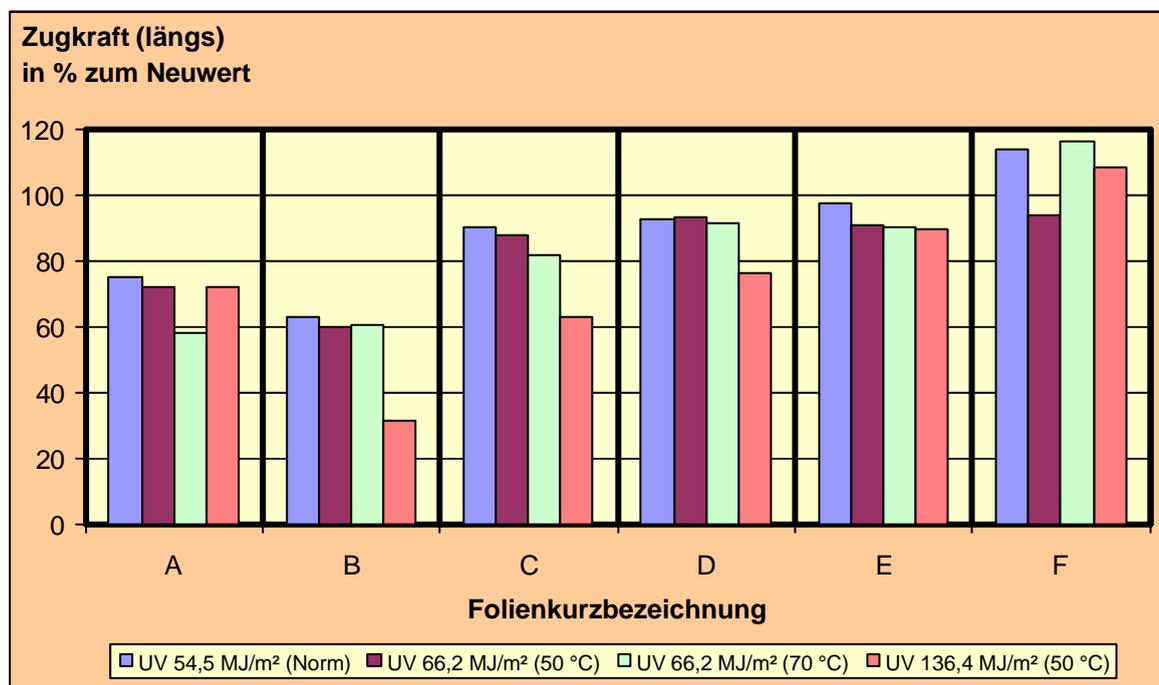


Abb. 6.3.4-3

Änderung der Zugkraft (längs) der Unterspannbahnen infolge künstlicher Belastung durch Wärmelagerung (Angaben in % zum Neuwert); die Produkte A und B zeigten bei der Strahlungsbelastung von 66,2 MJ/m² eine Abnahme der Zugkraft von mehr als 20 %, während sich bei alle anderen Folien die Zugkraft um höchstens 15 % verringerte.

Aus den Werten der Tabellen 6.3.4-1 bis 6.3.4-4 ist weiterhin zu entnehmen, dass es bei den Unterspannbahnen A und F nach der künstlichen Alterung in einigen Fällen zu einer Zunahme der Zugkraft kam (vgl. Abb. 6.3.4-3 und 6.3.4-6). Dieser Effekt konnte bei diesen beiden Produkten auch nach der Freibewitterung festgestellt werden (Abbildung 6.3.4-1 und 6.3.4-4).

Tabelle 6.3.4-4

Änderung der Zugkraft in Folienquerrichtung infolge verschiedener natürlicher und künstlicher Belastungen (Änderung in % zum Neuwert)

	Belastung	A	B	C	D	E	F
	keine ^{*)}	100	100	100	100	100	100
natürliche Alterung	3-Monate	94	72	77	85	66	99
	6-Monate	103	68	73	81	67	112
	9-Monate	85	63	68	71	57	87
	12-Monate	89	47	120	62	61	124
	15-Monate	106	35	76	23	43	98
	18-Monate	51	41	49	35	32	107
	21-Monate	76	38	55	31	28	96
	24-Monate	66	30	52	19	30	93

^{*)} neues, nicht gealtertes Produkt

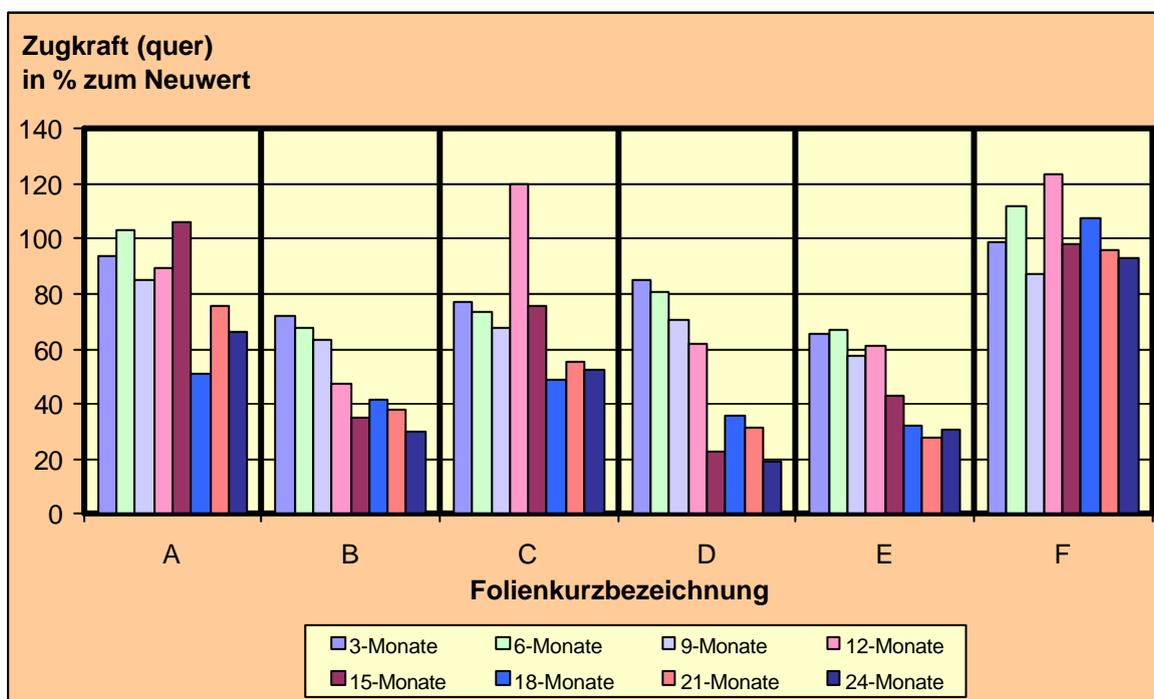


Abb. 6.3.4-4

Änderung der Zugkraft (quer) der Unterspannbahnen infolge natürlicher Belastung durch Freibewitterung (Angaben in % zum Neuwert); die Produkte B, D und E zeigten eine gleichmäßige Abnahme der Zugkraft mit zunehmender Alterung.

Tabelle 6.3.4-4

Änderung der Zugkraft in Folienquerrichtung infolge verschiedener natürlicher und künstlicher Belastungen (Änderung in % zum Neuwert)

	Belastung	A	B	C	D	E	F
	keine ¹⁾	100	100	100	100	100	100
künstliche Alterung	40 °C / 4 Wo.	106	68	113	93	88	103
	60 °C / 4 Wo.	102	82	97	107	94	106
	80 °C / 4 Wo.	93	76	101	91	95	116
	UV 54,5 MJ/m ² (Norm)	106	41	83	98	82	122
	UV 66,2 MJ/m ² (50 °C)	115	55	80	91	93	114
	UV 66,2 MJ/m ² (70 °C)	70	56	77	82	86	132
	UV 136,4 MJ/m ² (50 °C)	115	47	59	62	82	115

¹⁾ neues, nicht gealtertes Produkt

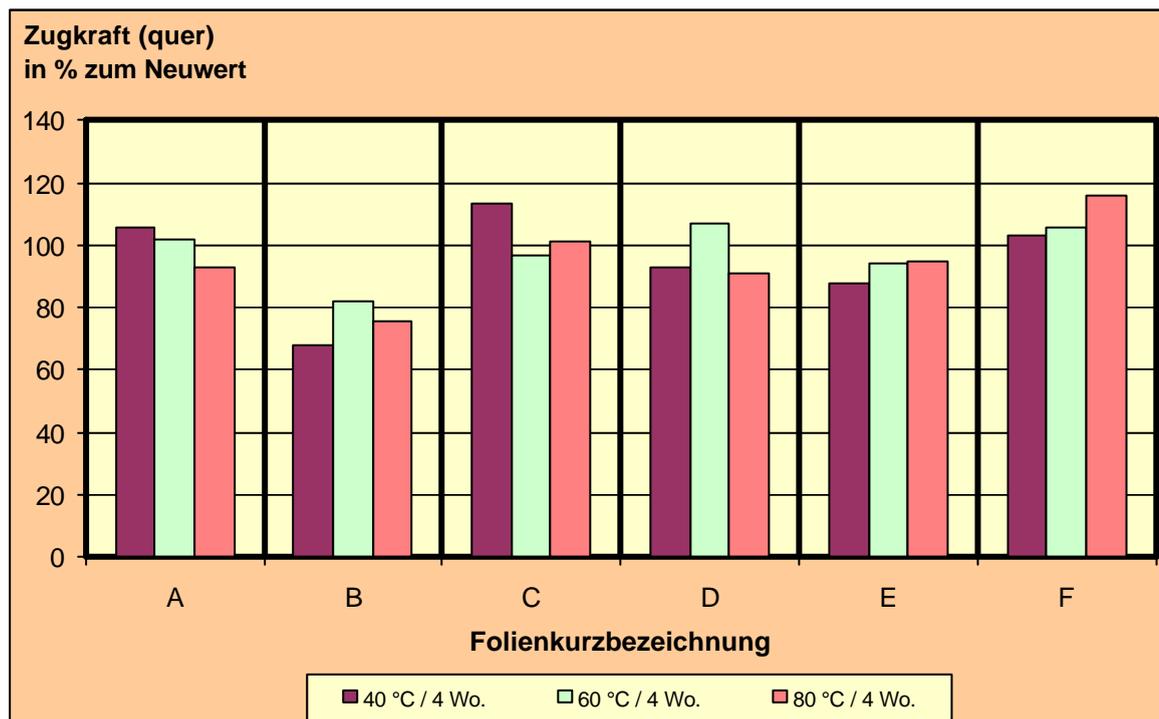


Abb. 6.3.4-5

Änderung der Zugkraft (quer) der Unterspannbahnen infolge künstlicher Belastung durch Wärmelagerung (Angaben in % zum Neuwert); mit Ausnahme des Produktes B waren die Auswirkungen der Wärmelagerung gering. Neben leicht gesunkenen Werten der Zugkraft wurden in einigen Fällen auch Verbesserungen festgestellt (C und F).

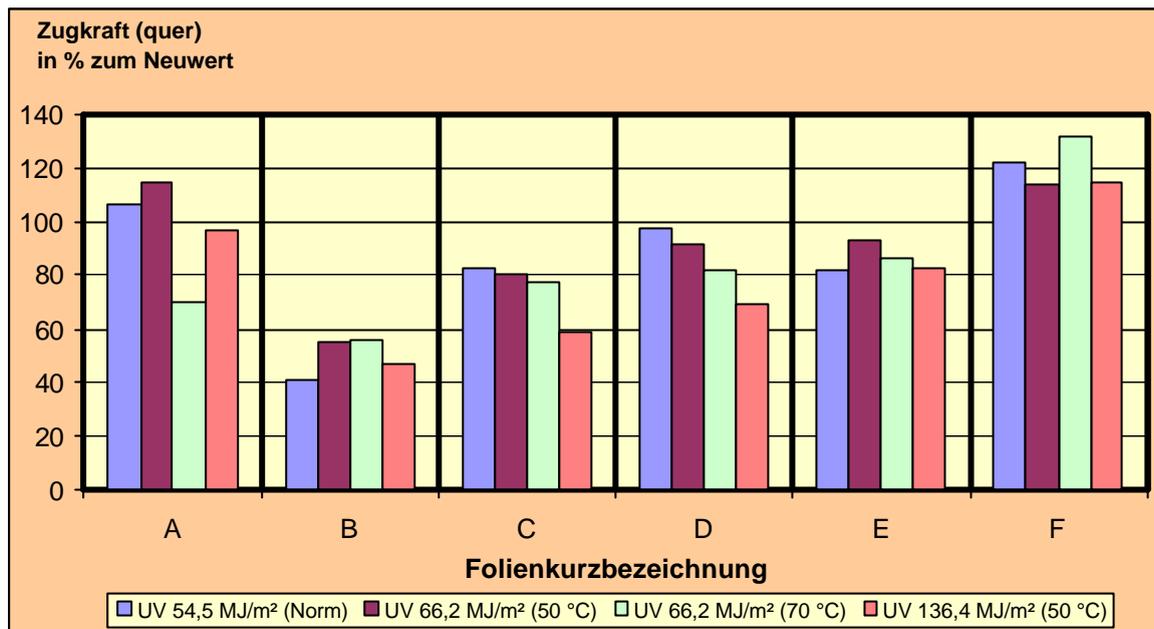


Abb. 6.3.4-6

Änderung der Zugkraft (quer) der Unterspannbahnen infolge künstlicher Belastung durch UV-Lagerung (Angaben in % zum Neuwert); die Zugkraft des Produktes B nahm deutlich ab (um mehr als 40 % des Neuwertes). Bei den Folien D und E reduziert sich die Zugkraft um maximal 31 %, während bei den Bahnen A ($66,2 \text{ MJ/m}^2$ bei 50 °C) und F auch Zunahmen der Zugkraft zu verzeichnen waren.

6.4 Bestimmung der Luftdurchlässigkeit

Mit der Bestimmung der Luftdurchlässigkeit der Unterspannbahnen sollte überprüft werden, ob die untersuchten Dachfolien eine ausreichende Dichtigkeit zur Herstellung luftdichter Flächen in Dachkonstruktion besitzen. Dabei erfolgte die Bestimmung der Luftdurchlässigkeit mit dem in Abschnitt 5.5.4 beschriebenen Versuchsaufbau. Es wurde jeweils der Luftvolumenstrom durch die Unterspannbahnen bei unterschiedlichen Druckdifferenzen Δp bestimmt.

Um die Unterspannbahnen als ausreichend dicht für die Herstellung luftdichter Flächen einstufen zu können, sollte ihre Luftdurchlässigkeit bei einer Druckdifferenz von $\Delta p = 50 \text{ Pa}$ nicht größer als $0,10 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ sein. Dieser Grenzwert orientiert sich am zulässigen Fugendurchlasskoeffizienten a von Fenstern und Bauteilanschlüssen. Die bei der Prüfung vorgegebene Druckdifferenz von $\Delta p = 50 \text{ Pa}$ ist bereits aus ISO 9972 und dem dort beschriebenen Verfahren zur Bestimmung der Luftdichtheit der Gebäudehülle bekannt (Differenzdruckverfahren bzw. Blower-Door-Verfahren).

6.4.1 Luftdurchlässigkeit neuer Unterspannbahnen

Der Luftvolumenstrom, der für neue Unterspannbahnen in Abhängigkeit der Druckdifferenz Δp gemessen wurde, ist in Abbildung 6.4.1-1 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die ermittelten Messwerte einen sehr weiten Bereich umfassten, der Werte deutlich unter $0,10 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ und weit über diesem Grenzwert beinhaltete.

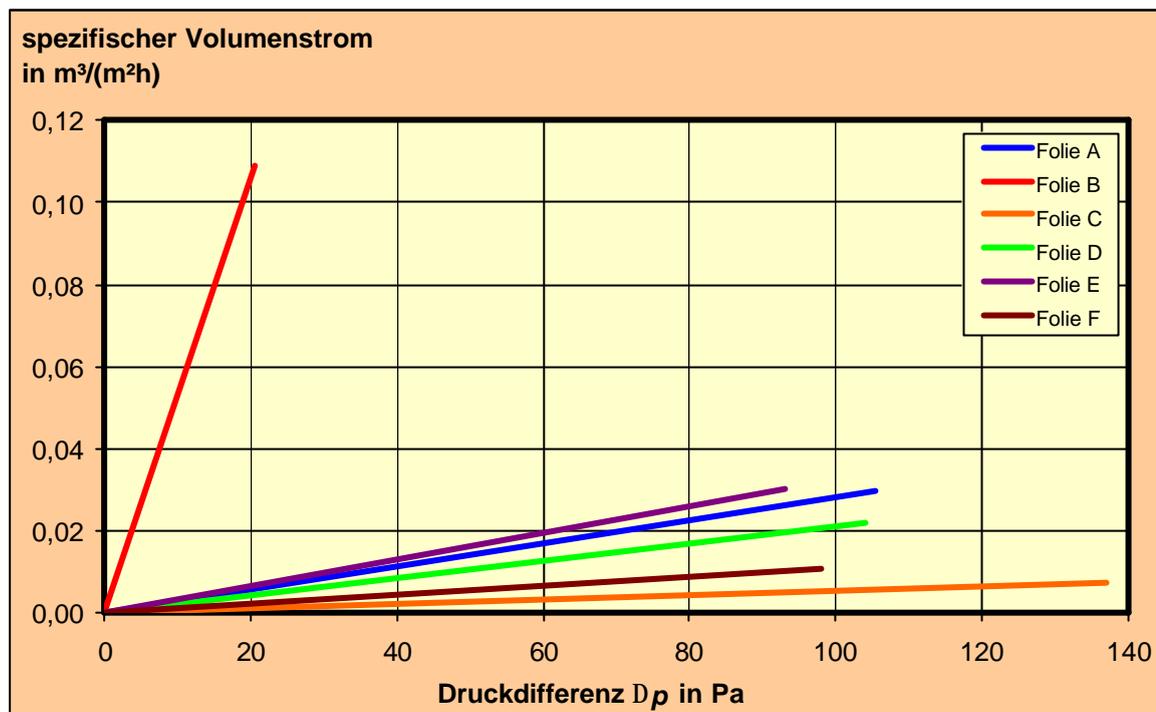


Abb. 6.4.1-1

Luftvolumenstrom in $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ durch neue Unterspannbahnen in Abhängigkeit von der Druckdifferenz Δp ; mit Ausnahme des Produktes B konnten alle Unterspannbahnen nach Norm als luftdicht eingestuft werden ($v_{L,\Delta p = 50 \text{ Pa}} < 0,1 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$).

Tabelle 6.4.1-1 führt die Ergebnisse der Norm-Luftdurchlässigkeit fabrikneuer Unterspannbahnen bei einer Druckdifferenz von $\Delta p = 50 \text{ Pa}$ auf. Mit Ausnahme von Folie B besitzen alle Produkte Luftdurchlässigkeiten von weniger als $0,10 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ und sind somit nach Norm als luftdicht einzustufen.

Obwohl das Material der einzelnen Lagen für eine mehr oder weniger große Luftdurchlässigkeit verantwortlich ist, konnte aus den Messergebnissen keine Abhängigkeit zwischen Luftdurchgang und Anzahl der Lagen abgelesen werden. Die aus zwei Lagen Polypropylen bestehende Unterspannbahn C besaß eine geringere Luftdurchlässigkeit als die dreilagige – ebenfalls aus PP bestehende – Folie D. Lediglich Produkte, in denen Polyethylen verarbeitet wurde, wiesen einen höheren Luftvolumenstrom auf. Zum Beispiel war der Luftdurchgang durch die Unterspannbahn D (zusammengesetzt aus drei Lagen PP) geringer, als der durch Folie E (PP/PE/PP).

Tabelle 6.4.1 -1

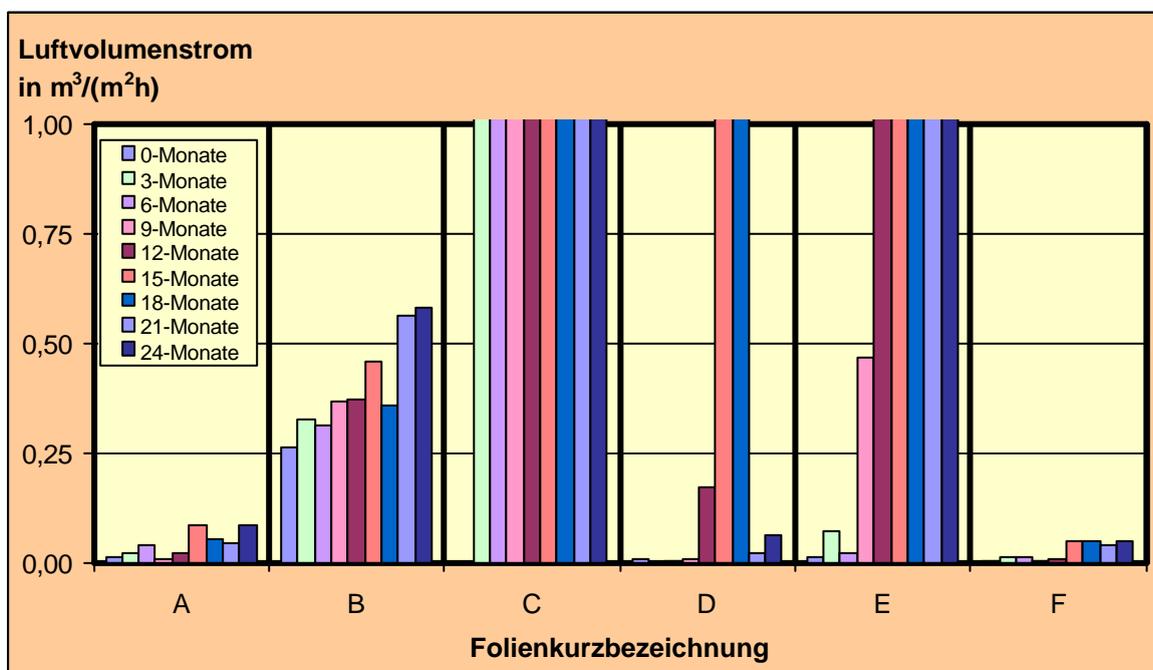
Luftdurchlässigkeiten der neuen Unterspannbahnen bei einer Druckdifferenz von $\Delta p = 50 \text{ Pa}$

Kurzbezeichnung	Luftvolumenstrom bei $\Delta p = 50 \text{ Pa}$ in $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$
A	0,0150
B	0,2650
C	0,0100
D	0,0100
E	0,0150
F	0,0100

Ein Zusammenhang zwischen Luftdurchgang und Foliengewicht bestand nicht. Betrachtet man die beiden leichtesten Folien B und C, so besaßen diese einerseits die größte (Folie B) andererseits die kleinste (Folie C) Luftdurchlässigkeit.

6.4.2 Luftdurchlässigkeit natürlich gealterter Unterspannbahnen

Die Prüfung der Luftdurchlässigkeit natürlich gealterter Unterspannbahnen erfolgt an dem Freibewitterungsmodell entnommenen Produktproben. Die ermittelten Luftvolumenströme sind für den Referenzdruck von $\Delta p = 50 \text{ Pa}$ in Abbildung 6.4.2-1 dargestellt.

**Abb. 6.4.2-1**

Luftvolumenstrom natürlich gealterter Unterspannbahnen bei einer Druckdifferenz von $\Delta p = 50 \text{ Pa}$

Während bei den Folien A und F auch nach 12-monatiger Freibewitterung hinsichtlich der Luftdurchlässigkeit nahezu keine Veränderungen auftraten und auch nach 24 Monaten nur eine geringfügige Zunahme im Vergleich zum Neuprodukt erfolgte, kam es bei den Produkten C nach 3 Monaten, B und E nach 9 Monaten sowie D nach 12 Monaten zu einem sehr starken und plötzlichen Anstieg des Luftdurchgangs.

Auch nach zwei Jahren Freibewitterung lagen die Messwerte des Luftvolumenstroms der Dachbahnen A und F weiterhin unter dem für „luftdichte“ Unterspannbahnen definierten Grenzwert von $0,10 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ (siehe Tabelle 6.4.1-1 und Abb. 6.4.2-1).

Tabelle 6.4.1-1

Luftdurchlässigkeiten neuer und natürlich gealterter Unterspannbahnen bei einer Druckdifferenz von $\Delta p = 50 \text{ Pa}$

Kurzbezeichnung der Unterspannbahn	Luftvolumenstrom bei einer Druckdifferenz von $\Delta p = 50 \text{ Pa}$ in $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$				
	Neu	3 Monate	6 Monate	9 Monate	12 Monate
A	0,0150	0,0250	0,0400	0,0100	0,0250
B	0,2650	0,3300	0,3150	0,3700	0,3750
C	0,0100	4,3500	7,7450	17,7750	106,7100
D	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	0,1750
E	0,0150	0,0750	0,0250	0,4700	70,3350
F	0,0100	0,0150	0,0150	0,0100	0,0100

Kurzbezeichnung der Unterspannbahn	Luftvolumenstrom bei einer Druckdifferenz von $\Delta p = 50 \text{ Pa}$ in $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$				
	Neu	15 Monate	18 Monate	21 Monate	24 Monate
A	0,0150	0,0850	0,0550	0,0450	0,0850
B	0,2650	0,4600	0,3600	0,5650	0,5850
C	0,0100	432,7950	452,1750	432,7950	432,7950
D	0,0100	11,6250	7,1500	0,0250	0,0650
E	0,0150	340,4000	256,7450	332,9200	332,9200
F	0,0100	0,0500	0,0500	0,0400	0,0500

Betrachtet man den spezifischen Luftvolumenstrom der frei bewitterten Folien im Vergleich zu den Neuprodukten, war nach 12 Monaten natürlicher Alterung eine deutliche Zunahme der Durchlässigkeit zu erkennen (siehe Tabelle 6.4.1-2 und

Abbildung 6.4.2-2). Eine Ausnahme bildete das Produkt B, welches über das erste Jahr Freibewitterung konstante Werte lieferte.

Tabelle 6.4.4-1

Änderung der Luftdurchlässigkeit der Unterspannbahnen infolge natürlicher Belastung (Änderung in % zum Neuwert)

	Belastung	A	B	C	D	E	F
	keine ^{*)}	100	100	100	100	100	100
natürliche Alterung	3-Monate	167	125	$4,4 \cdot 10^4$	10	500	150
	6-Monate	267	119	$7,7 \cdot 10^4$	50	167	150
	9-Monate	67	140	$1,8 \cdot 10^5$	100	3133	50
	12-Monate	167	142	$1,1 \cdot 10^6$	1750	$4,7 \cdot 10^5$	100
	15-Monate	567	174	$4,3 \cdot 10^6$	77500	$2,3 \cdot 10^6$	500
	18-Monate	367	136	$4,5 \cdot 10^6$	71500	$1,7 \cdot 10^6$	500
	21-Monate	300	213	$4,3 \cdot 10^6$	250	$2,2 \cdot 10^6$	400
	24-Monate	567	221	$4,3 \cdot 10^6$	650	$2,2 \cdot 10^6$	500

^{*)} neues, nicht gealtertes Produkt

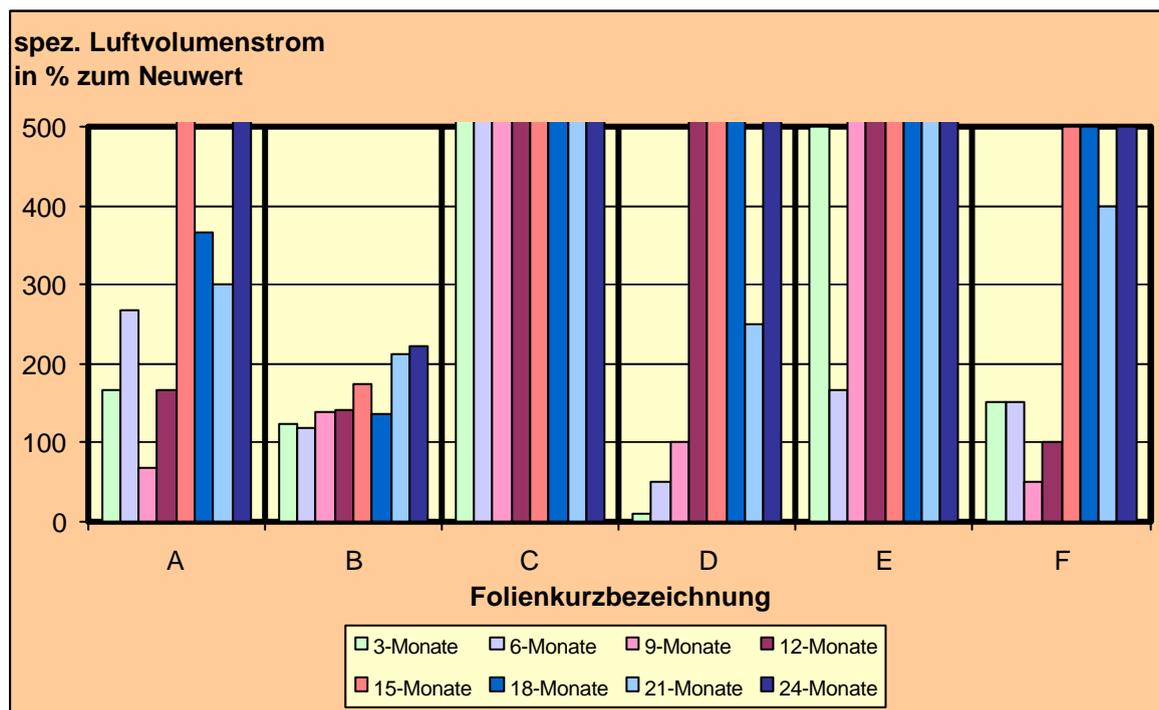


Abb. 6.4.2-2

Änderung des spezifischen Luftvolumenstroms der Unterspannbahnen infolge der natürlichen Belastung durch Freibewitterung (Änderung in % zum Neuwert); bereits nach 12 Monaten Freibewitterung besaßen die Folien Luftdurchlässigkeiten, die ihren Anfangswert deutlich überschritten (zum Teil um über 500 %). Eine Ausnahme bildete die Unterspannbahn B mit einem über 12 Monate nahezu unverändertem Luftdurchgang.

6.4.3 Luftdurchlässigkeit künstlich gealterter Unterspannbahnen

Die künstliche Alterung der Unterspannbahnen erfolgte mit den in Abschnitt 5.4 beschriebenen Prüfprogrammen. Die Ergebnisse der Luftdurchlässigkeitsmessungen nach einer Wärme- bzw. UV-Alterung werden vergleichend gegenübergestellt. Dies ist erforderlich, weil die verschiedenen Unterspannbahnen sehr unterschiedliche Reaktionen auf reine Wärme- bzw. UV-Belastungen zeigten. In Abbildung 6.4.3-1 und 6.4.3-2 sind die Ergebnisse der Messungen nach einer Belastung durch erhöhte Temperaturen sowie UV-Bestrahlung dargestellt.

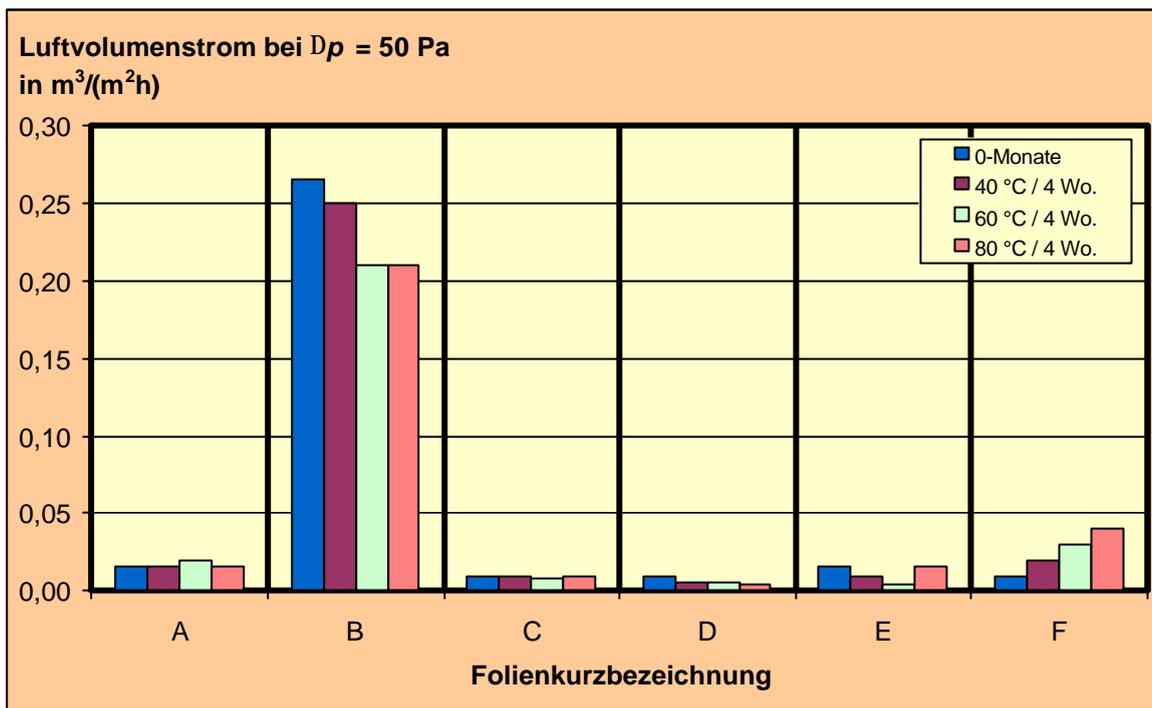


Abb. 6.4.3-1

Luftvolumenstrom in $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ durch Wärmelagerung künstlich gealterter Unterspannbahnen bei einer Druckdifferenz von $\Delta p = 50 \text{ Pa}$; die Auswirkungen der Wärmelagerung auf die Unterspannbahnen waren gering. Fast alle Produkte konnten auch nach den verschiedenen Temperaturbelastungen gemäß Norm als luftdicht eingestuft werden (Ausnahme: Folie B).

Während die Wärmelagerung hinsichtlich des Luftdurchgangs auf die Folien D, E und F, nicht aber auf A, B und C Einfluss nahm (vgl. Abbildung 6.4.3-3), kam es nach den UV-Versuchen zu deutlich gestiegenen Luftvolumenströmen (Abb. 6.4.3-2 und Abb. 6.4.3-4). Insbesondere nach der UV-Bestrahlung bei gleichzeitig erhöhter Temperatur von 70 °C erhöhte sich der Luftdurchgang beträchtlich (siehe Tabelle 6.4.3-1 und Abbildung 6.4.3-4).

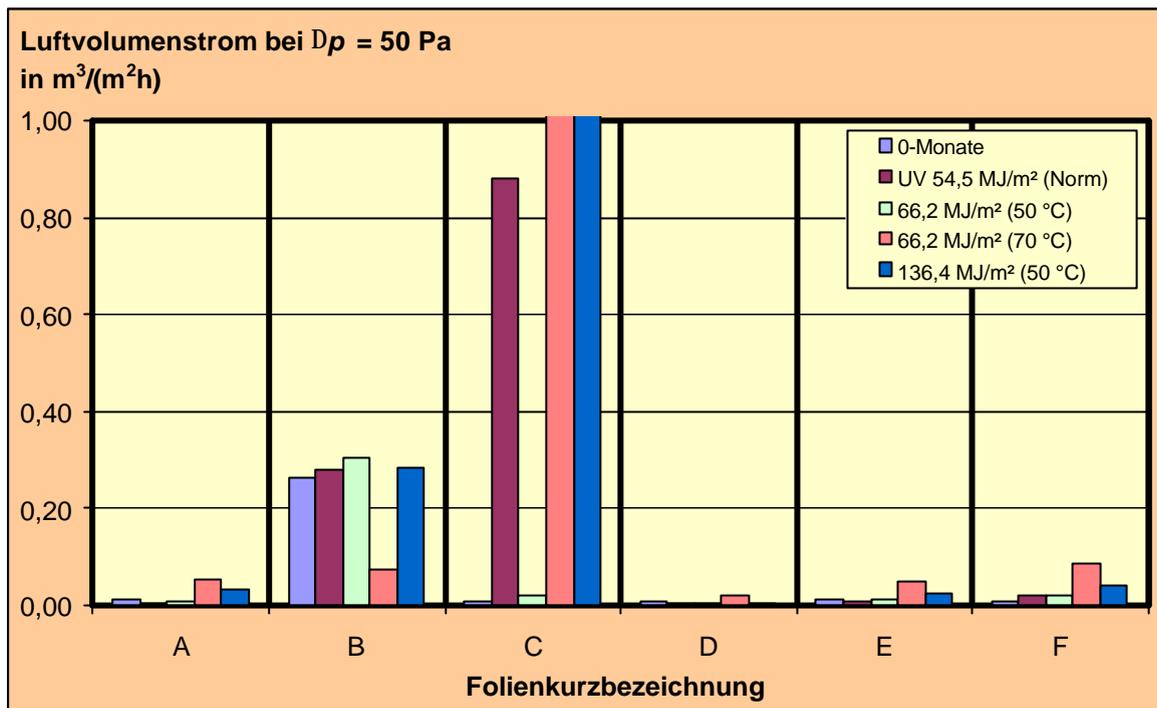


Abb. 6.4.3-2

Luftvolumenstrom in $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ durch UV-Bestrahlung künstlich gealterter Unterspannbahnen bei einer Druckdifferenz von $\Delta p = 50 \text{ Pa}$; größere Änderungen der Luftdurchlässigkeit stellten sich im Vergleich zum Neuprodukt nur bei dem Produkt C ein.

Tabelle 6.4.3-1

Änderung der Luftdurchlässigkeit der Unterspannbahnen infolge verschiedener künstlicher Belastungen (Änderung in % zum Neuwert)

	Belastung	A	B	C	D	E	F
	keine ^{*)}	100	100	100	100	100	100
künstliche Alterung	40 °C / 4 Wo.	100	94	100	50	67	200
	60 °C / 4 Wo.	133	79	80	50	23	300
	80 °C / 4 Wo.	100	79	100	45	100	400
	UV 54,5 MJ/m ² (Norm)	33	106	35200	50	67	200
	UV 66,2 MJ/m ² (50 °C)	67	115	800	50	100	200
	UV 66,2 MJ/m ² (70 °C)	351	28	$1,4 \cdot 10^5$	224	341	848
	UV 136,4 MJ/m ² (50 °C)	233	108	$3,8 \cdot 10^6$	50	167	400

^{*)} neues, nicht gealtertes Produkt

Bezüglich der Wärmelagerung zeigte sich lediglich bei der Folie D ein deutlicher Rückgang des Luftdurchgangs (ca. 50 % bei allen Temperaturbelastungen siehe Tab. 6.4.3-1 und Abb. 6.4.3-3). Für das Produkt E führten die Wärmelagerungen bei 40 °C und 60 °C zu verringerten Volumenströmen. Lediglich bei der Unterspannbahn F verschlechterten die verschiedenen Temperaturbeanspruchungen die Luftdichtigkeit. Die deutlichen Alterungserscheinungen (im Sinne einer zunehmenden Luftdurchlässigkeit), die bei den Produkten nach der UV-Bestrahlung mit 66,2 MJ/m² bei 70 °C auftraten, konnten durch die erhöhten Temperaturen nicht erreicht werden.

Betrachtet man sich die relativen Änderungen der Luftdurchlässigkeit im Vergleich zu den nicht gealterten Produkten, waren Auswirkungen der Wärmelagerung lediglich auf die Folien D, E und F feststellbar (Tabelle 6.4.3-1 und Abb. 6.4.3-3). Dagegen bewirkte die UV-Bestrahlung mit insgesamt 66,2 MJ/m² bei einer gleichzeitigen Temperatur von 70 °C bei allen Produkten eine deutliche Zunahme der Luftdurchlässigkeit (mehr als 200 % zum Neuprodukt). Eine Ausnahme stellte dabei die Folie B dar, deren Dichtigkeit im Gegensatz zu den anderen Produkten bei dieser Belastung besser wurde (Abb. 6.4.3-4).

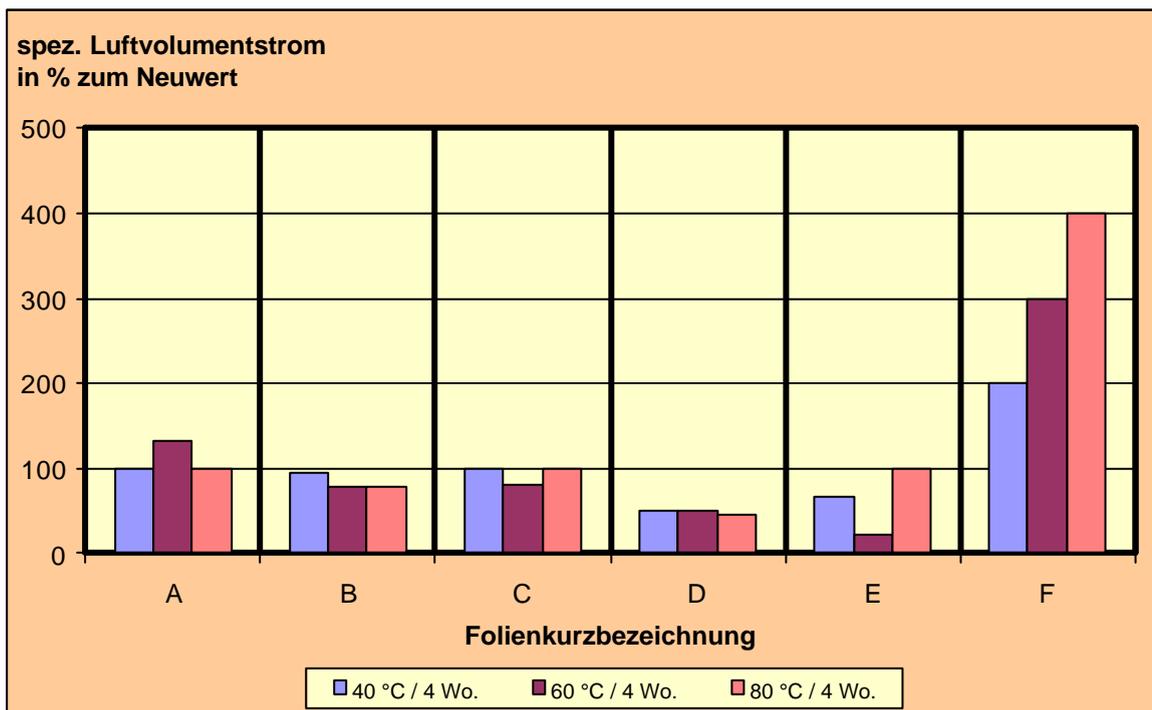


Abb. 6.4.3-3

Änderung des spezifischen Luftvolumenstroms der Unterspannbahnen infolge der künstlichen Belastung durch Wärmelagerung (Änderung in % zum Neuwert); die Unterspannbahnen A, B und C blieben durch die Wärmelagerung nahezu unverändert. Die Folien D und E wurden luftdichter, das Produkt F luftdurchlässiger.

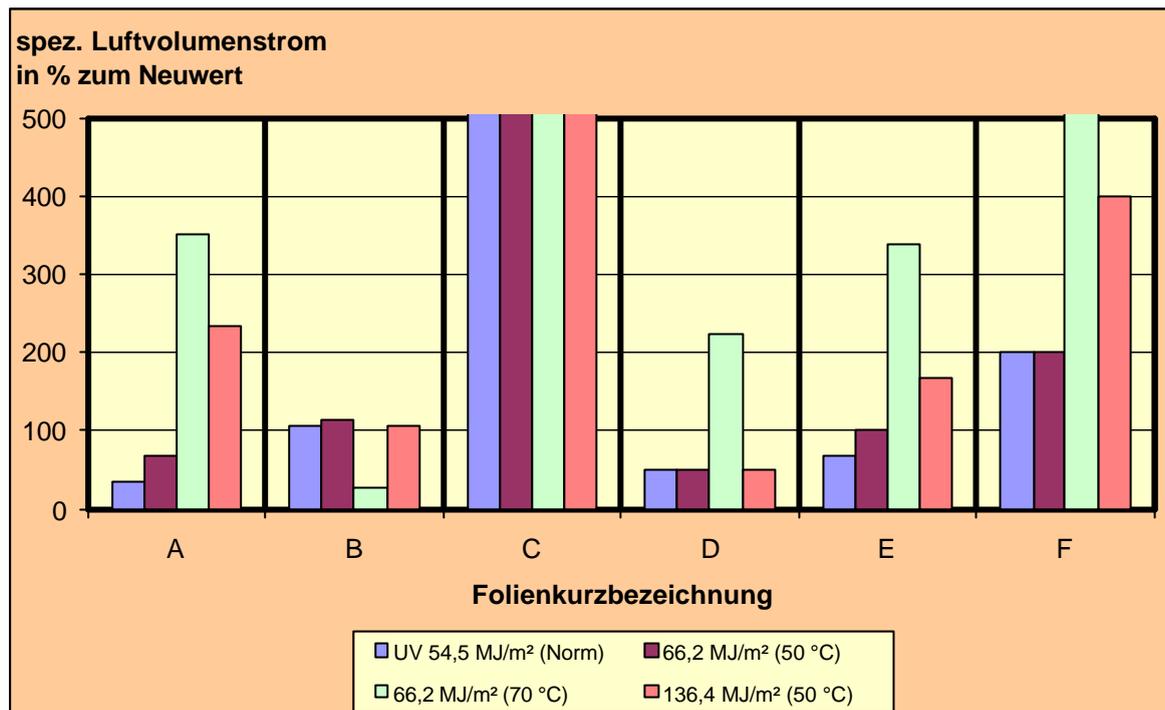


Abb. 6.4.3-4

Änderung des spezifischer Luftvolumenstroms der Unterspannbahnen infolge der künstlichen Belastung durch UV-Bestrahlung (Änderung in % zum Neuwert); mit Ausnahme der Folie B wurden alle Produkte nach einer UV-Bestrahlung mit 66,2 MJ/m² bei einer gleichzeitig erhöhten Temperatur von 70 °C luftdurchlässiger. Dagegen führte der Normversuch nur bei den Folien C und F zu einem erhöhten Luftdurchgang.

6.4.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse der Luftdurchlässigkeit nach natürlicher und künstlicher Alterung

Vergleicht man die Ergebnisse der Produkte untereinander, blieben nur die Folien A und F sowohl nach einer natürlichen als auch nach einer künstlichen Alterung unter der festgelegten Grenze von 0,10 m³/(m²h) und konnten somit als luftdicht eingestuft werden.

Die einlagige Folie B hatte vor der Alterung die höchste Luftdurchlässigkeit aller Produkte. Der für diese Unterspannbahn gemessene Luftvolumenstrom wurde auch durch die natürlichen und künstlichen Belastungen nur unwesentlich verändert. Lediglich nach der UV-Bestrahlung mit 66,2 MJ/m² (70 °C) verringerte sich der Luftdurchgang unter den Grenzwert von 0,10 m³/(m²h) (Abb. 6.4.3-2).

Die Unterspannbahn C verzeichnete bereits nach den ersten drei Monaten Freibewitterung einen sehr starken Anstieg des Luftdurchgangs. Dieser konnte ebenfalls durch die im Normversuch kombinierte UV- und Wärmelagerung sowie die UV-Bestrahlung mit 66,2 MJ/m² bei 70 °C erreicht werden. Dagegen zeigte die reine

Wärmelagerung hinsichtlich der Luftdurchlässigkeit keine Auswirkungen auf das Folienverhalten. Auch veränderte die UV-Belastung von $66,2 \text{ MJ/m}^2$ bei einer Temperatur von $50 \text{ }^\circ\text{C}$ den Luftdurchgang nicht in dem Umfang, wie die Freibewitterung.

Die Folien D und E zeigten nach 9 bzw. 12 Monaten natürlicher Alterung einen erhöhten Luftvolumenstrom. Dieser ließ sich allerdings nicht durch künstliche Wärme- und UV-Belastungen herbeiführen. In diesem Fall lagen die Werte des Luftdurchgangs nach der künstlichen Alterung meist unter den Werten der neuen Produkte, d.h. der gemessene Luftvolumenstrom durch die Unterspannbahn wurde geringer und damit die Folie luftdichter. Eine Ausnahme bildete allerdings die UV-Belastung mit $66,2 \text{ MJ/m}^2$ bei $70 \text{ }^\circ\text{C}$.

6.5 Strukturanalytische Untersuchungen durch Röntgendiffraktometrie (XRD)

Die Untersuchung der gealterten Unterspannbahnen durch Röntgendiffraktometrie (XRD, siehe Abschnitt 5.5.5) diente der Verfolgung der strukturellen Alterungsvorgänge. Dabei war eine genaue Analyse der Veränderungen in der chemischen Struktur nicht Gegenstand und Ziel der Untersuchungen. Vielmehr sollte überprüft werden, ob sich die aus den physikalischen und mechanischen Prüfungen gewonnen Erkenntnisse auch durch Röntgendiffraktometrie verfolgen lassen.

Die Auswertung der röntgendiffraktometrischen Aufnahmen beschränkte sich daher auf die Betrachtung der Intensitätenänderung vor und nach den jeweiligen Belastungen. Dabei zeigt die Intensität I die Energie der abgebeugten Röntgenstrahlung an, die unterschiedlich hohe elektrische Impulse erzeugt und in cps (counts per second) aufgezeichnet werden. Je größer die Anzahl der Interferenz-Reflexionsebenen eines Materials, desto stärker wird die gemessene Intensität.

Vergleicht man Spektren der untersuchten Unterspannbahnen, konnten bei einigen Produkten gemeinsame Peaks festgestellt werden (siehe Abb. 6.5-1). Insbesondere die Folien C, D und E zeigten eine große Übereinstimmung bei Beugungswinkeln zwischen $2\theta \approx 15^\circ$ und 23° . Zur genaueren Analyse sind in Anhang C die Röntgenspektren der untersuchten Produkte einzeln aufgeführt.

Weiterhin besaßen die Bahnen E und F einen scharfen Reflex bei $2\theta \approx 34^\circ$. In einem Winkelbereich von $2\theta \approx 24^\circ$ bis 29° waren die Produkte B und F vergleichbar. Hier bestand lediglich ein Unterschied in der Intensität I der abgebeugten Röntgenstrahlung. Einen von allen anderen Unterspannbahnen abweichenden Spektrumsverlauf

zeigte Folie A. Die Unterschiede betrafen dabei nicht nur die Beugungswinkel $2q$ an denen die maximale Intensität I bestimmt wurde, sondern auch die Halbwertsbreite der Röntgenreflexe.

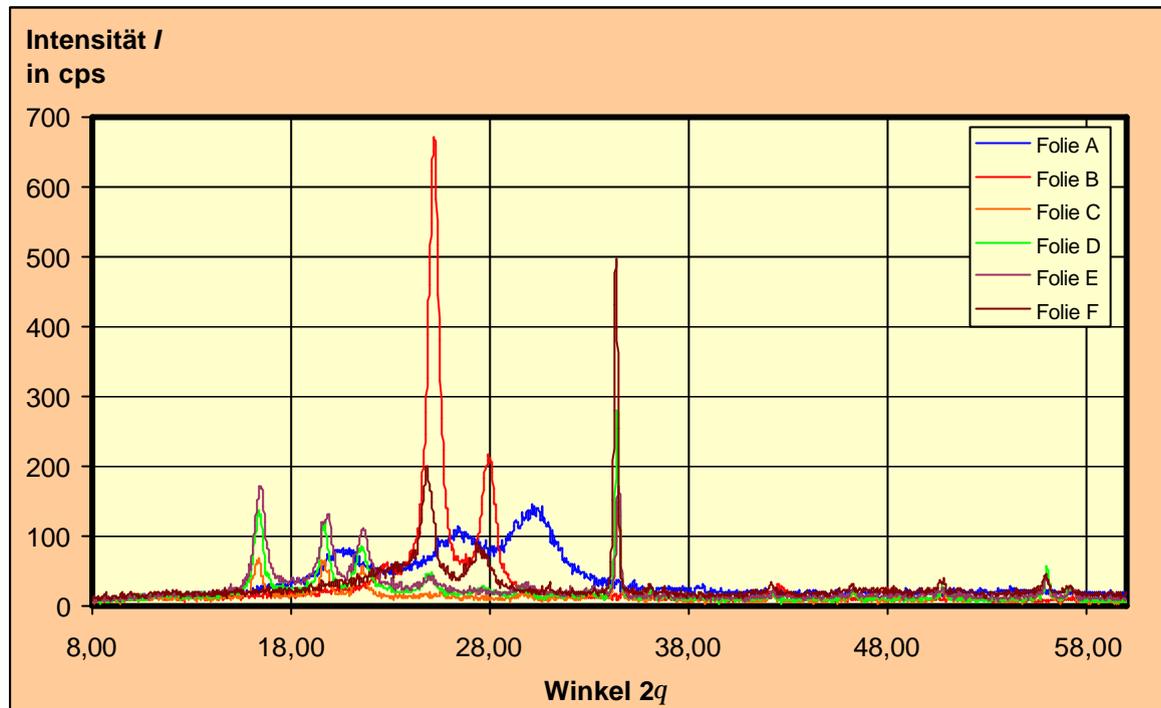


Abb. 6.5-1

Röntgen-Diffraktometerdiagramm der neuen Unterspannbahnen; einige Produkten wiesen gemeinsame Peaks auf. Die Folien C, D und E zeigten eine Übereinstimmung bei Beugungswinkeln zwischen $2q \approx 15^\circ$ und 23° . Der Spektrumverlauf des Produktes A unterschied sich deutlich von allen anderen. In Anhang C werden die Röntgenspektren der Produkte zur genaueren Analyse einzeln aufgeführt.

Wie die Auswertung der Röntgen-Diffraktometerdiagramme der neuen Produkte in Abbildung 6.5-1 zeigt, gibt es für jede Folie charakterisierende Peaks. Diese besitzen bei einigen Unterspannbahnen den gleichen Beugungswinkel $2q$ und unterscheiden sich lediglich durch die Intensität I der abgebeugten Röntgenstrahlung. Diese Gemeinsamkeiten sind auch nach der natürlichen und künstlichen Alterung zu erkennen.

Aus den Abbildungen 6.5-2 bis 6.5-5 ist zu entnehmen, dass sich bei den Unterspannbahnen C, D und E eine Zunahme der reflektierten Röntgenstrahlung einstellte. Dagegen nahm die Intensität I der Reflexionen bei den Folien A, B und F ab. Die Auswertung der maximal erreichten Röntgenintensitäten für einen bestimmten Beugungswinkel $2q$ zeigt, dass für die Folien A, B und F die Werte zum Teil stark abnahmen. Für die Unterspannbahnen C, D und E war eine Zunahme der Interferenz-Reflexionen in gleicher Größenordnung feststellbar (vgl. Tabelle 6.5-1).

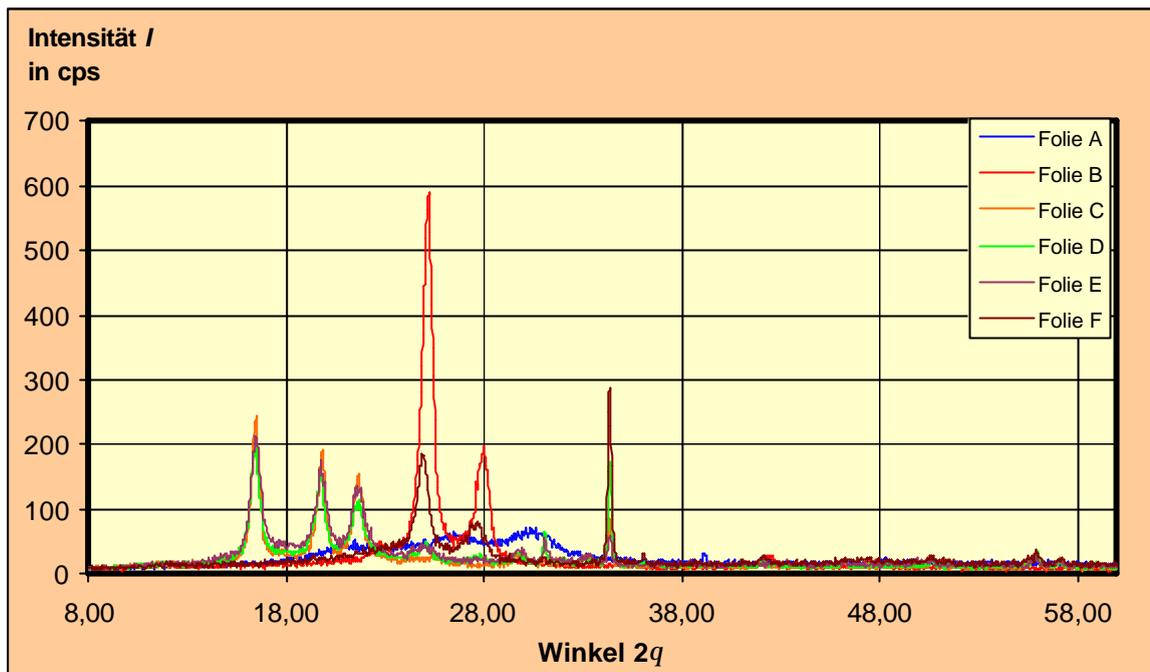


Abb. 6.5-2

Röntgen-Diffraktometerdiagramm 12 Monate frei bewitterter Unterspannbahnen; die Intensitäten der Folien C, D und E nahmen im Vergleich zum Neuprodukt zu, während sich die der Folien A, B und F verringerten. In Anhang C werden die Röntgenspektren der Produkte zur genaueren Analyse einzeln aufgeführt.

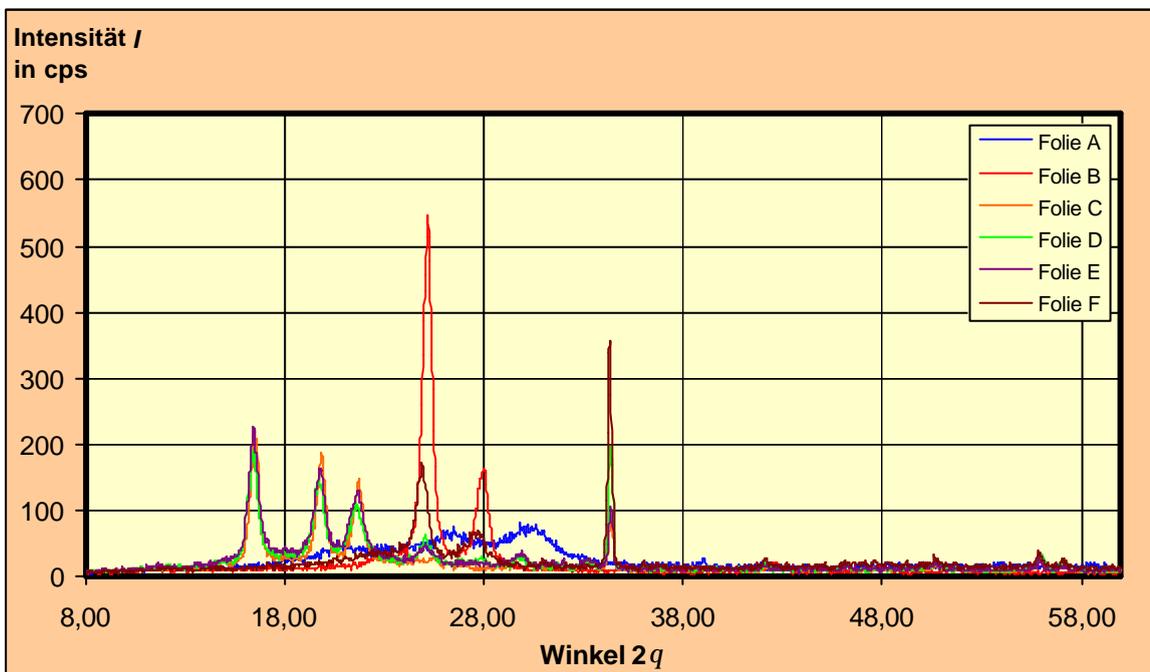
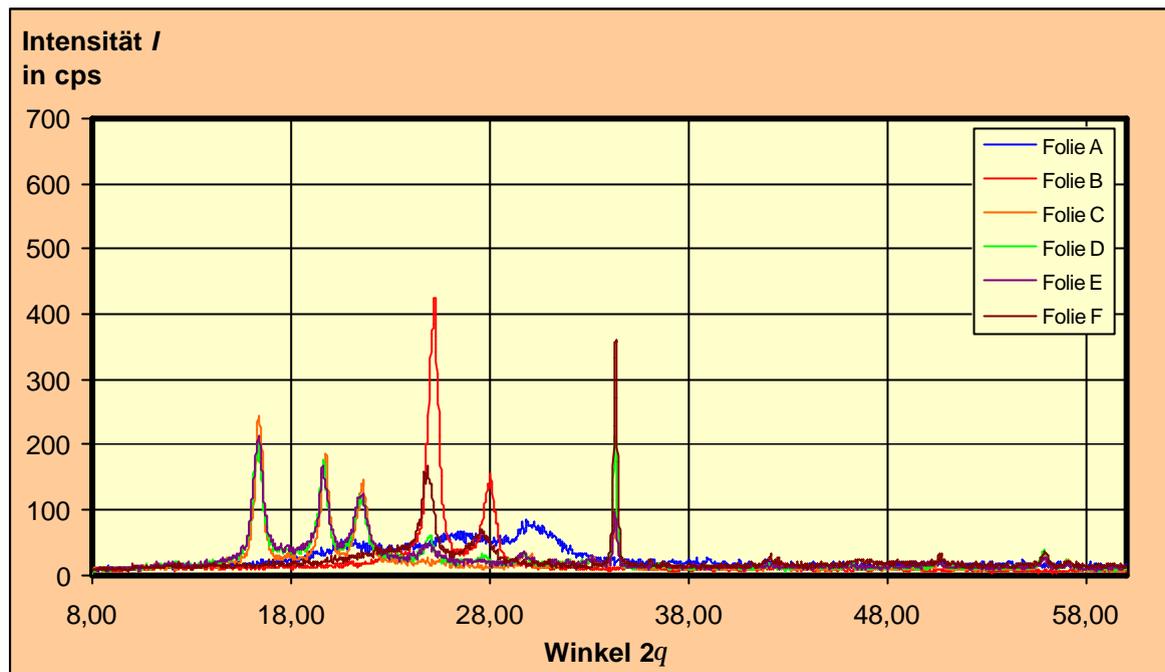
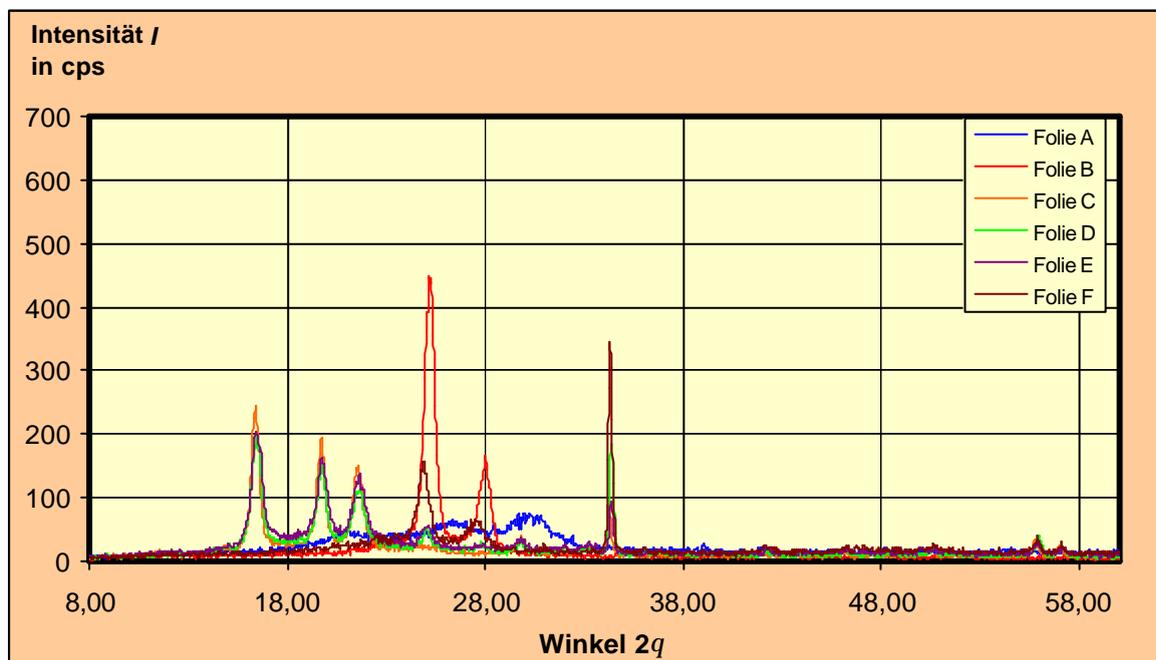


Abb. 6.5-3

Röntgen-Diffraktometerdiagramm wärmegelagerter Unterspannbahnen (80 °C / 4 Wo.); die Intensitäten der Folien C, D und E nahmen im Vergleich zum Neuprodukt zu, während sich die der Folien A, B und F verringerten. In Anhang C werden die Röntgenspektren der Produkte zur genaueren Analyse einzeln aufgeführt.

**Abb. 6.5-4**

Diffraktometerdiagramm UV-gealterter Unterspannbahnen ($66,2 \text{ MJ/m}^2$ bei 50 °C); die Intensitäten der Folien C, D und E nahmen im Vergleich zum Neuprodukt zu, während sich die der Folien A, B und F verringerten. In Anhang C werden die Röntgenspektren der Produkte zur genaueren Analyse einzeln aufgeführt.

**Abb. 6.5-5**

Diffraktometerdiagramm nach Norm gealterter Unterspannbahnen ($54,5 \text{ MJ/m}^2$ bei 50 °C sowie 70 °C für 90 Tage); die Intensitäten der Folien C, D und E nahmen im Vergleich zum Neuprodukt zu, während sich die der Folien A, B und F verringerten. In Anhang C werden die Röntgenspektren der Produkte zur genaueren Analyse einzeln aufgeführt.

Für die natürlich gealterten Unterspannbahnen A, B und F ergab sich in den ersten drei Monaten der Freibewitterung eine stärkere und in den Folgemonaten eine langsam und kontinuierlich verlaufende Abnahme der abgebeugten Röntgenintensität (bei Produkt B nahm diese nach 12 Monaten wieder stark zu). Umgekehrt verhielten sich die Folien C, D und E. Hier folgte der starken Zunahme der Reflexionen in der Anfangsphase der natürlichen Alterung ein langsamer Rückgang bei fortdauernder Freibewitterung.

Tabelle 6.5-1

Maximal erreichte Intensitäten I neuer sowie natürlich und künstlich gealterter Unterspannbahnen (in cps)

Folie	Neu	natürlich gealtert				künstlich gealtert		
		3 Monate	6 Monate	9 Monate	12 Monate	Wärme 80°C/4 Wo.	UV 66,2 MJ/m ² (50 °C)	Norm
A	147	84	74	68	72	83	84	76
B	673	496	428	438	588	547	424	447
C	63	258	265	221	242	221	243	245
D	133	202	197	179	193	196	214	196
E	157	239	234	214	215	228	214	205
F	496	319	319	291	286	355	359	344

Nach der künstlichen Alterung aus Wärme- oder UV-Belastung bzw. deren Kombination (Normversuch) stellte sich für das jeweils betrachtete Produkt ein nahezu identisches Spektrum ein.

In den folgenden Abbildungen 6.5-6 bis 6.5-9 sind die Intensitätsdifferenzen ΔI zwischen den neuen und den natürlich bzw. künstlich gealterter Unterspannbahnen aufgezeigt. Negative Intensitäten bedeuten dabei eine Zunahme der reflektierten Röntgenstrahlung im Vergleich zum neuen Produkt.

Dies ist insbesondere bei der Folie C feststellbar, die bei Beugungswinkeln zwischen $2q \approx 15^\circ$ und 23° deutlich gestiegene Intensitäten aufwies. Außer den veränderten Intensitäten zeigen die Spektren der Unterspannbahnen nach den Alterungsvorgängen keine weiteren Veränderungen (z.B. in Form von veränderten Halbwertsbreiten oder zusätzlichen Peaks).

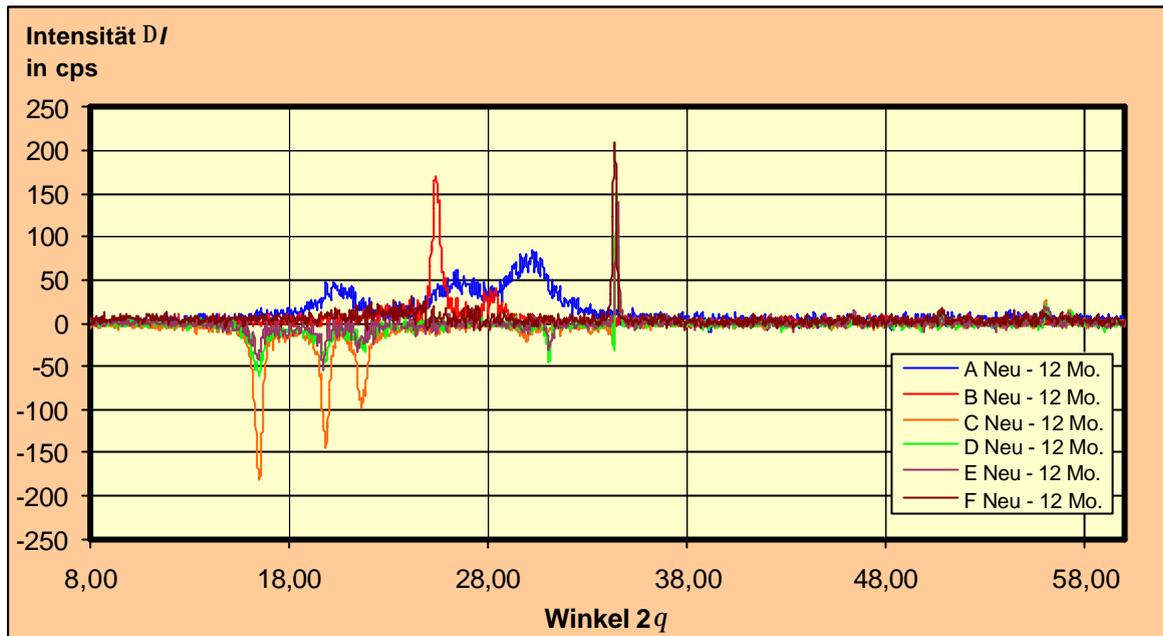


Abb. 6.5-6

Differenz der Intensitäten ΔI neuer und frei bewitterten Unterspannbahnen (12 Monate); die negativen Werte ΔI bedeuten eine Zunahme der Intensitäten (Folien C, D und E), während die positiven Werte ΔI der Produkte A, B und F eine Abnahme der Intensitäten beschreiben.

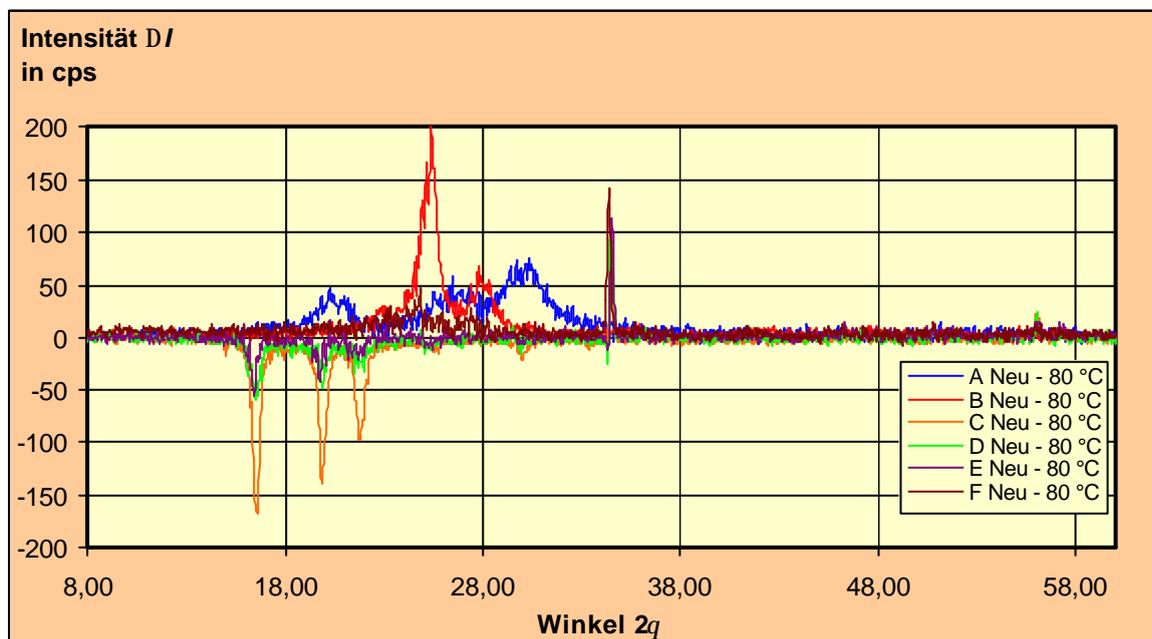


Abb. 6.5-7

Differenz der Intensitäten ΔI neuer und wärmegelagerter Unterspannbahnen (80°C/4 Wo.); die negativen Werte ΔI bedeuten eine Zunahme der Intensitäten (Folien C, D und E), während die positiven Werte ΔI der Produkte A, B und F eine Abnahme der Intensitäten beschreiben.

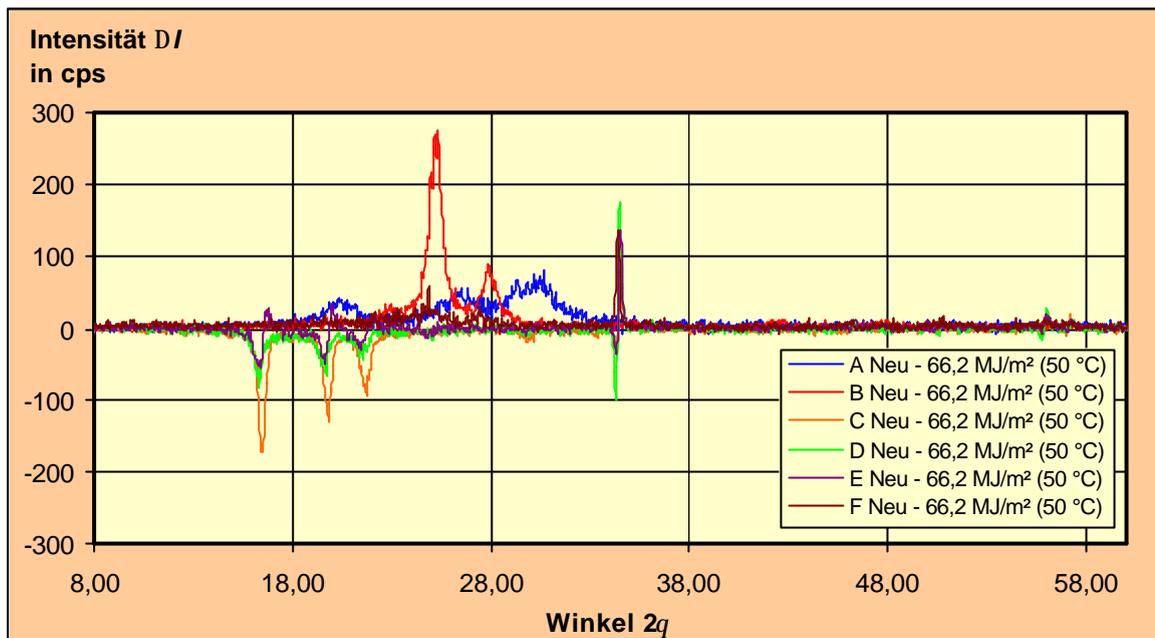


Abb. 6.5-8
 Differenz der Intensitäten ΔI neuer und UV-gealterter Unterspannbahnen; die negativen Werte ΔI bedeuten eine Zunahme der Intensitäten (Folien C, D und E), während die positiven Werte ΔI der Produkte A, B und F eine Abnahme der Intensitäten beschreiben.

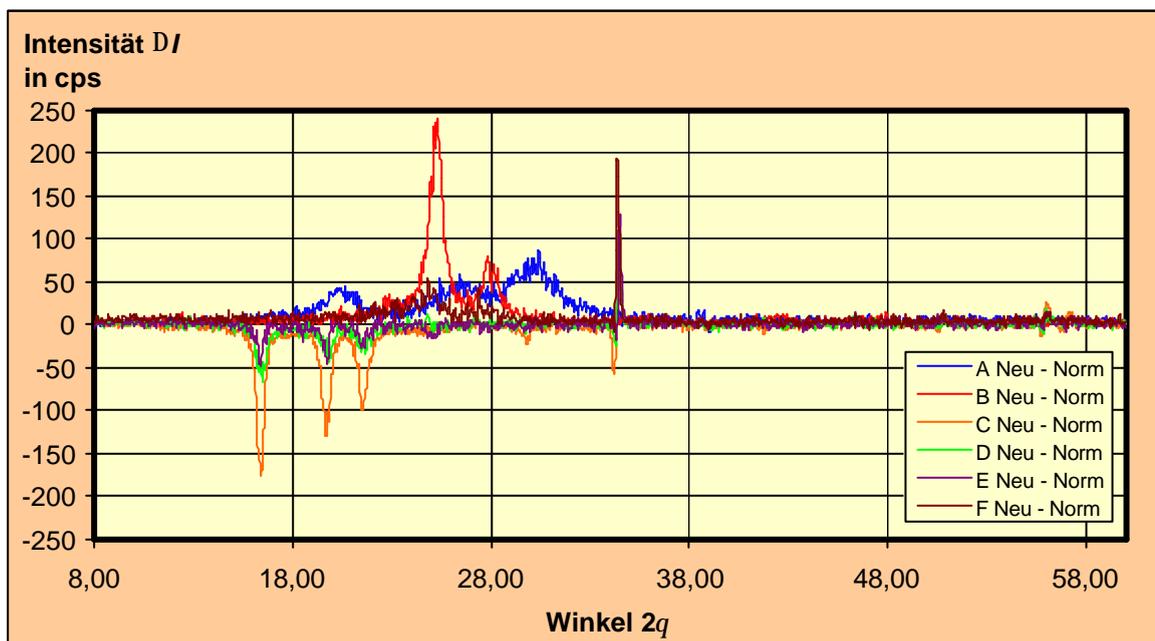


Abb. 6.5-9
 Differenz der Intensitäten ΔI neuer und nach Norm gealterter Unterspannbahnen; die negativen Werte ΔI bedeuten eine Zunahme der Intensitäten (Folien C, D und E), während die positiven Werte ΔI der Produkte A, B und F eine Abnahme der Intensitäten beschreiben.

6.6 Vergleich der Ergebnisse aus den unterschiedlichen Eigenschaftsprüfungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Prüfungen an diffusions-offenen Unterspannbahnen gegenübergestellt. Die dabei durchgeführten Untersuchungen umfassten neben den so genannten Durchgangbestimmungen (Wasser-, Luft- und Wasserdampfdiffusionsdurchgang) auch die mechanische Ermittlung des Zug-Dehnungsverhaltens. Die Auswertung der Versuchsergebnisse hat auch zum Ziel, Aussagen zum Kristallinitätsgrad der Unterspannbahnen vornehmen zu können. Die auf diese Weise gewonnenen Erkenntnisse werden anschließend mit den Resultaten der röntgendiffraktometrischen Aufnahmen verglichen.

Bereits in den Kapiteln 2 und 3 ist auf die Zusammenhänge zwischen Kristallinitätsgrad und bestimmten Eigenschaftsmerkmalen der Folien eingegangen worden. Aus der Abbildung 2.3.3-1 lässt sich unter anderem entnehmen, wie für ein Polyethylen die Dichte mit dem Kristallinitätsgrad ansteigt. Ein Merkmal, das auch für PP zutrifft.

Mit zunehmender Dichte wird auch der Durchgang von Medien (z.B. Luft, Wasser, Wasserdampf) durch die Unterspannbahnen erschwert. Es werden amorphe Bereiche schneller durchwandert als kristalline. Außerdem nimmt mit steigender Dichte bzw. erhöhtem Kristallinitätsgrad auch die Zugfestigkeit zu.

Neben den Fragen der Kristallinität ist für die Untersuchungen des Luftdurchgangs ebenfalls von Interesse, ob mit der Wasserdruckhöhe korrespondierende Ergebnisse beobachtet werden können. Nimmt mit zunehmendem Luftdurchgang die Wasserdruckhöhe ab, deutet dies auf einen Rückgang der Kristallinität der Produkte. In diesem Fall muss auch die Zugfestigkeit der Folien zurückgehen.

Dem Vergleich zwischen Widerstand gegen Wasserdurchgang, Luftdichtigkeit und Zugfestigkeit sollen weiterhin die Ergebnisse der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke gegenübergestellt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich bei der s_d -Wert Bestimmung um die Messung des Feuchtetransports durch Wasserdampfdiffusion aufgrund von Konzentrationsunterschieden handelt. Im Gegensatz zu den anderen beiden Prüfungen werden durch die Diffusion keine mechanischen Kräfte frei.

In Tabelle 6.6-1 werden die Ergebnisse der Eigenschaftsprüfungen nach den verschiedenen Belastungen zusammengefasst. Dabei bedeutet das + bzw. – zu- bzw. abnehmende Werte der jeweiligen Materialeigenschaft. Treten nur unwesentliche

6 Versuchsergebnisse aus natürlicher und künstlicher Alterung

Veränderungen auf, wird dies in der Tabelle durch O gekennzeichnet. Es wird darauf hingewiesen, dass ein abnehmender s_d -Wert einen geringeren Widerstand gegen Wasserdampfdiffusion bedeutet und somit positiv einzustufen ist. Gleiches gilt für den Luftdurchgang, bei dem kleiner werdende Werte eine Verbesserung der Luftdichtigkeit der Folie anzeigen. Dagegen bedeuten kleiner werdende Ergebnisse der Wasserdruckhöhe und der Zugkraft sich verschlechternde Materialeigenschaften.

Tabelle 6.6-1

Zusammenfassung der Ergebnisse der Eigenschaftsprüfungen

Folie	Belastung	Prüfung							
		h in m		s_d in m		s in N/50mm		v_L in m^3/m^2h	
		+	-	+	-	+	-	+	-
A	Natürlich								
	Freibewitterung		X	X			X	X	
	Künstlich								
	Wärmelagerung								
	40 °C / 4 Wo.	X		X			O		O
	60 °C / 4 Wo.	X		X			O		O
	80 °C / 4 Wo.	X		X				X	O
	UV-Lagerung								
	54,5 MJ/m ² (Norm)	X		X				X	
	66,2 MJ/m ² (50 °C)	X		X				X	
	66,2 MJ/m ² (70 °C)		X	X				X	X
	136,4 MJ/m ² (50 °C)		X	X				X	X

Folie	Belastung	Prüfung							
		h in m		s_d in m		s in N/50mm		v_L in m^3/m^2h	
		+	-	+	-	+	-	+	-
B	Natürlich								
	Freibewitterung		O		O			X	O
	Künstlich								
	Wärmelagerung								
	40 °C / 4 Wo.		O		O			X	
	60 °C / 4 Wo.		O		O			X	
	80 °C / 4 Wo.			X		O		X	
	UV-Lagerung								
	54,5 MJ/m ² (Norm)		O		O			X	X
	66,2 MJ/m ² (50 °C)		O		O			X	X
	66,2 MJ/m ² (70 °C)		O		O			X	
	136,4 MJ/m ² (50 °C)		O		O			X	X

Tabelle 6.6-1 (Fortsetzung)

Zusammenfassung der Ergebnisse der Eigenschaftsprüfungen

Folie	Belastung	Prüfung							
		h in m		s _d in m		s in N/50mm		v _L in m ³ /m ² h	
		+	-	+	-	+	-	+	-
C	Natürlich								
	Freibewitterung		X		X		X	X	
	Künstlich								
	Wärmelagerung								
	40 °C / 4 Wo.	X			O		O		O
	60 °C / 4 Wo.	X			O		O		O
	80 °C / 4 Wo.	X			O		O		O
	UV-Lagerung								
	54,5 MJ/m ² (Norm)		X		O		X	X	
	66,2 MJ/m ² (50 °C)		X		X		X	X	
	66,2 MJ/m ² (70 °C)		X		X		X	X	
	136,4 MJ/m ² (50 °C)		X		X		X	X	

Folie	Belastung	Prüfung							
		h in m		s _d in m		s in N/50mm		v _L in m ³ /m ² h	
		+	-	+	-	+	-	+	-
D	Natürlich								
	Freibewitterung		X		X		X	X	
	Künstlich								
	Wärmelagerung								
	40 °C / 4 Wo.	X			O		O		X
	60 °C / 4 Wo.	X			O		O		X
	80 °C / 4 Wo.	X			O		O		X
	UV-Lagerung								
	54,5 MJ/m ² (Norm)		O		O		X		X
	66,2 MJ/m ² (50 °C)		O		X		X		X
	66,2 MJ/m ² (70 °C)		X		X		X	X	
	136,4 MJ/m ² (50 °C)		X		O		X		X

Folie	Belastung	Prüfung							
		h in m		s _d in m		s in N/50mm		v _L in m ³ /m ² h	
		+	-	+	-	+	-	+	-
E	Natürlich								
	Freibewitterung		X		X		X	X	
	Künstlich								
	Wärmelagerung								
	40 °C / 4 Wo.	X			O		O		O
	60 °C / 4 Wo.	X			O		O		X
	80 °C / 4 Wo.	X			O		O		O
	UV-Lagerung								
	54,5 MJ/m ² (Norm)		X		O		X		X
	66,2 MJ/m ² (50 °C)	X			X		X		O
	66,2 MJ/m ² (70 °C)	X			O		X	X	
	136,4 MJ/m ² (50 °C)	X			O		X	X	

Tabelle 6.6-1 (Fortsetzung)

Zusammenfassung der Ergebnisse der Eigenschaftsprüfungen

Folie	Belastung	Prüfung							
		h in m		s _d in m		s in N/50mm		v _L in m ³ /m ² h	
		+	-	+	-	+	-	+	-
F	Natürlich								
	Freibewitterung		X		X		X	X	
	Künstlich								
	Wärmelagerung								
	40 °C / 4 Wo.	X		X		O		X	
	60 °C / 4 Wo.	X		X		O		X	
	80 °C / 4 Wo.	X		X		O		X	
	UV-Lagerung								
	54,5 MJ/m ² (Norm)	X		X		X		X	
	66,2 MJ/m ² (50 °C)	X		X			X	X	
	66,2 MJ/m ² (70 °C)	X		X		X		X	
	136,4 MJ/m ² (50 °C)	X			X	X		X	

Betrachtet man die Resultate für die einzelnen Unterspannbahnen in Tabelle 6.6-1, ist insbesondere für Folie C ein Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Wasserdruckhöhe und dem Luftdurchgang zu erkennen. Die nahezu auf Null abgesunkene Wasserdruckhöhe nach einer 3-monatigen Freibewitterung bewirkte auf der anderen Seite einen stark ansteigenden Luftdurchgang. Gleichzeitig nahm der Widerstand gegen Wasserdampfdiffusion deutlich ab, die Folie wurde diffusionsoffener. Dies deutet auf eine zurückgehende Kristallinität, was durch die sich verringern- de Zugfestigkeit bestätigt wird.

Eine ähnlich gute Übereinstimmung ergab sich für die Folie E. In diesem Fall lag die Wasserdruckhöhe nach 9 Monaten bei nur 21 cm, während gleichzeitig ein deutlich erhöhter Luftvolumenstrom festgestellt wurde. Auch in diesem Fall nahm die Zugfestigkeit ab. Weiterhin fallen die Werte der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke unter 0,02 m.

Die Unterspannbahn D verzeichnete ebenfalls bereits nach 3 Monaten Freibewitterung einen deutlichen Rückgang der Wasserdruckhöhe. Dabei blieb die erreichte Wasserdruckhöhe über 100 cm und unterschritt diesen Wert erst nach 12 Monaten. Zu diesem Zeitpunkt stellte sich auch ein deutlich gestiegener Luftvolumenstrom ein. Dies deutet ebenfalls auf eine verringerte Kristallinität hin. Für den s_d-Wert (zunächst leichter Anstieg und anschließend langsamer und gleichmäßiger Abfall) konnte kein Zusammenhang zwischen diesen Größen hergestellt werden.

Insgesamt ist festzustellen, dass ein Zusammenhang zwischen dem Widerstand gegen Wasserdurchgang und Luftdurchlässigkeit nicht hergestellt werden kann,

wenn die erreichten Wasserdruckhöhen über 100 cm liegen. In diesem Fall waren die Werte des Luftvolumenstroms bei einer aufgeprägten Druckdifferenz von $\Delta p = 50$ Pa kaum messbar und lagen zum Teil deutlich unter $0,10 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ (Ausnahme: Folie B).

Dieses Ergebnis zeigt sich auch nach der künstlichen Alterung. Weder nach der Wärmelagerung noch nach der UV-Bestrahlung haben die Wasserdruckhöhen in dem Maße abgenommen, dass sie weniger als 100 cm betragen. Die gemessenen Luftvolumenströme waren in diesen Fällen sehr gering. Lediglich für das Produkt C ergab die UV-Bestrahlung einen sehr starken Rückgang der Höhe der Wassersäule. Gleichzeitig kam es zu einem starken Anstieg des Luftdurchgangs.

Für die künstlichen Alterungsversuche lassen sich vor allem für die Bahnen C, D und E Gemeinsamkeiten erkennen. Diese korrelieren allerdings nicht mit den Ergebnissen der natürlich bewitterten Folien. Insbesondere für die durchgeführten Wärmebelastungen verhielten sich die Produkte konträr zu den Ergebnissen nach der natürlichen Alterung (vgl. Tabelle 6.6-1). Dabei ist es auch nicht möglich, die einzelnen Versuche untereinander zu vergleichen und damit Angaben zur Kristallinität zu machen. So nahm die Wasserdruckhöhe bei allen Folien zu, während der Luftvolumenstrom im Vergleich zum neuen Produkt unverändert blieb. Dies gilt gleichermaßen für den s_d -Wert und die Zugfestigkeit, die sich durch die Wärmebeanspruchungen nicht veränderten.

Einige der durchgeführten UV-Belastungen können mit der natürlichen Alterung verglichen werden. Insbesondere führte die hohe UV-Bestrahlung mit $136,5 \text{ MJ/m}^2$ zu einem starken Abfall der Wasserdruckhöhe bei den Folien C und D. Ein Ergebnis, das bei Produkt E nach der Normbelastung eintrat. Auch bei der Zugfestigkeit und beim s_d -Wert ergab die UV-Bestrahlung ähnliche Resultate wie die Freibewitterung.

Die Vergleichbarkeit der Unterspannbahnen C, D und E ist auch durch die röntgen-diffraktometrischen Aufnahmen nachweisbar (vgl. Abschnitt 6.5). Dabei zeigten die Spektren der untersuchten Folien eine Intensitätszunahme an. Diese bewegte sich unabhängig von den aufgetragenen Belastungen (natürlich oder künstlich) in einer vergleichbaren Größenordnung. Die ansteigende Intensität der Interferenz-Röntgenstrahlung deutete auf eine zunehmende Kristallisation im mikro-kristallinen Bereich der Folien hin. Dies widerspricht den Ergebnissen der physikalischen und mechanischen Prüfungen nach einer Freibewitterung. Danach ergab sich eine Abnahme des Kristallisationsgrades der Bahnen.

Im Vergleich zu den anderen Produkten stellte sich durch die Folie B ein deutlich höherer Luftdurchgang ein. Dies gilt gleichermaßen für die natürliche als auch für die künstliche Alterung. Dabei ist zu beachten, dass das Ausgangsprodukt B die geringste Wasserdruckhöhe aller geprüften Unterspannbahnen aufwies. Somit stellte sich auch in diesem Fall ein Zusammenhang zwischen Luftdurchgang und Wasserdruckhöhe ein. Betrachtet man die Entwicklung der Eigenschaften während der natürlichen und den verschiedenen künstlichen Belastungen, zeigte sich die Folie B bei nahezu allen unverändert.

Eine geringe Vergleichbarkeit der durchgeführten Versuche ergab sich für das Produkt A. Die Wasserdruckhöhe blieb während der gesamten Freibewitterungszeit deutlich über 100 cm. Wie bereits für andere Produkte festgestellt wurde, ist damit kein Vergleich mit der Luftdurchlässigkeit möglich. Die Vermutung einer Verringerung der Kristallinität aufgrund einer abnehmenden Zugfestigkeit lässt sich durch den stetig ansteigenden s_d -Wert nicht bestätigen. Schlecht vergleichbar sind auch die Ergebnisse der künstlichen Alterung. Die Wärmelagerung führte zu einer Zunahme der Wasserdruckhöhe bei unverändertem Luftdurchgang. Gleichzeitig nahm die Zugfestigkeit zu.

Die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke nahm vergleichbar den Ergebnissen der Freibewitterung zu. Geringe Bestrahlungsstärken bei gleichzeitig niedrigen Temperaturen hatten eine Zunahme der Wasserdruckhöhe zur Folge. Dagegen kam es zu einem Rückgang der Werte bei hoher Temperatur und Strahlung. Weiterhin kam es zu einer leichten Zunahme des Luftdurchgangs bei einer UV-Bestrahlung unter hoher Temperatur.

Bei natürlicher Alterung kann für die Unterspannbahn F eine Korrelation zwischen der langsam und kontinuierlich verlaufenden Abnahme des Widerstandes gegen Wasserdurchgang und der stetigen Zunahme des Luftdurchgangs hergestellt werden. Daraus folgt eine abnehmende Kristallinität der Folie, was durch die verringerte Zugfestigkeit bestätigt wird. Ein Vergleich mit der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke ist nicht möglich, da dieser Wert stark schwankte.

Ebenfalls nicht vergleichbar sind die Ergebnisse aus den Versuchen der künstlichen Alterung. Nach den Wärme- und UV-Belastungen kam es zu einem starken Anstieg der Wasserdruckhöhe. Dies kann nicht durch eine Erhöhung der Kristallinität der Bahn begründet werden, da weder der gemessene Luftvolumenstrom zurückgeht, noch die Zugkraft zunimmt.

Für die Unterspannbahnen A, B und F zeigten die röntgendiffraktometrischen Aufnahmen einen Rückgang der Mikro-Kristallinität. Die Intensitäten der Interferenz-Röntgenstrahlung waren nach allen Belastungen reduziert. Demzufolge sollten die Wasserdruckhöhe und der s_d -Wert ab- und die Luftdurchlässigkeit zunehmen. Dies war nur für Einzelfälle zu bestätigen. Insgesamt ergab sich nur mit der Zugfestigkeit eine gute Übereinstimmung. Diese nahm bei allen Produkten ab, was auf eine abnehmende Kristallinität der Folien hindeutet.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Verfolgung der Kristallphasen nicht bei allen Unterspannbahnen gleichartig ist. Dies kann auf die unterschiedlichen Herstellungsverfahren und Materialzusammensetzungen der Folien zurückgeführt werden.

Entgegen anderer Vermutungen ist eine Verfolgung des mikrokristallinen Verhaltens durch XRD kein Maßstab für den baupraktischen Alterungsvorgang von diffusionsoffenen Unterspannbahnen. Die festgestellten Kristallbildungen erfassen nur submikroskopische Bereiche, weshalb sie sich auf die bauphysikalischen und mechanischen Eigenschaften der Kunststoff-Folien nicht auswirken.

7 Mathematische Auswertung der Versuchsergebnisse

Die mathematische Auswertung der Versuchsergebnisse dient der Einstufung des Materialverhaltens diffusionsoffener Unterspannbahnen. Die Schwierigkeiten die sich dabei ergeben, liegen in den physikalischen und chemischen Eigenschaften der Folien, die in den Versuchen ein sehr unterschiedliches Alterungsverhalten gezeigt haben. Eine mathematische Formel zur Beschreibung der Veränderung der Materialeigenschaften muss die verschiedenen Untersuchungsergebnisse der einzelnen Produkte erfassen.

Dazu ist es erforderlich, die in Kapitel 6 beschriebenen Veränderungen der Materialeigenschaften in Abhängigkeit von der Zeit darzustellen. Dies kann mit den Untersuchungsergebnissen der Freibewitterungsversuche erfolgen, da diese in regelmäßigen Intervallen von 3 Monaten bestimmt wurden. Die für die Materialeigenschaften gefundenen mathematischen Formeln können anschließend auf die künstlichen Alterungsversuche angewendet werden. Lässt sich keine Übereinstimmung zwischen natürlicher und künstlicher Alterung feststellen, müssen die Randbedingungen der Laborversuche überprüft werden.

7.1 Allgemeine Ansätze zur Beschreibung von Abbaumechanismen

Experimentell gesammelte Daten können ausgewertet werden, indem verschiedene mathematische Ansätze auf eine Übereinstimmung mit den Untersuchungsergebnissen überprüft werden. Dazu werden zu Beginn meist die in Abbildung 7.1-1 dargestellten Kurven und die den Kurven zu Grunde liegenden Formeln herangezogen. Mit diesen, auf empirische Weise gefundenen Rechenvorschriften, lassen sich in einigen Fällen bereits recht gute Ergebnisse erzielen.

Die Vorhersage eines Materialverhaltens ist von Vorteil, wenn die gefundene Gleichung auch durch theoretische Überlegungen belegt werden kann. Möchte man die Veränderungen der Unterspannbahnen zu einem bestimmten Zeitpunkt vorhersagen, so kann dies zunächst allgemein durch folgenden Ansatz erfolgen:

$$\frac{dE_{\text{USB}}}{dt} = k \cdot f(t)^n \quad (7.1-1)$$

Nach dieser Gleichung ist die Veränderung der Folieneigenschaft dE_{USB} in einem sehr kleinem Zeitintervall dt (als momentane Veränderungsrate) proportional zu der Folieneigenschaft $f(t)$ zu diesem Zeitpunkt, wobei n einen beliebigen Exponenten darstellt und k eine Konstante.

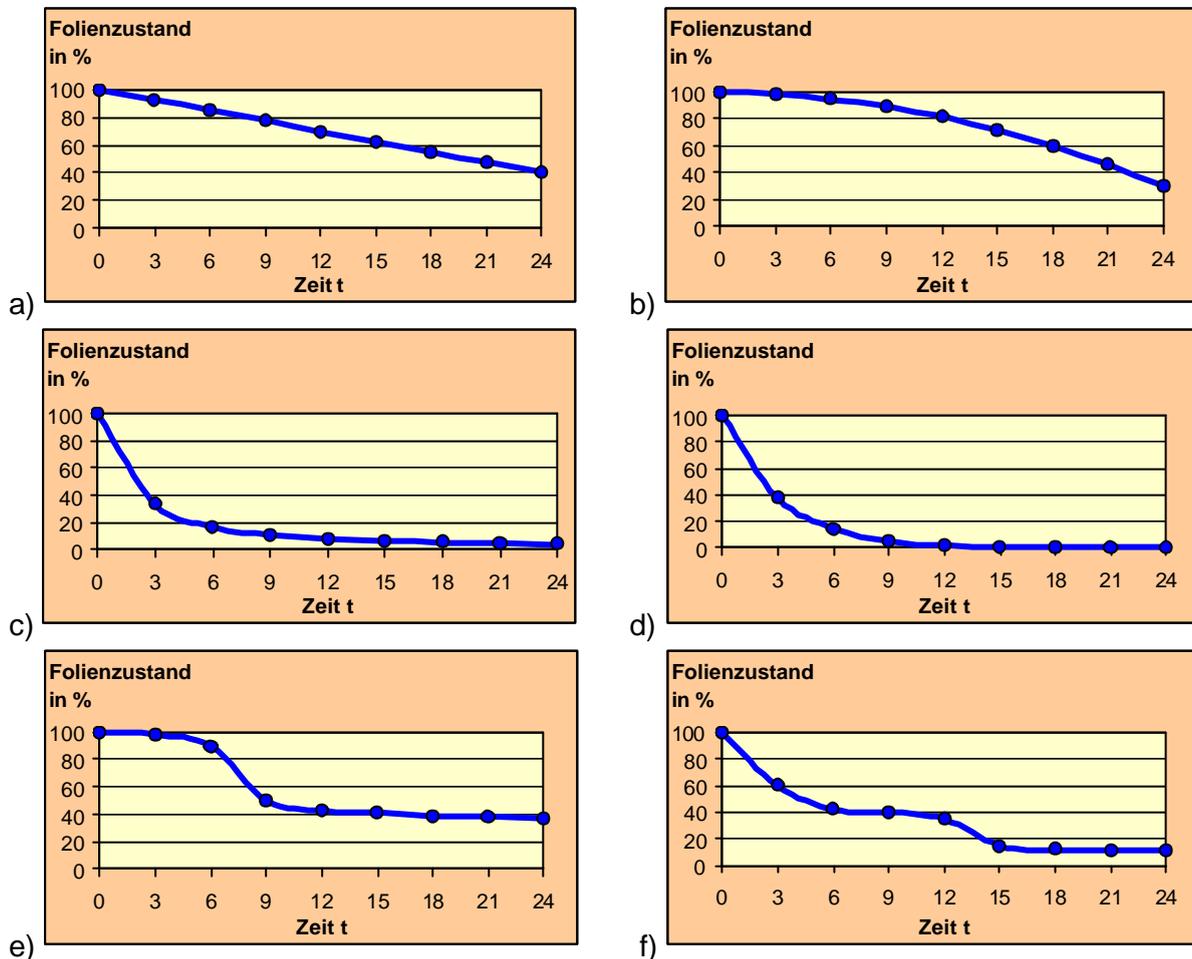


Abb.7.1-1

Mögliche Kurvenverläufe zur mathematischen Beschreibung des Alterungsverhaltens der untersuchten diffusionsoffenen Unterspannbahnen

Findet die Veränderung der Materialeigenschaften stetig statt, ergibt sich in Gleichung (7.1-1) der Exponent n zu Null und der Ausdruck $f(t)^n = f(t)^0 = 1$. Dies bedeutet, die Änderung der Eigenschaft ist mit der Zeit konstant:

$$\frac{dE_{\text{USB}}}{dt} = k \tag{7.1-2}$$

Stellt man das Ergebnis dieser Gleichung grafisch dar, ergibt sich eine Gerade mit der Steigung κ (siehe Abbildung 7.1-1a). Die Integration von Gl. (7.1-2) ergibt:

$$E_{\text{USB}} = E_{0,\text{USB}} - k \cdot t \quad (7.1-3)$$

Dabei stellt $E_{0,\text{USB}}$ die Eigenschaft der Materialprobe zum Zeitpunkt $t = 0$ dar.

Sind die Veränderungen der Materialeigenschaften über die Zeit nicht konstant, sondern von den Veränderungen der Materialeigenschaft zu einem bestimmten Zeitpunkt abhängig, ergibt sich der Exponent n in Gl. (7.1-1) zu eins:

$$\frac{dE_{\text{USB}}}{dt} = k \cdot f(t) \quad (7.1-4)$$

Dabei nimmt die Funktion $f(t)$ je nach untersuchter Unterspannbahn und in Abhängigkeit der betrachteten Materialeigenschaft die Form an, die das Materialverhalten am besten beschreibt. So kann $f(t)$ eine Exponentialfunktion n -ten Grades oder auch eine e-Funktion sein.

7.2 Mathematische Bewertung der Folieneigenschaften nach dem Freibewitterungsversuch

Der folgende Abschnitt beschreibt die mathematische Bewertung der Folieneigenschaften nach einer natürlichen Alterung durch Freibewitterung. Wie die in Kapitel 6 dargestellten Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, verhalten sich die Produkte sehr unterschiedlich. Bei nur wenigen Folien ist eine gleichmäßige und kontinuierliche Alterung festzustellen. Vielmehr treten sämtliche in Abb. 7.1-1 dargestellten Kurvenverläufe auf.

Eine alle physikalischen und mechanischen Untersuchungen umfassende „Gesamtformel“ würde sich daher aus einer Kombination der in Abbildung 7.1-1 dargestellten Kurven ergeben. Die allgemeine Anwendbarkeit einer solchen Formel auf alle untersuchten Unterspannbahnen ist dabei aber fraglich.

Aus diesem Grund wird ein Ansatz gewählt, der die bessere Erfassung der zum Teil stark streuenden Versuchsergebnisse ermöglicht. Dazu werden Grenzwerte definiert, welche die Mindestgröße der von der Unterspannbahn verlangten Materialeigenschaften festlegen. Durch den Vergleich der Materialeigenschaften nach einer Alterung mit den Grenzwerten lassen sich anschließend so genannte „Alterungskennziffern d “ bestimmen.

7.2.1 Definition von Alterungskennziffern d

Wie bereits in Abschnitt 4.2 erläutert wurde, finden sich in der Produktnorm DIN EN 13 859-1 Anforderungen an die Materialeigenschaften von Unterspannbahnen. Allerdings verzichtet die Norm auf die Definition bestimmter Mindestanforderungen. Da solche Referenzwerte für eine Bewertung der Folieneigenschaften nach einer Alterung von entscheidender Bedeutung sind, werden im Folgenden Grenzwerte festgelegt. Deren Größe orientiert sich an in der Praxis zu erwartende Belastungen sowie in Normen festgelegten Richtwerten.

Mit Hilfe der Grenzwerte können „Alterungskennziffern d “ bestimmt werden, die der Kennzeichnung des prozentualen Zustands gegenüber der definierten Mindestmaterialeigenschaft dienen. Dabei bedeutet ein großes d keine oder nur geringfügige Abweichungen gegenüber dem Grenzwert, während bei $d = 0$ die untersuchte Folieneigenschaft versagt.

Betrachtet man zunächst den Widerstand gegen Wasserdurchgang, so simuliert die durchgeführte Prüfung eine frei hängende Unterspannbahn. Es soll sichergestellt werden, dass es bei einer eventuellen Wassersackbildung nicht zu einem Feuchtedurchtritt durch die Folie kommt. Dabei wird der Druck eines solchen Wassersacks nur wenigen cm Wassersäule entsprechen. Es ist nicht erforderlich, dass die Unterspannbahnen einer Wasserdruckhöhe von 10 m und mehr standhalten müssen. Aus diesem Grund wird der Grenzwert $h_{\text{grenz}} = 200$ cm festgelegt. Dieser Wert übersteigt die in der Prüfung gegen Wasserdurchgang nach DIN EN 1928 angesetzte Druckhöhe um das 10fache und bietet somit eine ausreichende Sicherheit.

Die Alterungskennziffer d_h lässt sich wie folgt ermitteln:

$$d_h = \frac{h}{h_{\text{grenz}}} = \frac{h}{200} \quad (7.2.1-1)$$

mit: h = Wasserdruckhöhe in cm

Für Werte der Wasserdruckhöhe von 200 cm kann eine 100 %ige Funktionserfüllung angesetzt werden. Die Alterungskennziffer d_h wird nach Gleichung (7.2.1-1) den Wert 1,0 (= 100 %) annehmen. Erreichen die geprüften Unterspannbahnen Wasserdruckhöhen über 200 cm, wird dies durch d_h -Werte größer 1,0 berücksichtigt. Fällt der Widerstand gegen Wasserdurchgang vollständig ab, versagt die Bahn in dieser Eigenschaft und auch d_h wird gleich Null.

Für die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d ist der anzusetzende Grenzwert bereits in DIN 4108-3 definiert. Dort gelten als diffusionsoffene Materialien Produkte mit einem s_d -Wert $\leq 0,5$ m. Wird für die durchgeführten Untersuchungen der von den Folien geforderte Wert auf 0,5 m festgelegt, bedeutet das Erreichen dieser Bemessungsgrenze eine Alterungskennziffer von $d_{sd} = 1,0$. Zur Verschärfung der Anforderung könnte auch ein Wert $s_d \leq 0,2$ m angesetzt werden, da dies nach DIN 68 800-2 für Konstruktionen ohne chemischen Holzschutz gefordert wird.

Die Alterungskennziffer d_{sd} für die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke kann wie folgt bestimmt werden:

$$d_{sd} = \left(\frac{s_d}{s_{d,grenz}} \right)^{-1} = \left(\frac{s_d}{0,5} \right)^{-1} \quad (7.2.1-2)$$

mit: s_d = wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke in m

Mit Gleichung 7.2.1-2 ergibt sich für diffusionsoffene Unterspannbahnen mit sehr kleinem s_d -Wert (z.B. $s_d \leq 0,1$ m) eine große Alterungskennziffer d_{sd} , die deutlich über 1,0 liegt. Für Folien mit einer wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke von mehr als 0,5 m werden die Anforderungen an diffusionsoffene Unterspannbahnen nicht mehr erfüllt. Da die Produkte mit der Überschreitung des Grenzwertes aber nicht vollständig versagen, nimmt die Alterungskennziffer mit zunehmendem s_d -Wert langsam ab. Erst bei sehr dampfdichten Folien mit wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicken von mehr als 100 m tritt ein nahezu vollständiges Versagen ein ($d_{sd} = 0$).

Das Zug-Dehnungsverhalten von Unterspannbahnen ist vor dem Hintergrund der mechanischen Belastungen, denen die Folien insbesondere während der Verlegung auf dem Dach und bis zur Fertigstellung der Dachdeckung ausgesetzt sind, von Bedeutung. Hinweise über die Größe der zu erwartenden Belastungen liegen allerdings nicht vor. Daher werden als Grenzwert der Zugkraft $s = 100$ N/50 mm angesetzt. Dieser Wert wird im Neuzustand von allen geprüften Unterspannbahnen erreicht. Dabei gilt, dass eine höhere Zugkraft günstiger für die Folieneigenschaft einzustufen ist. Aus diesem Grund folgt die Alterungskennziffer d_s zu:

$$d_s = \frac{s}{s_{grenz}} = \frac{s}{100} \quad (7.2.1-3)$$

mit: s = Folienzugkraft in N/50 mm

Liefern die Zugversuche Ergebnisse von mehr als 100 N/50 mm, ergibt sich die Alterungskennziffer d_σ nach Gleichung (7.2.1-3) zu Werten $> 1,0$ ($> 100\%$). Nimmt dagegen die Folienzugkraft ab und fällt unter den definierten Grenzwert, erfüllt die geprüfte Bahn diese Eigenschaft nicht mehr zu 100 % ($d_\sigma < 1,0$).

Ebenso wie bei der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke wird auch für den Luftdurchgang der obere Grenzwert in der Norm definiert. Materialien bei denen Luftvolumenströme von kleiner oder gleich $0,10 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ gemessen wurden gelten nach Norm als luftdicht. Je mehr dabei dieser Grenzwert unterschritten wird, desto luftdichter ist die Unterspannbahn. Dies soll durch entsprechende Alterungskennziffern berücksichtigt werden:

$$d_{vL} = \left(\frac{v_L}{v_{L,\text{grenz}}} \right)^{-1} = \left(\frac{v_L}{0,1} \right)^{-1} \quad (7.2.1-4)$$

mit: v_L = Luftvolumenstrom in $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$

Da die Luftdichtigkeit von Unterspannbahnen eine zusätzlich eingeführte Funktion ist, die aber für die eigentliche Aufgabe der Folien als zweite wasserableitende Ebene in Dachkonstruktionen nur geringe Bedeutung hat, führt das Überschreiten des oben definierten Grenzwertes zunächst nicht zum Versagen der Folie. Erst bei sehr großen Luftvolumenströmen nimmt die Alterungskennziffer d_{vL} den Wert Null an.

Die definierten Grenzen für die Materialeigenschaften und die sich daraus ergebenden Werte der Alterungskennziffern d sind in Tabelle 7.2.1-1 zusammengefasst.

Tabelle 7.2.1-1

Grenzwerte der Materialeigenschaften sowie die Alterungskennziffern d_x (mit $x = h$ bzw. s_d bzw. s bzw. v_L)

Alterungs- kennziffer d_x	Grenzwerte der Materialeigenschaften			
	Wasserdruck- höhe h in cm	s_d -Wert in m	Zugkraft s in N/50 mm	Luftdurchgang v_L in $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$
	$h_{\text{grenz}} = 200$	$s_{d,\text{grenz}} = 0,5$	$s_{\text{grenz}} = 100$	$v_{L,\text{grenz}} = 0,1$
$d_x > 1,0$	$h > 200$	$s_d < 0,5$	$s > 100$	$v_L < 0,1$
$d_x = 1,0$	$h = 200$	$s_d = 0,5$	$s = 100$	$v_L = 0,1$
$d_x < 1,0$	$h < 200$	$s_d > 0,5$	$s < 100$	$v_L > 0,1$

Werden die Alterungskennziffern der Gleichungen 7.2.1-1 bis 7.2.1-4 zusammengefasst, ergibt sich eine Alterungskennziffer d_t , welche die Kenngrößen aus den einzelnen Versuchen beschreibt. Dabei bringen in einer Versuchsserie kleiner werdende Alterungskennziffer d_t abnehmende Materialeigenschaften zum Ausdruck. Für die Bestimmung der Alterungskennziffer d_t folgt somit:

$$d_t = d_h \cdot d_{sd} \cdot d_\sigma \cdot d_{vL} \quad (7.2.1-5)$$

$$d_t = \frac{h}{h_{\text{grenz}}} \cdot \left(\frac{s_d}{s_{d,\text{grenz}}} \right)^{-1} \cdot \frac{s}{s_{\text{grenz}}} \cdot \left(\frac{v_L}{v_{L,\text{grenz}}} \right)^{-1} \quad (7.2.1-6)$$

Mit den Grenzwerten aus Tabelle 7.2-1 ergibt sich:

$$d_t = \frac{h}{200} \cdot \left(\frac{s_d}{0,5} \right)^{-1} \cdot \frac{s}{100} \cdot \left(\frac{v_L}{0,1} \right)^{-1} \quad (7.2.1-7)$$

Durch den Vergleich der aus den verschiedenen Versuchen ermittelten Alterungskennziffern d_t ist es möglich, Unterspannbahnen hinsichtlich ihrer Alterung zu bewerten. Nimmt beispielsweise die Alterungskennziffer d_t einer gealterten Folie im Vergleich zu d_0 (Alterungskennziffer eines neuen Produktes zum Zeitpunkt $t = 0$) ab, bedeutet dies eine Abnahme der Produkteigenschaften.

Die prozentuale Veränderung von d_t zu d_0 wird als so genannter „Alterungsfaktor a “ definiert (siehe Gleichung 7.2.1-8). Zur Beschreibung und Vorhersage des Alterungsverhaltens der Unterspannbahnen interessiert vor allem der Frühalterungsfaktor a_F , der sich auf die Veränderung der Folieneigenschaften nach einer 3monatigen Freibewitterung bezieht (Gleichung 7.2.1-9).

$$a = \left(1 - \frac{d_t}{d_0} \right) \cdot 100 \quad \text{in \%} \quad (7.2.1-8)$$

$$a_F = \left(1 - \frac{d_3}{d_0} \right) \cdot 100 \quad \text{in \%} \quad (7.2.1-9)$$

mit: a = Alterungsfaktor in %

a_F = Frühalterungsfaktor in %

d_t = Alterungskennziffer zum Zeitpunkt t in %

d_0 = Alterungskennziffer zum Zeitpunkt $t = 0$ in %

d_3 = Alterungskennziffer zum Zeitpunkt $t = 3$ Monate in %

Mit Hilfe des Alterungsfaktors a kann das Langzeitverhalten der Materialeigenschaften von diffusionsoffenen Unterspannbahnen abgeschätzt werden. Besitzt zum Beispiel eine Folie einen großen Alterungsfaktor, bedeutet dies eine starke Abnahme der Materialeigenschaften des gealterten Produkts. Aufgrund eines schnellen Abfalls der Folieneigenschaften zu Beginn der Nutzung, werden zu einem späteren Zeitpunkt kaum noch Änderungen eintreten. Die Alterung folgt den in Abbildung 7.1-1 c) und d) dargestellten Kurven.

Demgegenüber bedeutet ein kleiner Alterungsfaktor a , dass innerhalb der ersten Monate Freibewitterung kaum Veränderungen der Eigenschaften der Unterspannbahn eingetreten sind. Es erfolgt eine langsame und gleichmäßige Alterung mit linearem Verlauf gemäß Abbildung 7.1-1 a). Insgesamt wird sich ein Alterungsverhalten der Unterspannbahnen einstellen, dass zwischen den beiden Extremwerten $a \rightarrow 0$ und $a \rightarrow 1$ liegt (siehe Abbildung 7.2.1-1).

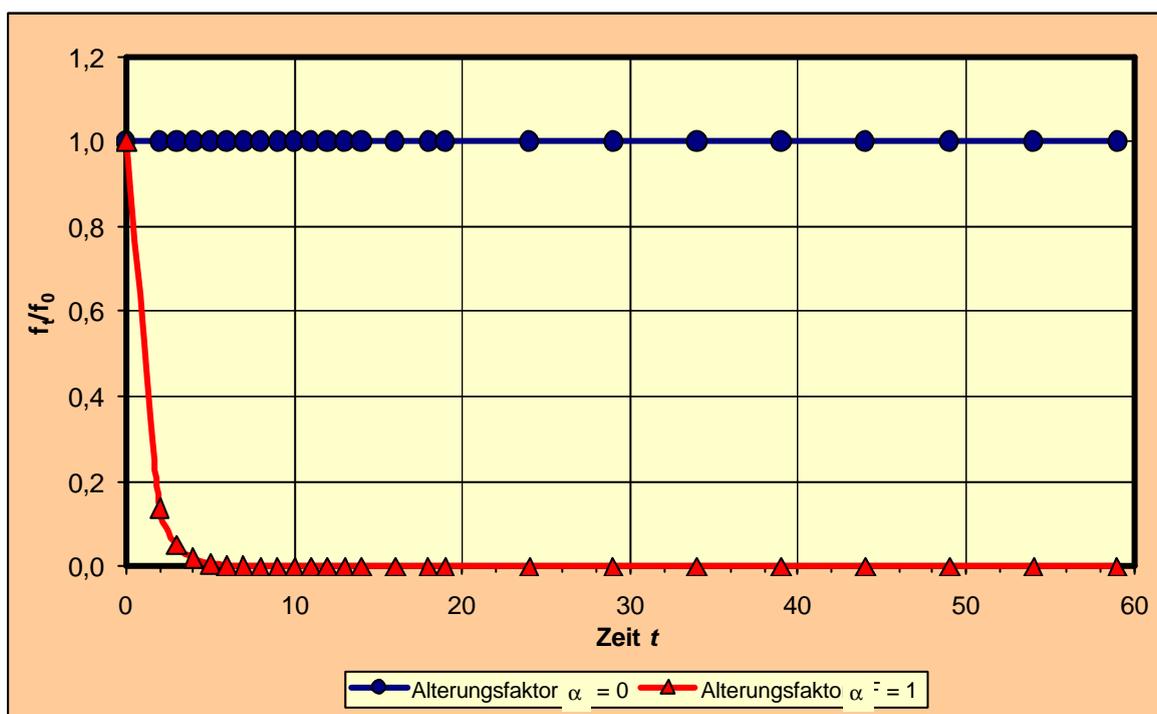


Abb. 7.2.1-1

Zu erwartender Alterungsverlauf der Unterspannbahnen in Abhängigkeit des Alterungsfaktors a

Der in Abbildung 7.2.1-1 dargestellte Bereich zwischen den beiden Alterungsfaktoren $a \rightarrow 0$ und $a \rightarrow 1$ kann durch folgende Funktion des Langzeitverhaltens beschrieben werden:

$$\frac{f_t}{f_0} = e^{-b \cdot t} \quad (7.2.1-10)$$

mit: f_t = Folieneigenschaft zum Zeitpunkt t

f_0 = Folieneigenschaft zum Zeitpunkt $t = 0$ (Neuzustand)

t = Zeit in d

b = Alterungsexponent in $1/d$

Das Verhältnis f_t/f_0 gibt die Folieneigenschaften zum Zeitpunkt t im Vergleich zum Neuzustand ($t = 0$) an. Daran ist in Abhängigkeit der Zeit ablesbar, wie viel Prozent der ursprünglichen Materialeigenschaften im gealterten Zustand der Unterspannbahnen noch vorhanden sind. Der Alterungsexponent b bestimmt sich in Abhängigkeit des Alterungsfaktors a einer frei bewitterten Unterspannbahn (vgl. Abb. 7.2.3-1). Dabei ist der Alterungsfaktor a aus einer mindestens 3-monatigen Freibewitterung zu ermitteln.

7.2.2 Alterungskennziffern d der natürlich gealterten Unterspannbahnen

Die Bestimmung der Alterungskennziffern d für natürlich gealterte Unterspannbahnen erfolgt gemäß der im vorangegangenen Abschnitt hergeleiteten Formeln. In diese werden die Ergebnisse der Freibewitterungsversuche aus Kapitel 6 eingesetzt. Aus Tabelle 7.2.2-1 gehen die Alterungskennziffern d_t der untersuchten Unterspannbahnen hervor. Der ausführlich dargestellte Rechengang zur Ermittlung der Alterungskennziffer d_t ist den Tabellen des Anhangs D zu entnehmen. Dort sind auch die Kennziffern der einzelnen Untersuchungen d_h , d_{sd} , d_σ und d_{vL} aufgeführt.

Tabelle 7.2.2-1

Alterungskennziffern d_t der frei bewitterten Unterspannbahnen

Folie	Zeit t in Monaten								
	0	3	6	9	12	15	18	21	24
A	986,0	306,8	224,2	888,1	87,0	21,4	12,7	19,0	4,6
B	16,8	8,5	8,7	6,7	4,5	2,9	1,1	3,2	1,9
C	297,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
D	1258,9	188,4	248,2	182,9	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0
E	748,4	45,6	79,8	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
F	444,9	127,6	172,6	139,9	146,3	6,1	7,1	8,2	0,0

Aus Tabelle 7.2.2-1 geht deutlich hervor, dass mit zunehmender Freibewitterungszeit die Alterungskennziffern d_t kleiner werden. Dies deutet auf abnehmende Materialeigenschaften hin.

Der Abbildung 7.2.2-1 ist zu entnehmen, dass für die Produkte A und F keine gleichmäßige Alterung (im Sinne kontinuierlich kleiner werdender Alterungskennziffern d_t) stattfindet. Nachdem zunächst eine Verschlechterung der Materialeigenschaften bestimmt wurde, stellt sich zwischenzeitlich wieder eine Verbesserung ein. Die Analyse der einzelnen Alterungskennziffern zeigt, dass für beide Produkte ein stark schwankender s_d -Wert für das ungleichmäßige Alterungsverhalten verantwortlich ist. Während bei der Unterspannbahn A nach 9 Monaten ein Wert erreicht wird, der annähernd dem Neuwert entspricht, stellt sich für Folie F nach 6 Monaten wieder eine geringfügige Verbesserung der Eigenschaften ein. Diese liegt allerdings deutlich unter dem Ausgangszustand. Für alle anderen Unterspannbahnen nehmen die Materialeigenschaften mit der Zeit ab.

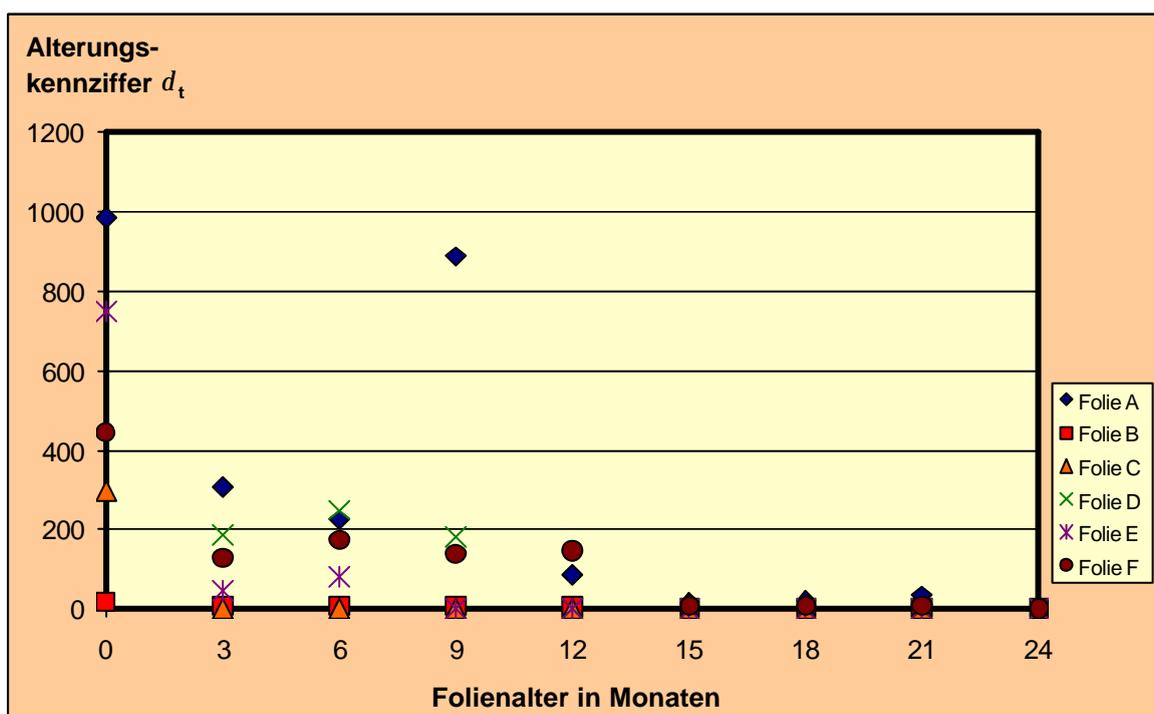


Abb. 7.2.2-1

Alterungskennziffern d_t natürlich gealterter Unterspannbahnen

7.2.3 Prognose des Langzeitverhaltens der natürlich gealterten Unterspannbahnen mit Hilfe des Alterungsfaktors a

Zur Prognose des Langzeitverhaltens der Unterspannbahnen soll Gleichung 7.2.1-10 Anwendung finden. Dazu ist es erforderlich, mit Hilfe der Werte aus Tabelle 7.2.2-1

und Gleichung 7.2.1-8 die Alterungsfaktoren a der Unterspannbahnen zu bestimmen (siehe Tabelle 7.2.3-1).

Aus Tabelle 7.2.3-1 geht hervor, dass die Materialeigenschaften der Folie B nach drei Monaten Freibewitterung um 49,67 % nachgelassen haben. Demnach besitzt das Produkt noch ca. 50 % der Eigenschaften des ursprünglichen Neuzustandes. Dagegen ergeben sich für die Produkte C und E Alterungsfaktoren von über 90 %.

Tabelle 7.2.3-1

Alterungsfaktoren a frei bewitterter Unterspannbahnen

Folie	Alterungsfaktor a								
	a_0	$a_{0-3}=a_F$	a_{0-6}	a_{0-9}	a_{0-12}	a_{0-15}	a_{0-18}	a_{0-21}	a_{0-24}
A	0,00	68,89	77,26	9,93	91,18	98,47	97,82	96,61	99,14
B	0,00	49,67	48,40	60,08	73,37	82,79	93,20	80,81	88,73
C	0,00	99,97	99,98	99,99	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
D	0,00	85,04	80,28	85,47	99,82	100,00	100,00	100,00	100,00
E	0,00	93,91	89,34	99,92	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
F	0,00	71,33	61,21	68,57	67,13	98,64	98,41	98,17	100,00

Für die praktische Anwendung ist es gewünscht, das Langzeitverhalten der Unterspannbahnen durch einfache und schnell durchzuführende Versuche vorherzusagen. Mit Hilfe des Frühalterungsfaktors a_F kann nach Gleichung 7.1.2-9 bereits nach einer 3-monatigen Freibewitterung eine Prognose des Alterungsverhaltens der Unterspannbahnen erstellt werden. Werden Alterungsfaktoren eines späteren Zeitpunkts (a_{0-6} , a_{0-9} oder a_{0-12}) in die Langzeitfunktion eingesetzt, sind Abbauvorgänge erfassbar, die nach den ersten drei Monaten Freibewitterung beginnen. Dies ist auch durch eine Mittelwertbildung der Alterungsfaktoren möglich ($a_{m,0-t}$). Auf diese Weise kann die Korrelation mit den aus Versuchen bestimmten Alterungsfaktoren verbessert werden. Tabelle 7.2.3-2 fasst die Frühalterungsfaktoren a_F sowie die mittleren Alterungsfaktoren $a_{m,0-12}$ zusammen.

Tabelle 7.2.3-2

Frühalterungsfaktoren a_F und mittlere Alterungsfaktoren $a_{m,0-12}$ frei bewitterter Unterspannbahnen

Alterungsfaktor a	Folienkurzbezeichnung					
	A	B	C	D	E	F
a_F	68,89	49,67	99,97	85,04	93,91	71,33
$a_{m,0-12}$	61,81	57,88	99,99	87,65	95,79	67,06

Die Verwendung von Alterungsfaktoren nach einer 12-monatigen Freibewitterung ist ungeeignet, da ab diesem Zeitpunkt die Materialeigenschaften im Vergleich zum Neuzustand stark nachlassen (bzw. bereits stark nachgelassen haben). Der Gebrauch dieser Kennwerte führt zu einer Verschlechterung der Genauigkeit der Langzeitfunktion. Dies gilt gleichermaßen für die Bildung mittlerer Alterungsfaktoren.

Mit den Alterungsfaktoren der Tabelle 7.2.3-2 lassen sich die Alterungsexponenten b_F bzw. $b_{m,0-12}$ bestimmen (siehe Tabelle 7.2.3-3), welche die beste Korrelation mit den in den Versuchen bestimmten Alterungsfaktoren liefern. Trägt man die auf diese Weise gefundenen Alterungsexponenten in ein Diagramm ein (Abbildung 7.3.2-1), so lässt sich eine Trendlinie finden, mit der auch für neu entwickelte Produkte das natürliche Alterungsverhalten abgeschätzt werden kann.

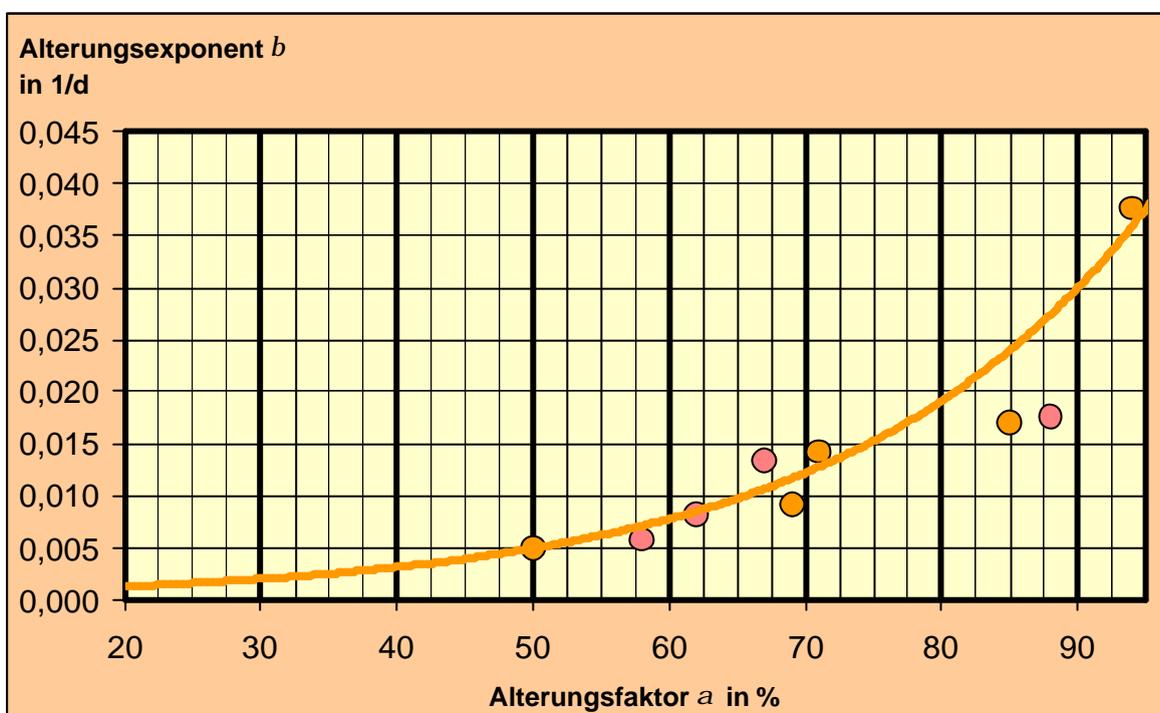


Abb. 7.2.3-1

Alterungsexponenten b in Abhängigkeit des Alterungsfaktors a ; im Diagramm sind die für die untersuchten Unterspannbahnen bestimmten Alterungsexponenten b_F (auf Basis des Frühalterungsfaktors a_F) und $b_{m,0-12}$ (auf Basis des mittleren Alterungsfaktors a) eingetragen. Für unbekannte Produkte kann b mit Hilfe der ermittelten Trendlinie bestimmt werden. Für $a < 20$ % beträgt $b = 0,0016$ 1/d, für $a > 95$ % beträgt $b = 0,04$ 1/d.

Nach einer Freibewitterung von mindestens drei Monaten lässt sich der Frühalterungsfaktor a_F bestimmen und mit diesem kann aus Abbildung 7.2.3-1 der entsprechende Alterungsexponent b abgelesen werden. Dabei wird angenommen, dass sich das Frühalterungsverhalten und der weitere Alterungsverlauf dieser Produkte so verhalten, wie die in dieser Arbeit betrachteten Folien mit vergleichbarem Frühalte-

rungsfaktor. Diese Annahme beruht darauf, dass die untersuchten Unterspannbahnen einen repräsentativen Querschnitt der am Markt erhältlichen diffusionsoffenen Unterspannbahnen darstellen.

Tabelle 7.2.3-3

Alterungsexponenten b_F und mittlere Alterungsexponenten $b_{m,0-12}$ frei bewitterter Unterspannbahnen in 1/d

Alterungs- exponent b	Folienkurzbezeichnung					
	A	B	C	D	E	F
b_F	0,0092	0,0050	0,0340	0,0170	0,0376	0,0143
$b_{m,0-12}$	0,0082	0,0077	0,0400	0,0175	0,0383	0,0089

Die Abbildungen 7.2.3-2 und 7.2.3-3 zeigen die auf der Basis des Frühalterungsexponenten b_F (Bestimmt mit dem Frühalterungsfaktor a_F) bzw. des mittleren Alterungsexponenten $b_{m,0-12}$ (Bestimmt mit dem mittleren Alterungsfaktor $a_{m,0-12}$) ermittelten Langzeitfunktionen nach Gleichung 7.2.1-10 im Vergleich zu den aus Versuchen bestimmten Alterungsfaktoren. Für $a < 20\%$ beträgt $b = 0,0016$ 1/d, für $a > 95\%$ beträgt $b = 0,04$ 1/d.

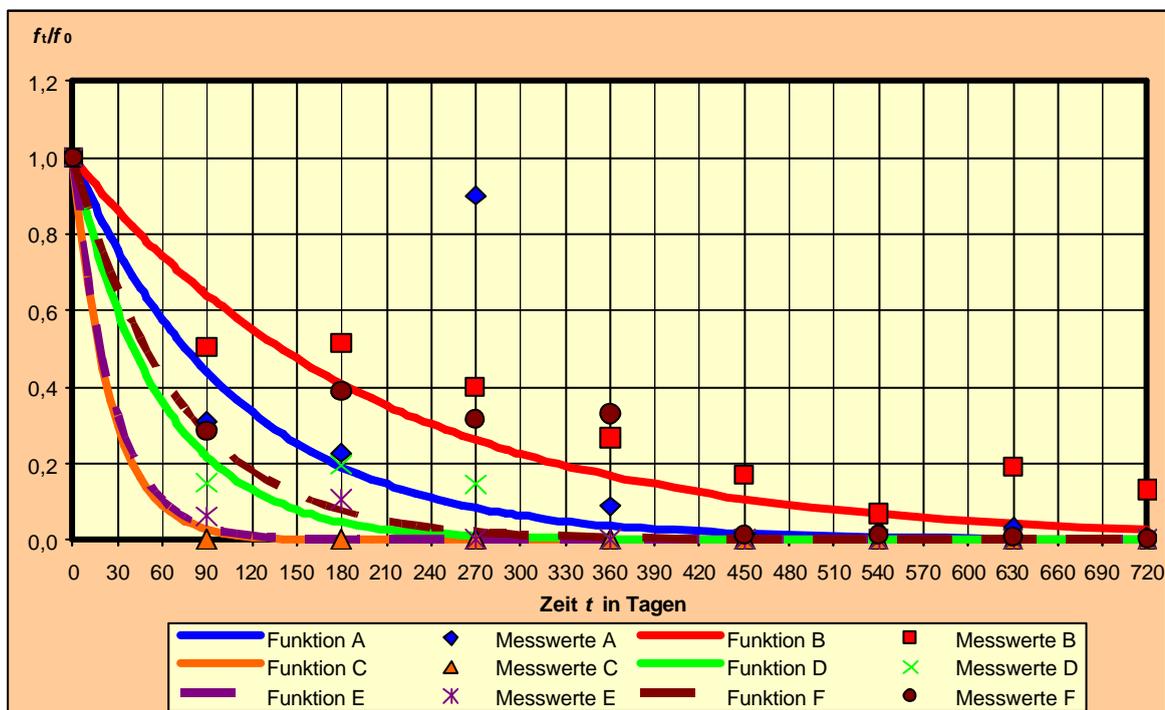


Abb. 7.2.3-2

Prognostiziertes Langzeitverhalten der Unterspannbahnen auf Basis des Frühalterungsexponenten b_F im Vergleich zu den Ergebnissen aus natürlicher Alterung

Aus dem Diagramm der Abbildung 7.2.3-2 geht hervor, dass bereits mit dem Frühalterungsexponenten b_F eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen erzielt wird. Insbesondere für die Abschätzung des Materialverhaltens über einen langen Zeitraum von mehr als einem Jahr liegen die berechneten Werte nahe den aus den Materialprüfungen bestimmten Ergebnissen.

Das relative Maximum der Folieneigenschaften, welches nach 6 Monaten Freibewitterung bei fast allen Unterspannbahnen zu erkennen ist, könnte eine Folge der kühleren Jahreszeit sein. Nachdem zu Beginn der Freibewitterung im Sommer zunächst eine stärkere Alterung eintrat, fand im Winter eine leichte Erholung statt. Diese zwischenzeitliche (relative) Verbesserung der Materialeigenschaften hat auf den weiteren Alterungsverlauf keinen Einfluss und es stellt sich in den Folgemonaten eine gute Korrelation der nach Gleichung 7.2.1-10 mit dem Frühalterungsexponenten b_F prognostizierten Werte und den Versuchsergebnissen ein.

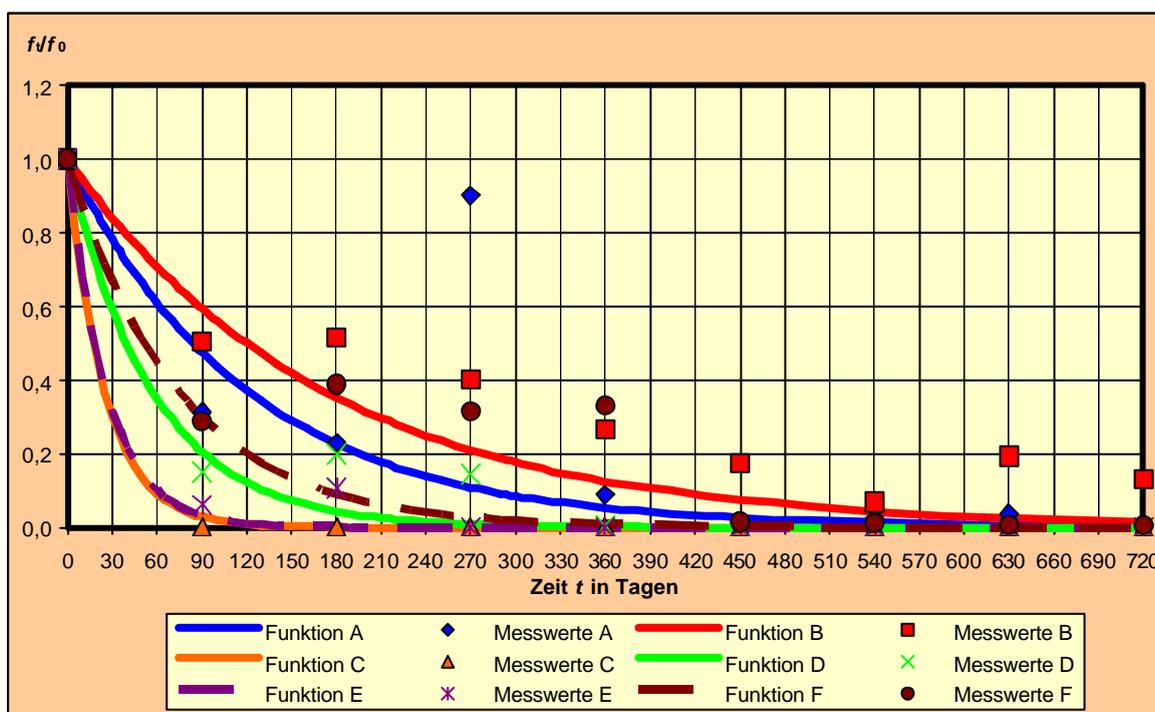


Abb. 7.2.3-3

Prognostiziertes Langzeitverhalten der Unterspannbahnen auf Basis des mittleren Alterungsexponenten $b_{m,0-12}$ im Vergleich zu den Ergebnissen aus natürlicher Alterung

Weiterhin wird aus dem Vergleich der Diagramme (Abbildung 7.2.3-2 und 7.2.3-3) deutlich, dass die Übereinstimmung der vorausgesagten Werte mit den Versuchsergebnissen für die Alterungsexponenten b_F und $b_{m,0-12}$ nahezu identisch ist.

7.3 Überprüfung der Korrelation der Ergebnisse aus künstlicher Alterung und prognostiziertem Langzeitverhalten

Wie bereits zu Beginn der Arbeit festgestellt wurde, können natürlich und künstlich aufgebrachte Belastungen zu stark unterschiedlichen Reaktionen führen. Somit stellt die im vorangegangenen Abschnitt auf Basis der Freibewitterungsversuche gefundene Langzeitfunktion die Referenz für den Vergleich mit den künstlich gealterten Unterspannbahnen dar.

Dabei bestanden die künstlichen Alterungsversuche zum einen aus reinen Wärmelagerungen zum anderen aus UV-Bestrahlung bei bestimmten Temperaturen. Der Normversuch sah eine kombinierte Beanspruchung aus UV- und anschließender Wärmelagerung vor.

Für die künstlichen Alterungen durch erhöhte Temperaturen von 40 °C, 60 °C und 80 °C über 4 Wochen ist es vor Beginn der Versuche nicht möglich, die angestrebte Materialalterung vorherzusagen. Dagegen ist die UV-Bestrahlungsstärke so gewählt worden, dass eine 3- bzw. 6-monatige Freibewitterungszeit simuliert werden sollte. Der Normversuch sieht ebenfalls eine Bestrahlungsintensität vor, die einer 3-monatigen Freibewitterung entsprechen soll. Die Auswirkungen der anschließenden 90-tägigen Wärmelagerung bei 70 °C auf die weitere Alterung der Folien sind unbekannt. Demzufolge entspricht der 3½ Monate dauernde Normversuch mindestens dem gleichen Zeitraum an natürlicher Alterung.

In den Tabellen 7.3-1 und 7.3-2 sind die Alterungskennziffern d_t nach Gleichung 7.2.2-1 sowie die Alterungsfaktoren a_K für die künstliche Alterung nach Gleichung 7.2.1-8 der künstlich gealterten Folien zusammengefasst (siehe auch Anhang D).

Im Folgenden soll den Versuchen der künstlichen Alterung mit Hilfe der prognostizierten Werte der Langzeitfunktion (Gleichung 7.2.1-10) ein Alterungszeitraum zugeordnet werden. Dies kann durch die Alterungsfaktoren a_K erfolgen, die mit dem Verhältnis f_t/f_0 wie folgt in Beziehung stehen:

$$1 - a_K = f_t/f_0 \quad (7.3-1)$$

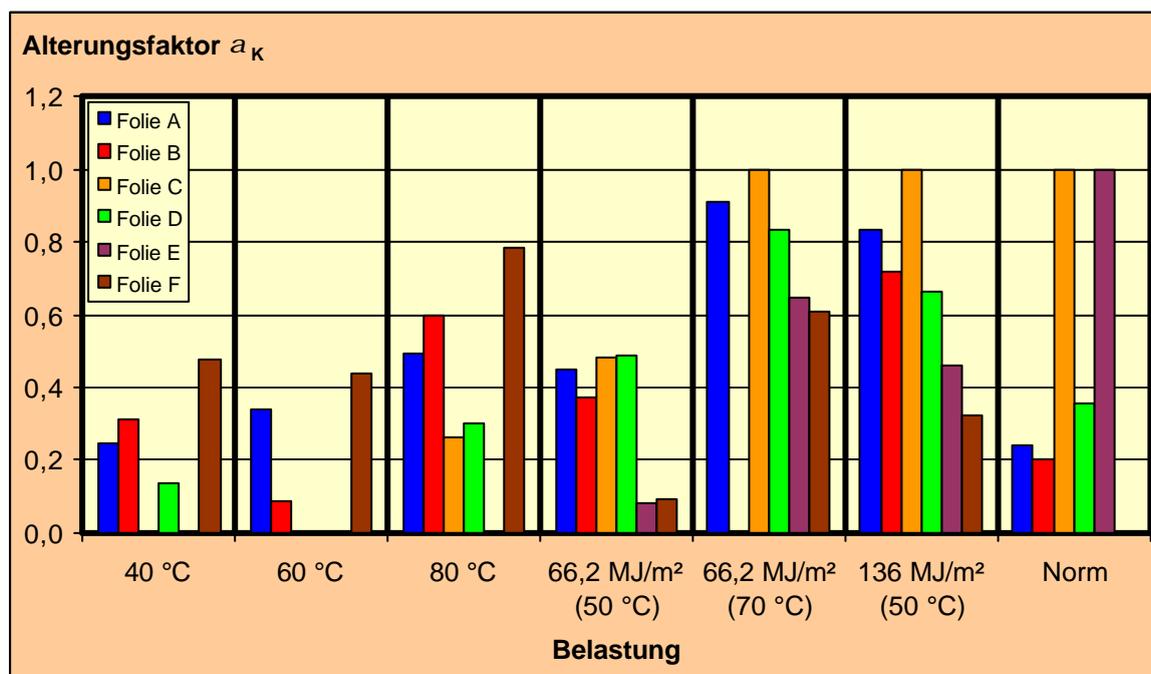
Wird die Differenz $(1 - a_K)$ in die Diagramme der Abbildungen 7.2.3-1 bzw. 7.2.3-2 eingesetzt, so ist an der Langzeitfunktion der Grad der (beschleunigten) Alterung durch Wärme- bzw. UV-Lagerung ablesbar.

Tabelle 7.3-1Alterungskennziffern d_t der künstlich gealterten Unterspannbahnen

Folie	Belastung						Norm
	40 °C 4 Wo.	60 °C 4 Wo.	80 °C 4 Wo.	66,2 MJ/m ² (50 °C)	66,2 MJ/m ² (70 °C)	136 MJ/m ² (50 °C)	
A	744,44	649,86	498,04	541,00	85,98	165,55	747,31
B	11,53	15,33	6,73	10,53	40,55	4,75	13,37
C	323,22	310,36	218,33	153,93	0,04	0,00	0,60
D	1085,60	1273,46	879,35	641,97	212,57	425,54	808,69
E	920,48	1556,85	897,99	688,65	264,48	405,06	0,00
F	232,07	249,74	97,08	404,29	175,15	301,24	503,22

Tabelle 7.3-2Alterungsfaktoren a_K der künstlich gealterten Unterspannbahnen

Folie	Belastung						Norm
	40 °C 4 Wo.	60 °C 4 Wo.	80 °C 4 Wo.	66,2 MJ/m ² (50 °C)	66,2 MJ/m ² (70 °C)	136 MJ/m ² (50 °C)	
A	24,50	34,09	49,49	45,13	92,28	83,21	24,21
B	31,37	8,75	59,94	37,32	-141,37	71,73	20,42
C	-8,83	-4,50	26,49	48,17	99,99	100,00	99,80
D	13,77	-1,16	30,15	49,01	83,11	66,20	35,76
E	-22,99	-108,02	-19,99	7,98	64,66	45,88	100,00
F	47,84	43,87	78,18	9,13	60,63	32,29	-13,11

**Abb. 7.3-1**Alterungsfaktoren a_K der künstlich gealterten Unterspannbahnen

7.3.1 Künstlich gealterte Unterspannbahnen durch Wärmelagerung

Unter Verwendung der Alterungsfaktoren a_K nach Tabelle 7.3-2 für die unterschiedlichen Wärmebelastungen von 40 °C, 60 °C und 80 °C über jeweils 4 Wochen, ergeben sich mit dem prognostizierten Langzeitverhalten der Unterspannbahnen auf Basis des Frühalterungsfaktors a_F (siehe Abb. 7.2.3-1) die in den Abb. 7.3.1-1 bis 7.3.1-3 dargestellten (beschleunigten) Alterungen. Daraus ist zu entnehmen, dass eine Temperaturbelastung von 40 °C über 4 Wochen (Abbildung 7.3.1-1) kaum Einfluss auf die Alterung der Bahnen hatte. Mit Ausnahme der Folien B und F lagen die erreichten Alterungszeiten entweder unter 30 Tagen oder es ergaben sich verbesserte Materialeigenschaften (Folie C und E).

Gleiches gilt für die Wärmelagerung bei 60 °C. Diese Belastung führte bei den Produkten C und D zu einer geringfügigen, bei Folie E zu einem deutlichen Anstieg des Alterungsfaktors. Dies ist gleichbedeutend mit einer Verbesserung der Materialeigenschaften. Die Unterspannbahnen A und F erreichten Materialeigenschaften, die einer prognostizierten Alterung von mehr als 30 Tagen entsprechen.

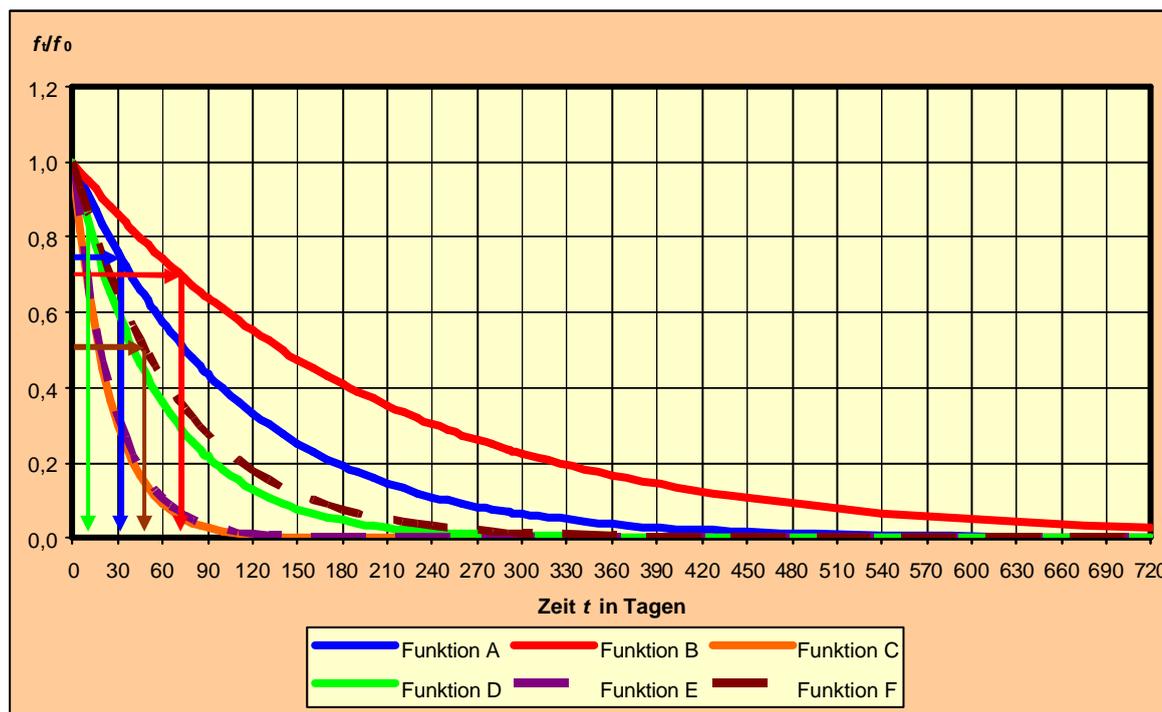


Abb. 7.3.1-1

Anwendung der Alterungsfaktoren a_K aus der Wärmebelastung von 40 °C/4 Wo. auf das prognostizierte Langzeitverhalten der Unterspannbahnen (auf Basis des Frühalterungsexponenten b_F)

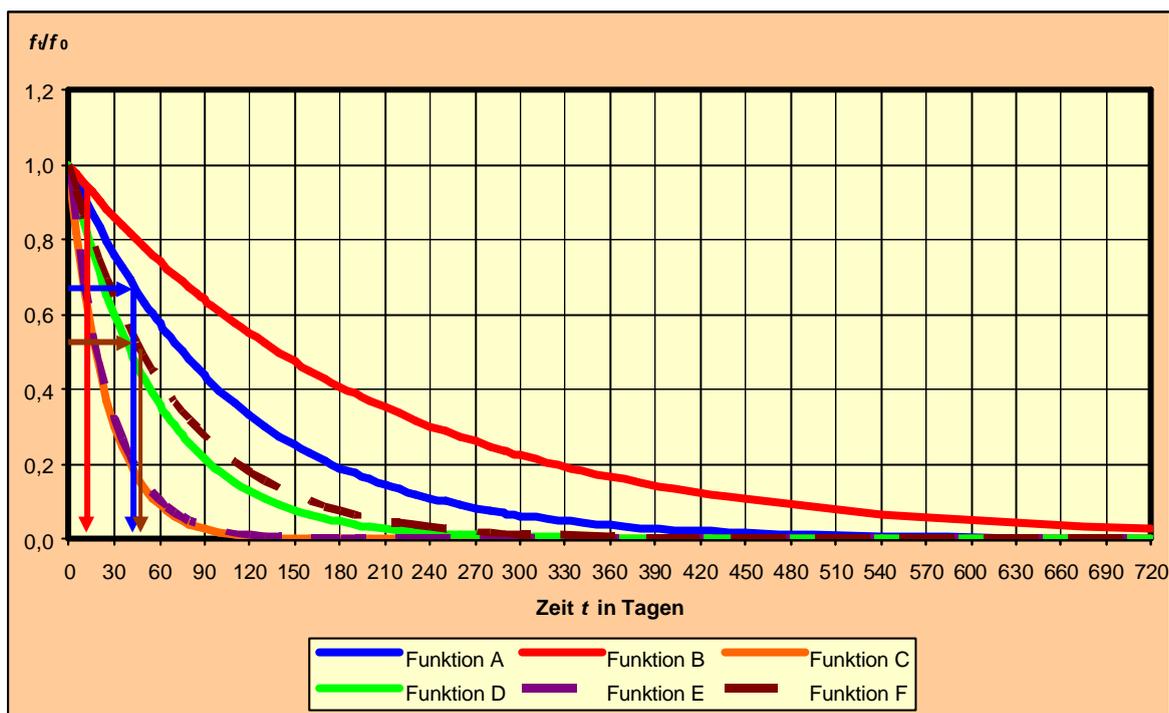


Abb. 7.3.1-2

Anwendung der Alterungsfaktoren a_K aus der Wärmebelastung von 60 °C/4 Wo. auf das prognostizierte Langzeitverhalten der Unterspannbahnen (auf Basis des Frühalterungsexponenten b_F)

Im Gegensatz zu den Wärmelagerungen bei 40 °C und 60 °C bewirkt die erhöhte Temperatur von 80 °C, dass die Materialkennwerte der Folien A, B und F Größenannahmen, die einer mehrmonatigen Freibewitterung entsprechen würden. Dagegen hatte die Wärmebelastung auf die Produkte C und D mit einer erreichten Alterung von unter 30 Tagen keine Auswirkungen. Für die Unterspannbahn E stellten sich nach der 4-wöchigen Wärmelagerung bei 80 °C bessere Materialeigenschaften ein als beim vergleichbaren Neuprodukt.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Belastung der Unterspannbahnen mit Temperaturen von 40 °C und 60 °C keine oder nur sehr geringe Beschleunigungen der Alterung zur Folge hatte. Lediglich die Wärmelagerung bei 80 °C führte bei den Produkten A, B und F zu Materialveränderungen, die einer mehrwöchigen Freibewitterung entsprechen.

Eine Wärmebelastung, die einen für alle Unterspannbahnen einheitlichen Alterungszeitraum bewirkt, konnte nicht ermittelt werden. Die untersuchten Unterspannbahnen verhalten sich nach den verschiedenen Temperaturlagerungen sehr unterschiedlich.

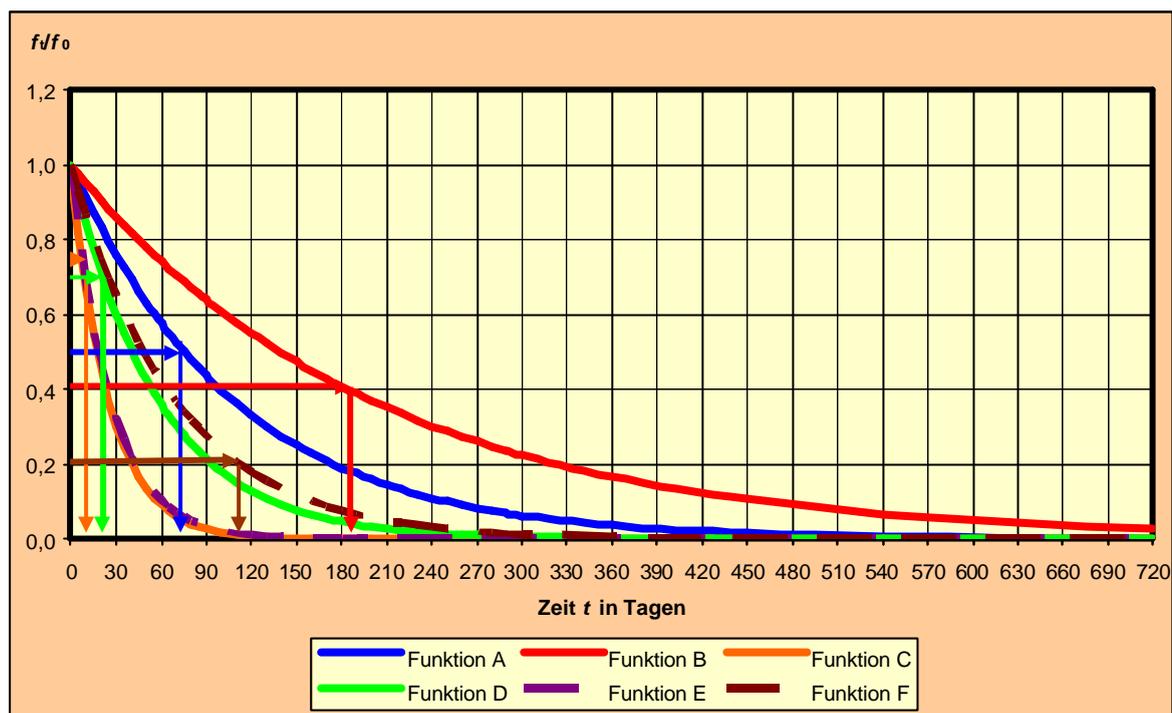


Abb. 7.3.1-3

Anwendung der Alterungsfaktoren a_K aus der Wärmebelastung von 80 °C/4 Wo. auf das prognostizierte Langzeitverhalten der Unterspannbahnen (auf Basis des Frühalterungsexponenten b_F)

7.3.2 Künstlich gealterte Unterspannbahnen durch UV-Bestrahlung bei gleichzeitiger Wärmeeinwirkung

Wie für die unterschiedlichen Wärmebelastungen soll unter Verwendung der Alterungsfaktoren a_K nach Tabelle 7.3-2 auch für die unterschiedlichen UV-Belastungen mit Hilfe des prognostizierten Langzeitverhaltens der Unterspannbahnen (siehe Abb. 7.2.3-1) der erreichte Alterungszeitraum ermittelt werden.

Aus Abbildung 7.3-1 und Tabelle 7.3-2 geht hervor, dass durch die UV-Belastungen (mit gleichzeitig wirkender Temperaturbelastung) deutlich höhere Alterungsfaktoren erreicht werden als durch die reine Wärmelagerung. Insbesondere die Unterspannbahnen C und E, deren Materialeigenschaften sich nach der Wärmelagerung bei 40 °C und 60 °C verbesserten, versagten bei einigen der aufgetragenen UV-Belastungen vollständig.

Die größten Auswirkungen der UV-Belastung sind bei einer gleichzeitig wirkenden Temperatur von 70 °C zu verzeichnen (vgl. Abb. 7.3.2-2). In diesem Fall werden deutlich größere Alterungszeiträume erreicht, als bei UV-Bestrahlungen mit geringerer Wärmebelastung (siehe Abbildungen 7.3.2-1 bis 7.3.2-4).

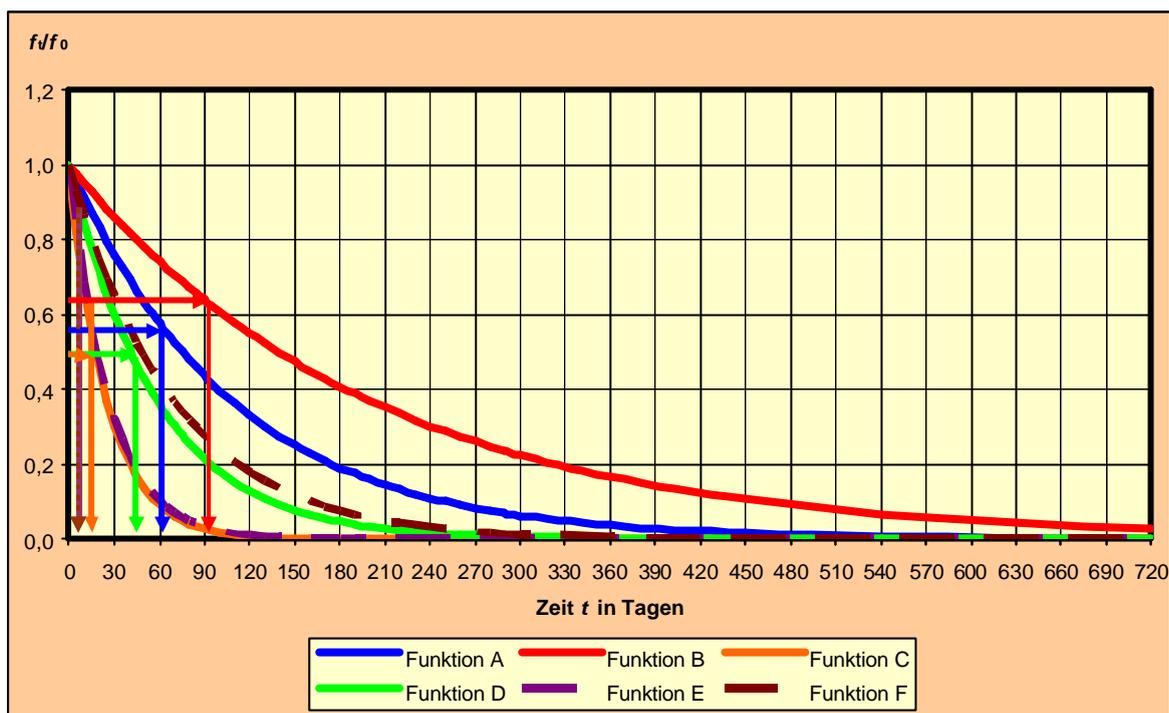


Abb. 7.3.2-1

Anwendung der Alterungsfaktoren a_k aus der UV-Belastung von $66,2 \text{ MJ/m}^2$ (bei 50 °C) auf das prognostizierte Langzeitverhalten der Unterspannbahnen (auf Basis des Frühalterungsexponenten b_F)

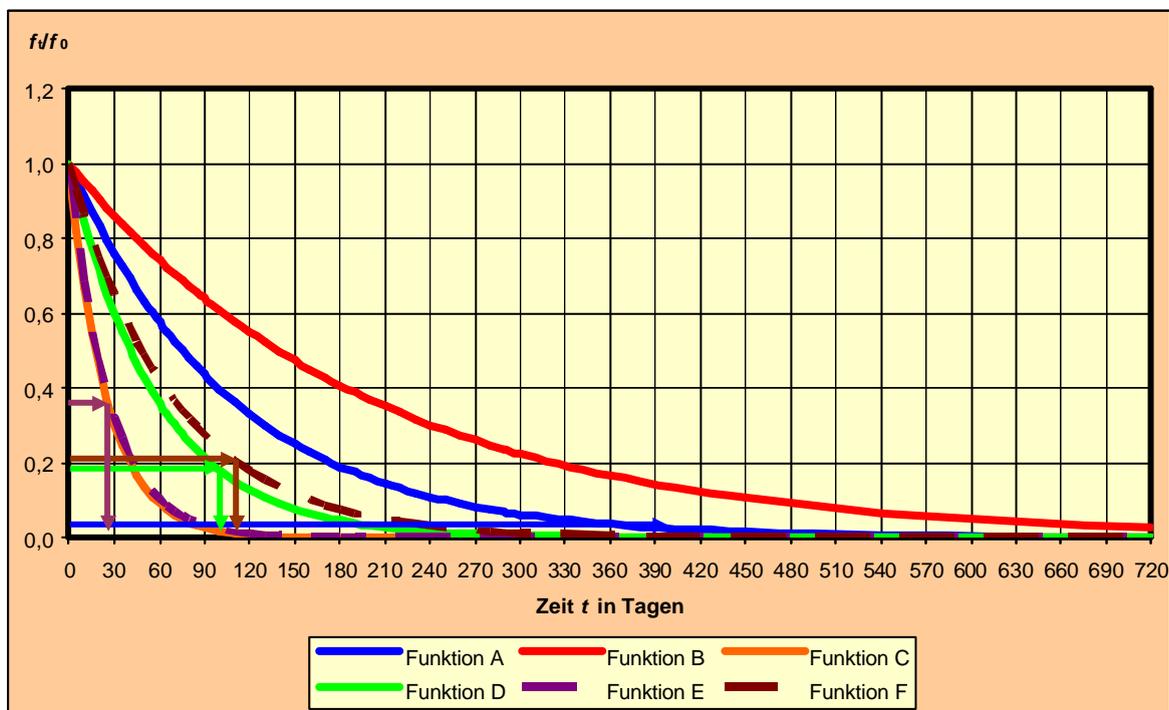


Abb. 7.3.2-2

Anwendung der Alterungsfaktoren a_k aus der UV-Belastung von $66,2 \text{ MJ/m}^2$ (bei 70 °C) auf das prognostizierte Langzeitverhalten der Unterspannbahnen (auf Basis des Frühalterungsexponenten b_F)

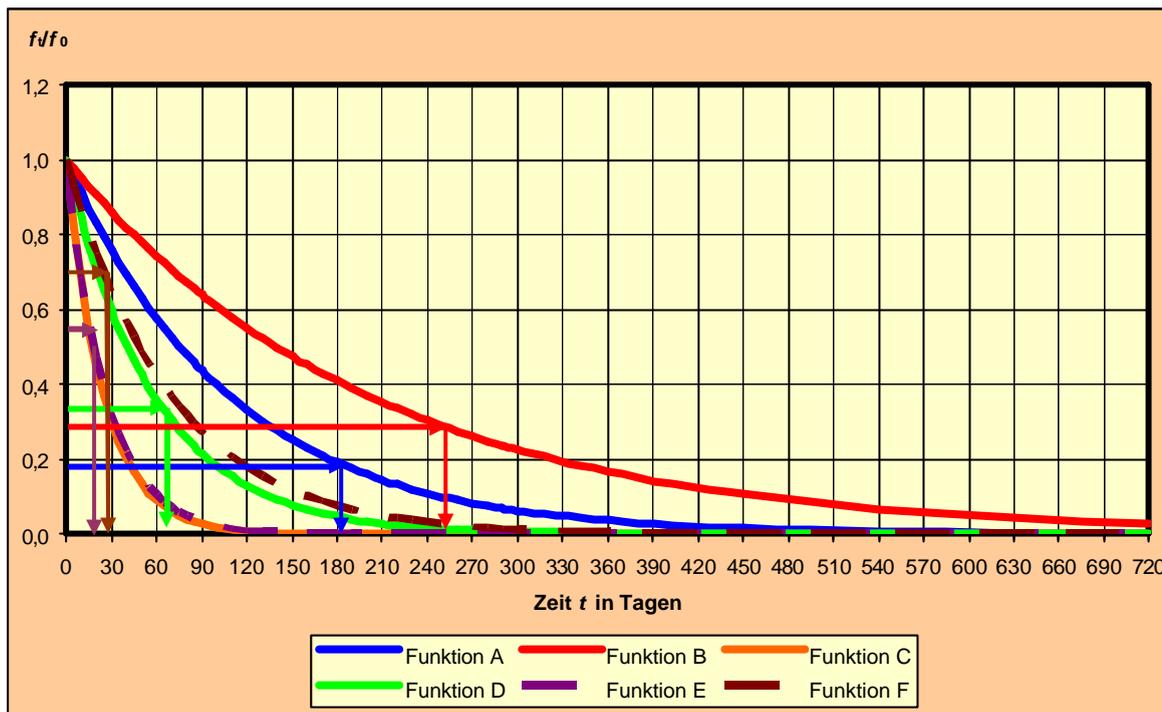


Abb. 7.3.2-3

Anwendung der Alterungsfaktoren a_k aus der UV-Belastung von $136,0 \text{ MJ/m}^2$ (bei $50 \text{ }^\circ\text{C}$) auf das prognostizierte Langzeitverhalten der Unterspannbahnen (auf Basis des Frühalterungsexponenten b_F)

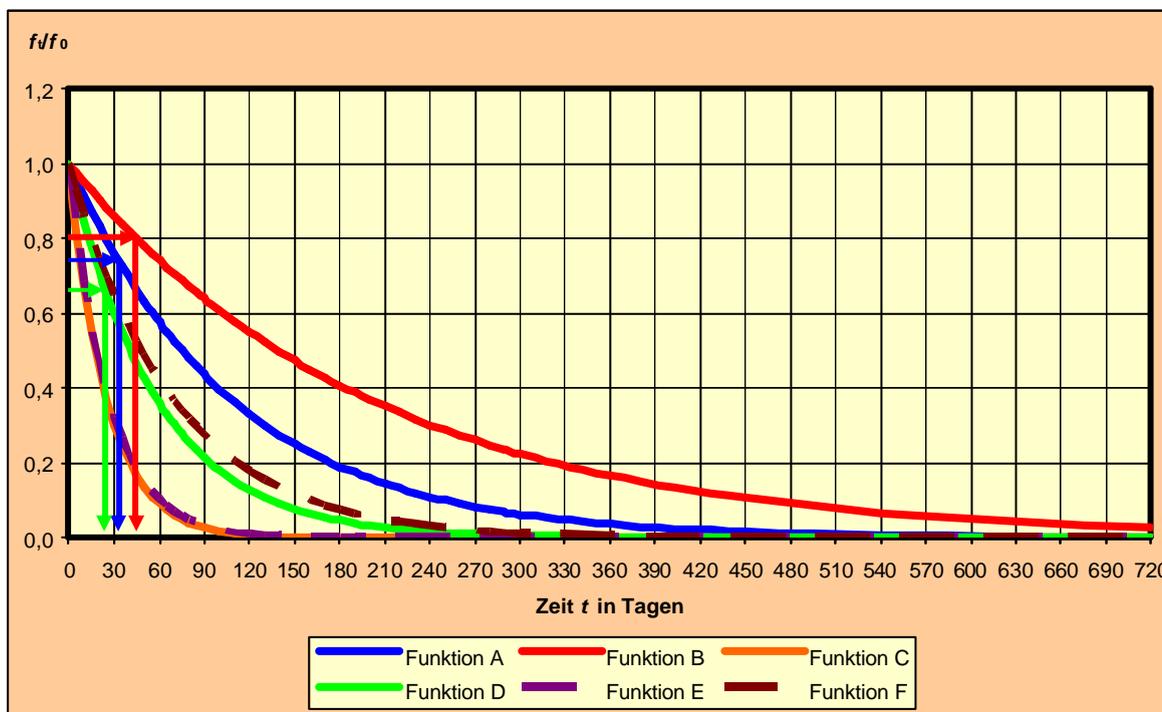


Abb. 7.3.2-4

Anwendung der Alterungsfaktoren a_k aus der UV-Belastung von $54,5 \text{ MJ/m}^2$ (bei $50 \text{ }^\circ\text{C}$) auf das prognostizierte Langzeitverhalten der Unterspannbahnen (auf Basis des Frühalterungsexponenten b_F)

Dagegen führte die künstliche Alterung nach Norm zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Während die Unterspannbahnen A, B und D nur geringe Alterungsercheinungen zeigten und Folie F sich verbesserte, wiesen die Bahnen C und E einen a_K -Faktor von 1,0 auf. Dies ist gleichbedeutend mit dem Versagen einer oder mehrerer Folieneigenschaften.

Obwohl die UV-Belastungen von $66,2 \text{ MJ/m}^2$ und $136,0 \text{ MJ/m}^2$ einer äquivalenten Bestrahlungsintensität von 3 bzw. 6 Monaten (für den Standort Cottbus) entsprachen, konnten diese Alterungszeiträume nicht erreicht werden. Lediglich die Folie A lag nach der UV-Bestrahlung von $136,0 \text{ MJ/m}^2$ bei 180 Tagen und entsprach damit der erwarteten Alterung.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass auch für die UV-Belastungen kein einheitlicher Alterungszeitraum ermittelt werden konnte. Ebenso wie bei der Wärmelagerung verhalten sich die betrachteten Unterspannbahnen sehr unterschiedlich. Es ist nicht möglich, eine allgemeingültige Aussage dahingehend zu treffen, dass eine definierte UV-Bestrahlung (bei einer vorgegebenen Temperatur) einen bestimmten Alterungszeitraum entspricht. Dies gilt gleichermaßen für UV-Belastungen, deren Strahlungsintensität auf die natürliche Strahlung eines bestimmten Standortes angepasst wurde.

7.4 Bewertung der Ergebnisse

Mit der in diesem Kapitel vorgenommenen mathematischen Auswertung der durchgeführten Untersuchungen erhält man hinsichtlich der natürlichen und künstlichen Alterung der Unterspannbahnen unterschiedliche Aussagen. Zunächst ist es möglich, für natürlich und künstlich gealterte Unterspannbahnen durch die Definition von Alterungsfaktoren a bzw. a_K das Nachlassen baupraktisch bedeutender Folieneigenschaften zu beschreiben (vgl. Tab. 7.2.3-1 und 7.3-2). Dazu ist die Festlegung von Grenzwerten erforderlich, welche die Mindesteigenschaften der Unterspannbahnen definieren (vgl. Tab. 7.2.1-1).

Weiterhin findet sich für die frei bewitterten Folien eine allgemein gültige Formel, mit der das Alterungsverhalten der Bahnen abschätzbar ist. Der Vergleich der Langzeitfunktion mit dem aus den Versuchsergebnissen der Freibewitterung bestimmten Alterungsexponenten b ergibt eine gute Korrelation (vgl. Abb. 7.2.3-1 und 7.2.3-2). Unter Anwendung des Frühalterungsfaktors a_F kann aus der Langzeitfunktion (Gl. 7.2.1-10) den verschiedenen künstlichen Belastungen ein bestimmter Alterungszeitraum zugeordnet werden.

Umgekehrt ist es unter den angenommenen Randbedingungen nicht möglich, aus den künstlichen Alterungsversuchen eine für alle Folien geltende Formel des Alterungsverhaltens zu entwickeln. Auch führten die jeweiligen Temperatur- und UV-Belastungen nicht zu einheitlichen Alterungserscheinungen bzw. -zeiträumen (siehe Tabelle 7.4-1 und Abbildung 7.4-1).

Tabelle 7.4-1

Alterungszeiträume (in Tagen) der künstlich gealterten Unterspannbahnen

Folie	Belastung						Norm
	40 °C 4 Wo.	60 °C 4 Wo.	80 °C 4 Wo.	66,2 MJ/m ² (50 °C)	66,2 MJ/m ² (70 °C)	136 MJ/m ² (50 °C)	
A	30	40	70	60	400	180	31
B	70	10	183	91	k.A. ¹⁾	250	42
C	k.A. ¹⁾	k.A. ¹⁾	10	15	V. ²⁾	V. ²⁾	V. ²⁾
D	7	k.A. ¹⁾	18	40	112	63	20
E	k.A. ¹⁾	k.A. ¹⁾	k.A. ¹⁾	5	25	17	V. ²⁾
F	45	40	110	5	65	20	k.A. ¹⁾

¹⁾ k.A. = keine Alterung (Verbesserung der Materialeigenschaften nach der künstlichen Alterung)

²⁾ V. = vollständiges Versagen der Bahn

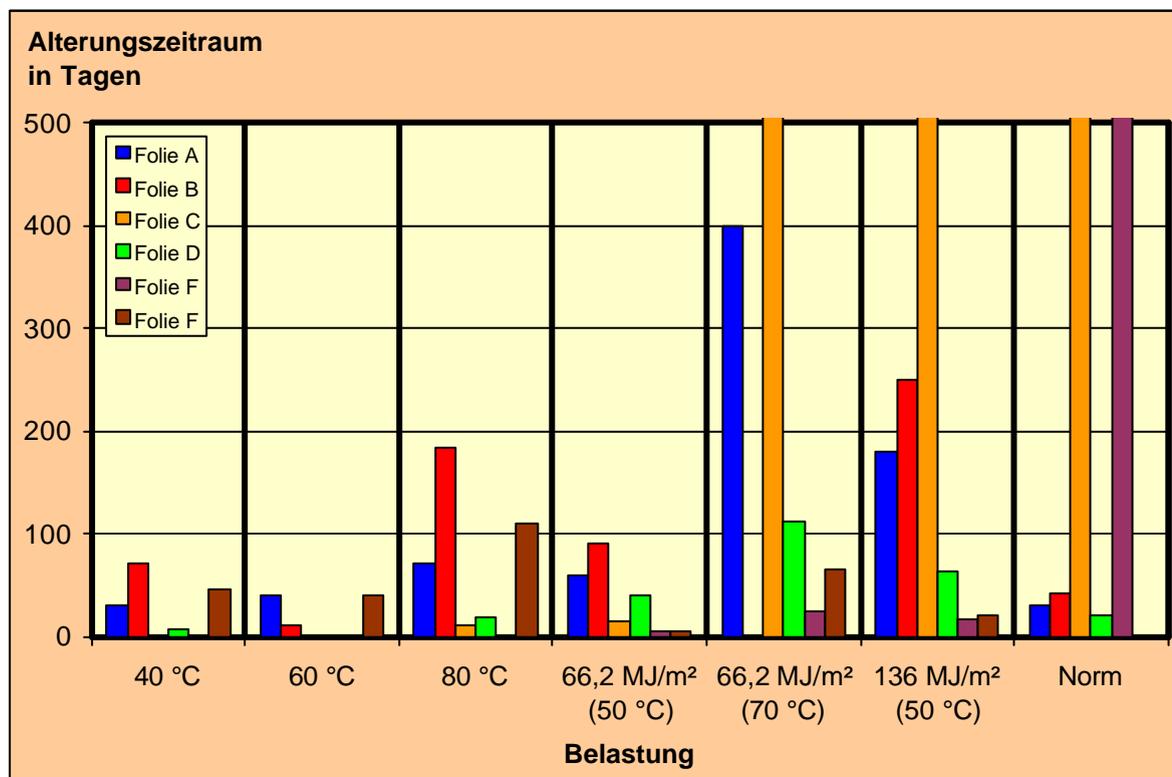


Abb. 7.4-1

Alterungszeiträume der künstlich gealterten Unterspannbahnen nach Tabelle 7.4-1; für die künstlichen Belastungen stellten sich keine einheitlichen Alterungszeiträume ein.

Betrachtet man beispielsweise die beiden Unterspannbahnen C und E, so wiesen diese beiden Produkte im Freibewitterungsversuch die höchsten Frühalterungs- und mittleren Alterungsfaktoren von deutlich über 90 % auf. Demnach besaßen die beiden Produkte nur noch ca. 10 % der anfänglichen Folieneigenschaften. Diese Alterung konnte durch die verschiedenen Wärmelagerungen nicht erzielt werden (siehe Abb. 7.3.1-1 bis 7.3.1-3). Für die Folie E wurden sogar in allen Temperaturversuchen verbesserte Materialeigenschaften festgestellt. Andererseits führte die künstliche Alterung nach DIN 13 859-1 [25] zu einem vollständigen Versagen einer oder mehrerer Eigenschaften der Bahnen.

Während die Produkte C und E wärmestabil aber UV-empfindlich sind, verhalten sich die Produkte A, B und F gegenteilig. Insbesondere bei einer Temperaturbelastung von 80 °C konnte für diese Unterspannbahnen eine deutlich beschleunigte Alterung von mehreren Monaten bestimmt werden. Demgegenüber verhalten sich die Folien vor allem im Norm-Versuch wesentlich UV-stabiler. Der beschleunigte Materialabbau bei größerer Wärmeeinwirkung zeigt sich auch im UV-Versuch mit gleichzeitig wirkender Temperatur von 70 °C. In diesem Fall führt die UV- und erhöhte Wärmebelastung zu größeren Alterungsfaktoren.

Ein den Folien C und E vergleichbares Verhalten nach den künstlichen Alterungsversuchen stellt sich bei der Unterspannbahn D ein. Dabei ist eine etwas höhere Wärmeempfindlichkeit bei gleichzeitig größerer UV-Stabilität gegeben.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es mit der als Referenz dienenden Langzeitfunktion nicht möglich ist, den künstlich gealterten Unterspannbahnen einen einheitlichen Alterungszeitraum zuzuordnen. Obwohl die Langzeitfunktion der Gleichung 7.2.1-10 in Abhängigkeit des Alterungsfaktors frei bewitterter Folien bestimmt wurde und für alle untersuchten Unterspannbahnen eine allgemeine Gültigkeit besitzt, ergaben sich für die Folien bei den verschiedenen künstlichen Alterungsversuchen durch Wärme- und UV-Lagerung keine identischen Alterungszeiträume (vgl. Tabelle 7.4-1 und Abbildung 7.4-1).

Weiterhin konnte durch die mathematische Auswertung der Versuchsergebnisse bestätigt werden, dass insbesondere künstlich aufgebrachte Belastungen zu stark unterschiedlichen Reaktionen der betrachteten Unterspannbahnen führen (siehe Kapitel 6). Zur baupraktischen Einstufung des Langzeitverhaltens von diffusionsoffenen Unterspannbahnen sind die künstlich aufgebrachten Wärme- und UV-Belastungen unter den angenommenen Randbedingungen nicht geeignet. Folien, die für bestimmte (künstliche) Belastungen sehr dauerhaft und beständig sind, können bei einer anderen Beanspruchung ein völlig anderes Alterungsverhalten aufweisen.

8 Zusammenfassung

Wirtschaftliche und ökologische Forderungen werden auch in Zukunft zu einem Ausbau von Bodenräumen zu Wohnräumen führen. Damit es dabei nicht zu schwerwiegenden Bauschäden kommt, müssen insbesondere die bauphysikalischen Anforderungen unter den Gesichtspunkten des Wärme- und Feuchteschutzes stärker beachtet werden. Waren bei der Nutzung der Dachböden als Kalträume die Ansprüche eher gering, so muss ein bewohnter Dachraum bestimmten wärme- und feuchteschutztechnischen Bedingungen genügen. Vor allem den Bauelementen, die das Ein- und Ausdiffundieren von Feuchtigkeit ermöglichen (z.B. polyolefine diffusionsoffene Dachunterspannbahnen, Dampfbremsen, Wärmedämmungen), kommt dabei eine entscheidende Bedeutung zu.

Obwohl die in dieser Arbeit betrachteten diffusionsoffenen Dachunterspannbahnen schon seit mehr als 10 Jahren verwendet werden, sind auf dem Gebiet der Dauerhaftigkeit noch immer große Wissenslücken vorhanden. Derzeit gibt es kein Verfahren, mit dem praxisnah die Langzeitbeständigkeit von Unterspannbahnen geprüft werden kann.

8.1 Ausgangspunkt und Problemstellung

Bei den in dieser Forschungsarbeit untersuchten diffusionsoffenen Unterspannbahnen handelt es sich hinsichtlich der traditionell im Bauwesen eingesetzten Materialien um ein vergleichsweise neues Produkt. Aus diesem Grund liegen für die in Dachkonstruktionen verwendeten polyolefinen Kunststoff-Folien Erfahrungsdaten über das zu erwartende Materialverhalten noch nicht über die volle Nutzungsdauer vor. Da die verwendeten Unterspannbahnen während der Bauphase als Noteindeckung dienen und nach der Fertigstellung des Daches extremen Umgebungsbedingungen ausgesetzt sind, gilt das besondere Interesse dieser Arbeit der Überprüfung der mit zunehmender Alterung auftretenden Materialveränderungen.

Um genaue Angaben bezüglich der Dauerhaftigkeit und des Langzeitverhaltens diffusionsoffener Unterspannbahnen machen zu können, sind üblicherweise langandauernde Freilandversuche erforderlich. Dabei werden von den Folienherstellern nicht nur die langen Versuchsdauern negativ bewertet. Auch die aufgrund der Material- und Standortabhängigkeit nicht reproduzierbaren und schlecht vergleichbaren Versuchsergebnisse stehen der praktischen Anwendung natürlicher Alterungsversuche entgegen.

Aus diesem Grund wird bei Dauerhaftigkeitsuntersuchungen eine künstlich beschleunigte Alterung im Labor vorgenommen. Die Problematik einer solchen Prüfung besteht darin, dass die künstlich erzeugten Belastungen die verschiedenen Eigenschaftenmerkmale des Kunststoffes in einem unterschiedlichen Maß verändern können. Die in der Regel verschärften Prüfbedingungen führen entweder zu Alterungserscheinungen, die im Praxiseinsatz nicht feststellbar sind oder zu einer nur einseitigen Beschleunigung einzelner Alterungserscheinungen.

8.2 Ziel der Forschungsarbeit

Das Ziel der Forschungsarbeit war es, Kurzzeitversuche zur baupraktischen Einstufung des Langzeitverhaltens diffusionsoffener Unterspannbahnen in Dachkonstruktionen zu entwickeln. Dabei ist vor allem die Angabe eines Zeitraums von Interesse, in dem das Produkt die zur schadensfreien Funktionserfüllung erforderlichen Eigenschaften beibehält.

Zur Erreichung dieses Zieles sollte mit der experimentellen Untersuchung der diffusionsoffenen Unterspannbahnen eine Prüfmethodik entwickelt werden, die bestimmte Alterungskennwerte und -faktoren zur allgemeinen Charakterisierung des Langzeitverhaltens der Folien liefert. Auf deren Basis sollte eine Einstufung zur Dauerhaftigkeit der Polymerfolien erfolgen.

Die dazu erforderlichen Versuche mussten sowohl natürliche als auch künstlich beschleunigte Alterungsuntersuchungen umfassen. Auf diese Weise war es möglich, die Ergebnisse der Laborversuche mit Daten einer Freibewitterung zu vergleichen. Mit den aus natürlichen Bewitterungsversuchen gewonnenen Vergleichswerten konnte ein künstlich gealtertes Produkt hinsichtlich des im Labor erreichten Alterungsgrades beurteilt werden.

8.3 Versuchsdurchführung

Im Rahmen eines Langzeitversuches sollte geklärt werden, in welchem Umfang die verwendeten Materialien bei realitätsnahen Randbedingungen ihre Grundeigenschaften verändern. Dazu wurden über zwei Jahre Daten ermittelt und mit den Ausgangseigenschaften der Unterspannbahnen verglichen. Die Gegenüberstellung der Differenzen zwischen den Folge- und Ausgangsmessungen bzw. natürlicher und künstlicher Alterung ermöglicht eine Aussage über die Dimension der eingetretenen Veränderungen.

Die Entwicklung von Kurzzeitversuchen zur Einstufung des Langzeitverhaltens von diffusionsoffenen Dachunterspannbahnen erforderte eine exemplarische Auswahl der am Markt erhältlichen Produkte. Dies konnte durch die Einteilung der Materialeigenschaften in Wertebereiche erreicht werden, die anschließend in eine Eigenschaftsmatrix übertragen wurden. Auf diese Weise war die Auswahl von sechs repräsentativen diffusionsoffenen Unterspannbahnen möglich.

Diese wurden anschließend für zwei Jahre frei bewittert, wobei in Abständen von 3 Monaten eine Probenentnahme erfolgte. Es folgten verschiedene physikalische, mechanische und analytische Untersuchungen zur Bestimmung der für den Praxiseinsatz wichtigsten Folieneigenschaften. Diese basierten zum Teil auf der für Unterdeck- und Unterspannbahnen geltenden Vornorm prEN 13 859 „Definition und Eigenschaften von Unterdeck- und Unterspannbahnen“, wobei die Normversuche durch weiterführende Untersuchungen ergänzt wurden.

Neben der Freibewitterung wurden verschiedene künstliche Belastungen in Form von Wärme- und/oder UV-Belastungen auf die untersuchten Unterspannbahnen aufgebracht. Dabei war auch die in der prEN 13 859 verlangte künstliche Alterung nach prEN 1296 durchgeführt worden. Der in der Norm beschriebene Versuchsablauf kombiniert eine zweiwöchige UV-Bestrahlung bei 50 °C mit einer anschließenden 90-tägigen Wärmelagerung bei 70 °C. Eine Aussage hinsichtlich der tatsächlich erreichten Alterung in Tagen, Monaten oder Jahren ist nach dieser Prüfung nicht möglich. Aus diesem Grund wurden in der Forschungsarbeit bei den künstlichen Alterungsuntersuchungen zunächst die Belastungen aus Wärme und UV-Strahlung separat auf die Unterspannbahnen aufgebracht. Damit waren die Auswirkungen der jeweiligen Belastung auf die Materialeigenschaften besser erkennbar.

8.4 Ergebnisse

Die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass die natürliche Freibewitterung bei allen betrachteten Produkten zu einem Rückgang der Materialeigenschaften geführt hat. Dies konnte bei den künstlichen Alterungsversuchen nicht bezüglich aller aufgetragenen Belastungen festgestellt werden (siehe Tab. 8.4-1).

Zum Beispiel hatten die verschiedenen Wärmelagerungen bei erhöhten Temperaturen keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die Alterung der Unterspannbahnen (vgl. Tabelle 8.4-2). Dagegen zeigte sich nach den UV-Belastungen ein stark unterschiedliches Verhalten der Produkte. Während bei einigen Folien die UV-Strahlung

zu deutlichen Alterungserscheinungen führte (bis zum Versagen der Bahn), waren auf andere Unterspannbahnen keine negativen Auswirkungen festzustellen (Tab. 8.4-2). Die künstliche Alterung nach Norm ließ einerseits zwei Produkte vollständig versagen, andererseits veränderte sich der Ausgangszustand der anderen Folien nur wenig.

Tabelle 8.4-1

Zusammenfassung der Ergebnisse nach den verschiedenen Untersuchungen

Erkenntnisse nach der natürlichen Alterung durch Freibewitterung	Erkenntnisse nach der künstlichen Alterung durch Wärme- und/oder UV-Lagerung
<ul style="list-style-type: none"> • Es traten Alterungserscheinungen bei allen Produkten auf. • Der Materialabbau der Polymerfolien konnte durch Alterungskennziffern verfolgt werden. • Die Untersuchungsergebnisse ermöglichten die Entwicklung einer Langzeitfunktion. • Die aus den Versuchen ermittelten Alterungsfaktoren korrelieren mit der Langzeitfunktion. • Auf Basis der Alterung in den ersten drei Monaten kann mit der Langzeitfunktion eine baupraktische Einstufung der Dauerhaftigkeit der Unterspannbahnen erfolgen. 	<ul style="list-style-type: none"> • Die Wärmelagerung hatte keinen oder nur geringen Einfluss auf die Folien. • Die UV-Bestrahlung führte zu einem stark unterschiedlichen Verhalten der Bahnen. • Die künstliche Alterung nach Norm führte bei den meisten Produkten zu einer nur geringen Abnahme der Materialeigenschaften. • Die Abbauerscheinungen nach der UV-Bestrahlung sind von der Temperatur in der Prüfkammer abhängig. • Den künstlichen Alterungsversuchen konnten keine einheitlichen Alterungszeiträume zugeordnet werden. • Die künstlichen Alterungsversuche waren nicht geeignet, um das Langzeitverhalten der diffusionsoffenen Folien einzustufen.

Weiterhin konnte ermittelt werden, dass die Abbauerscheinungen der Unterspannbahnen nach den UV-Bestrahlungen von der gleichzeitig in der Prüfkammer eingestellten Temperatur abhängig waren. Dabei führten hohe Temperaturen zu größeren Alterungserscheinungen.

Die Auswertung der Untersuchungen nach den natürlichen und künstlichen Alterungen zeigte, dass eine ganzheitliche Erfassung der Versuchsergebnisse sowie deren mathematische Beschreibung nur durch die Definition von Grenzwerten möglich waren. Deren Festlegung ermöglichte es, die zum Teil stark streuenden Resultate

der durchgeführten Untersuchungen zu erfassen. Dabei sind einerseits Mindestanforderungen an die Unterspannbahnen formuliert worden (Zugfestigkeit und s_d -Wert), andererseits wurden Höchstgrenzen gesetzt, deren Überschreitung keine weiteren (positiven/negativen) Auswirkungen auf die Funktion der Folien hatte (Wasserdruckhöhe und Luftdurchlässigkeit).

Tabelle 8.4-2

Maximal und minimal erreichte Folieneigenschaften nach den unterschiedlichen Belastungen (in % zur Ausgangseigenschaft)

Belastung	Prüfung							
	h in m		s_d in m		s in N/50mm		v_L in m ³ /m ² h	
	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.
Natürlich								
Freibewitterung								
3 Monate	104	5	186	65	92	68	> 500	10
6 Monate	111	11	179	33	98	64	> 500	50
9 Monate	108	3	181	26	100	62	> 500	67
12 Monate	88	0	250	22	69	38	> 500	106
15 Monate	81	0	274	18	73	12	> 500	333
18 Monate	72	0	244	14	87	10	> 500	247
21 Monate	75	0	262	15	90	23	> 500	262
24 Monate	62	0	277	13	68	12	> 500	262
Künstlich								
Wärmelagerung								
40 °C / 4 Wo.	166	94	160	87	105	61	200	50
60 °C / 4 Wo.	155	105	176	110	104	79	300	23
80 °C / 4 Wo.	152	68	354	107	102	53	400	45
UV-Lagerung								
54,5 MJ/m ² (Norm)	166	0	176	77	113	63	> 500	33
66,2 MJ/m ² (50 °C)	176	39	241	33	94	60	> 500	50
66,2 MJ/m ² (70 °C)	160	34	207	54	116	58	> 500	28
136,4 MJ/m ² (50 °C)	119	0	166	26	108	32	> 500	0

Mit Hilfe dieser Grenzwerte war es möglich, Alterungskennziffern d für die natürlich und künstlich gealterten Unterspannbahnen zu bestimmen. Diese zeigten durch zunehmende d -Werte eine Alterung bzw. eine Verschlechterung der Materialeigenschaften im Vergleich zum neuen Produkt an. In Abhängigkeit der prozentualen Veränderung der Alterungskennziffer d_t zu d_0 konnte für die frei bewitterten Unterspannbahnen ein so genannter Alterungsfaktor a bestimmt werden. War dieser groß, so bedeutet dies keine oder nur eine kleine Änderung gegenüber den Ausgangseigenschaften der untersuchten Folie. Ein großer Alterungsfaktor beschrieb dagegen eine deutliche Abnahme der Materialeigenschaften.

Die Langzeitfunktion, welche das Verhältnis der Folieneigenschaften zum Zeitpunkt t im Vergleich zum Zeitpunkt $t = 0$ angibt, verwendet den Alterungsexponenten b zur Vorhersage des Langzeitverhaltens der Bahnen. Wird dieser unter Gebrauch des so genannten Frühalterungsfaktors a_F , der die Veränderung der Materialeigenschaften in den ersten drei Monaten der Freibewitterung beschreibt, ermittelt, war eine Aussage über die zu erwartenden Veränderungen der Folieneigenschaften möglich.

Auf der Grundlage der Langzeitfunktion konnte den künstlich aufgebrachtten Belastungen ein Zeitraum zugeordnet werden, der die durch Temperatur oder UV-Strahlung erreichte Alterung beschrieb. Allerdings war es mit den in dieser Arbeit durchgeführten künstlichen Belastungen (inkl. Normversuch) nicht möglich, unter den angenommenen Randbedingungen einen zeitlich bestimmten und für alle Folien geltenden beschleunigten Alterungsprozess zu erreichen. Eine Korrelation der Ergebnisse der künstlich gealterten Unterspannbahnen mit den aus der Langzeitfunktion prognostizierten Veränderungen der Folieneigenschaften ergab sich nicht.

Es war nicht möglich, für die in dieser Arbeit untersuchten diffusionsoffenen Unterspannbahnen ein Belastungsprogramm einer künstlichen Alterung anzugeben, welches eine genauere Einstufung der allgemeinen Dauerhaftigkeit ermöglicht.

Allerdings ist mit den Einzelversuchen der Wärme- oder UV-Lagerung eine spezifische Einstufung des Folienverhaltens möglich. Somit kann die Baupraxis je nach den speziell zu erwartenden Einwirkungen, die einzelnen Testserien der künstlichen Alterung verwenden. Können zum Beispiel kurze Freibewitterungszeiten gewährleistet werden, wird die Wärmebeständigkeit zum maßgebenden Prüfkriterium.

Ist dagegen eine spezifische Einsatzmöglichkeit der Unterspannbahnen nicht ersichtlich, müssen wegen der während der Bauphase zu erwartenden Witterungseinflüsse (z.B. Sonnenstrahlung, Sturm, (Schlag-) Regen, Hagel) die Langzeitauslagerungstests besonders berücksichtigt werden.

8.5 Folgerungen aus den Forschungsergebnissen

Die vorliegende Forschungsarbeit leistet mit der wissenschaftlichen Untersuchung des Alterungsverhaltens von diffusionsoffenen Unterspannbahnen einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit bei der Auswahl solcher Folien. Dies ist sowohl für Neubauten als auch für die Sanierung, Modernisierung und Instandsetzung von Dächern (insbesondere für Dächer ohne chemischen Holzschutz) von

Bedeutung. Erforderliche Sanierungszyklen und mögliche Freibewitterungszeiten als Notdach können vorausbestimmt und geplant werden.

Bei Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse lassen sich die Auswirkungen natürlicher Beanspruchungen auf die Eigenschaften von diffusionsoffenen Polyolefinbahnen für die Anwendungen im Bauwesen besser, d.h. gezielter erfassen. Damit kann ein entsprechender volkswirtschaftlicher und ökologischer Nutzen gezogen werden, da eine unsachgemäße Ausführung aber auch unausgereifte Bauprodukte häufig Ursache für Schäden im Bauwesen sind.

Die an den diffusionsoffenen Unterspannbahnen vorgenommenen Untersuchungen dienen der qualitativen Einschätzung einzelner Produkte, wodurch sich ein großer Teil der Bauschäden an Dachkonstruktionen künftig verhindern lässt. Zudem ist es bereits im Vorfeld möglich, hohe Gewährleistungskosten infolge eines bauteilbedingten Schadens zu vermeiden. Demnach erlaubt die entwickelte Langzeitfunktion durch eine bessere Beurteilung neu entwickelter Produkte hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit. Das zur Gewinnung der Materialparameter erforderliche Prüfprogramm leistet hierbei einen wichtigen Beitrag, Schwächen des Produkts aufzudecken und die Materialeigenschaften rechtzeitig vor der Markteinführung zu optimieren.

8.6 Ausblick

Die vorliegende Forschungsarbeit versteht sich als erster Schritt, um die Dauerhaftigkeit und das Langzeitverhalten diffusionsoffener Unterspannbahnen genauer zu prognostizieren. Dabei ergibt sich mit der gefundenen Langzeitfunktion die Möglichkeit, die Folieneigenschaften bei einer natürlichen Bewitterung einzustufen.

Die künstlichen Alterungsversuche müssen künftig derart modifiziert werden, dass für eine bestimmte Belastung bzw. Belastungskombination die Folien einer Alterung unterliegen, die einem definierten Alterungszeitraum (dieser kann aus der Langzeitfunktion entnommen werden) entspricht. Bei den modifizierten Prüfungen der künstlich beschleunigten Alterungen sind auch die Auswirkungen von Feuchtigkeit und Frost-Tau-Wechseln zu berücksichtigen.

Bezüglich der in der vorliegenden Arbeit gefundenen Langzeitfunktion muss weiterhin der Einfluss der Jahreszeiten und der jeweiligen geographischen Lage geklärt werden. So konnte mit dem Frühalterungsfaktor die natürliche Alterung der geprüften Unterspannbahnen vorausgesagt werden. Dabei ergab sich der Frühalterungsfaktor aus einer Alterung nach den Sommermonaten Juli, August und September. Nun ist

zu klären, ob es mit einem in den Wintermonaten bestimmten Frühalterungsfaktor ebenfalls möglich ist, das Langzeitverhalten einzustufen. Gleiches gilt für die geographische Lage des Versuchsstandortes, an dem der Faktor bestimmt wurde.

Im Hinblick auf die in der Praxis zu erwartenden Verhältnisse ist weiterhin von Interesse, welches baupraktische Alterungsverhalten die Unterspannbahnen unter einer Dachdeckung zeigen. Nimmt man die Wärmebeständigkeit der Folien als maßgebendes Kriterium für eine zutreffende Funktionserfüllung (unter der Dachdeckung tritt keine UV-Belastung auf), könnten alle in der vorliegenden Arbeit untersuchten Unterspannbahnen als baupraktisch geeignet eingestuft werden. Nach der Wärmelagerung zeigten sich sogar verbesserte Materialeigenschaften.

Dennoch ist zu bedenken, dass die Unterspannbahnen während der Bauphase einer UV-Bestrahlung ausgesetzt sind, die – wie die durchgeführten Untersuchungen gezeigt haben – bereits nach den ersten drei Monaten Freibewitterung einen erheblichen Rückgang der ursprünglichen Materialeigenschaften verursachen kann. Weiterhin ist deshalb auch das anschließende baupraktische Alterungsverhalten unter der Dachdeckung zu untersuchen. Insbesondere ist hierbei abzuklären, ob dann das weitere Altern der Unterspannbahnen mit Vorschädigung schneller oder langsamer erfolgt, oder unverändert bleibt.

Literatur- und Quellenverzeichnis

Normen und Vorschriften

- [1] DIN EN 86 (01-81): Prüfverfahren für Fenster: Prüfung der Schlagregendichtigkeit unter statischem Druck
- [2] DIN ISO 471 (02-98): Kautschuk und Elastomere: Normalklimate für die Konditionierung und Prüfung von Probekörpern
- [3] DIN EN ISO 527-1 (04-96): Kunststoffe: Bestimmung der Zugeigenschaften, Teil 1: Allgemeine Grundsätze
- [4] DIN EN ISO 527-2 (07-96): Kunststoffe: Bestimmung der Zugeigenschaften, Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen
- [5] DIN EN ISO 527-3 (10-95): Kunststoffe: Bestimmung der Zugeigenschaften, Teil 3: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln
- [6] DIN EN 832 (06-03): Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden; Berechnung des Heizenergiebedarfs; Gebäude; 1996
- [7] prEN 1296 (03-01): Bitumen-, Kunststoff- und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen: Verfahren zur künstlichen Alterung bei kombinierter Dauerbeanspruchung durch erhöhte Temperatur
- [8] prEN 1297 (08-99): Bitumen-, Kunststoff- und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen: Verfahren zur künstlichen Alterung bei kombinierter Dauerbeanspruchung durch UV-Strahlung, erhöhte Temperatur und Wasser
- [9] prEN 1931 (08-95): Abdichtungsbahnen: Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit
- [10] DIN EN 1928 (07-00): Bitumen-, Kunststoff- und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen: Bestimmung der Wasserdichtheit
- [11] DIN 4108-2 (03-01): Wärmeschutz im Hochbau; Wärmedämmung und Wärmespeicherung: Anforderungen und Hinweise für Planung und Ausführung

- [12] DIN 4108-3 (07-01): Wärmeschutz im Hochbau; Klimabedingter Feuchteschutz; Anforderungen und Hinweise für Planung und Ausführung
- [13] DIN 4108-4 (03-98): Wärmeschutz im Hochbau; Wärme- und feuchteschutztechnische Kennwerte
- [14] DIN 4108-5 (08-81): Wärmeschutz im Hochbau; Berechnungsverfahren
- [15] V DIN 4108-6 (06-03): Wärmeschutz im Hochbau; Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs von Gebäuden; Vornorm 1995-4 und Neufassung 2000
- [16] DIN 4108-7 (08-01): Wärmeschutz im Hochbau; Luftdichtheit von Bauteilen und Anschlüssen
- [17] DIN EN ISO 4661-1 (08-95): Elastomere: Herstellung von Proben und Probekörpern, Teil 1: Physikalische Prüfungen
- [18] DIN EN ISO 4892-2 (11-00): Kunststoffe: Künstliches Bewittern oder Bestrahlen in Geräten, Teil 2: Gefilterte Xenonbogenbestrahlung
- [19] DIN 7864-1 (04-84): Elastomer-Bahnen für Abdichtungen: Anforderungen, Prüfung
- [20] DIN EN ISO 12 572 (09-01): Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten: Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit
- [21] DIN EN 12 310-1 (11-99): Abdichtungsbahnen, Teil 1: Bitumenbahnen für Dachabdichtungen – Bestimmung des Weiterreißwiderstandes (Nagelschaft)
- [22] DIN EN 12 311-1 (11-99): Abdichtungsbahnen, Teil 1: Bitumenbahnen für Dachabdichtungen – Bestimmung des Zug-Dehnungsverhaltens
- [23] DIN EN 13 111 (08-01): Abdichtungsbahnen: Unterdeck- und Unterspannbahnen für Dachdeckungen und Wände: Bestimmung des Widerstandes gegen Wasserdurchgang
- [24] DIN EN 13 416 (09-01): Abdichtungsbahnen: Bitumen-, Kunststoff- und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen: Regeln für die Probenentnahme

- [25] prEN 13 859-1 (09-00): Definition und Eigenschaften von Unterdeck- und Unterspannbahnen: Unterdeck- und Unterspannbahnen für Dachdeckungen
- [26] prEN 13 859-2 (05-00): Definition und Eigenschaften von Unterdeck- und Unterspannbahnen: Unterdeck- und Unterspannbahnen für Wände
- [27] ISO 15 686-1 (09-00): Building and constructed assets – Service life planning – Part 1: General principles
- [28] ISO 15 686-2 (03-01): Building and constructed assets – Service life planning – Part 2: Service life prediction procedures
- [29] DIN 16 726 (12-86): Kunststoff-Dachbahnen, Kunststoff-Dichtungsbahnen: Prüfungen
- [30] DIN 50 035-1 (03-89): Begriffe auf dem Gebiet der Alterung von Materialien: Grundbegriffe
- [31] DIN 50 035-2 (04-89): Begriffe auf dem Gebiet der Alterung von Materialien: Polymere Werkstoffe
- [32] DIN 53 122-1 (11-74): Prüfung von Kunststoff-Folien, Elastomerfolien, Papier, Pappe und anderen Flächengebilden: Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit: Gravimetrisches Verfahren
- [33] DIN 53 504 (05-94): Prüfung von Kautschuk und Elastomeren: Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch
- [34] DIN 53 507 (03-83): Prüfung von Kautschuk und Elastomeren: Bestimmung des Weiterreißwiderstandes von Elastomeren: Streifenprobe
- [35] DIN 68 800-2 (05-96): Holzschutz; Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau
- [36] DIN 68 800-3 (04-90): Holzschutz; Vorbeugender chemischer Holzschutz
- [37] prEN 089030.2 (01-99): Hygrothermal Performance of Buildings: Determination of the Resistance to Wind-Driven Rain – Roof Systems with Discontinuously Laid Small Elements

- [38] VDI 3958 Blatt 1 (12-95): Umweltsimulation: Grundlagen und Methoden, VDI-Richtlinie
- [39] Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutz-Verordnung) vom 16. August 1994, BGBl. I, 55 S. 2121 - 2132

Fachbücher und -artikel

- [40] Achtziger, J./Cammerer, J.: Bewertung von diffusionsoffenen Unterspannbahnen für nichtbelüftete geneigte Dächer. Forschungsbericht des Forschungsinstituts für Wärmeschutz (FIW) München, 1998
- [41] Achtziger/Cammerer/Alberti: Ermittlung der Luftdurchlässigkeit von Bauteilen. Forschungsbericht des Forschungsinstituts für Wärmeschutz (FIW) München, 2000
- [42] Affolter, S.: Langzeitverhalten von Thermoplasten. Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs (NTB), Schweiz
- [43] Arndt, H.: Instandsetzung von einschaligen Dächern mit feuchter Wärmedämmung. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, 4. Jahrgang, S. 255-269 (1998)
- [44] Beer, H.-R./Keiser, St.: Flexible Polyolefin Roofing Membranes: Ten Years of Field Experience. Proceedings of the Eleventh Congress of International Waterproofing Association, Florence, Italy, October 2000
- [45] Beer, H.-R.: Longevity and Ecology of Polyolefin Roof Membranes. Proceedings of the Forth International Symposium on Roofing Technology, Pg. 14-20, Gaithersburg, Md., USA 1999
- [46] Breckner, F.: Tauwasserbildung an Dach und Decke. IRB-Literaturauslese (3036), 1. Auflage, IRB-Verlag 1990
- [47] Cammerer, J./Alberti, R.: Untersuchungen an Unterdeck- und Unterspannbahnen, wksb 45/2000, S. 11-16, München 2000
- [48] Cziesielski, E.: Lehrbuch der Hochbaukonstruktionen. B.G. Teubner Verlag, Stuttgart

- [49] Deutsches Dachdeckerhandwerk – Regelwerk: Merkplatt für Unterdächer, Unterdeckungen und Unterspannungen. Zentralverband des Deutschen Dachdeckerhandwerks (ZVDH) – Fachverband Dach-, Wand- und Abdichtungstechnik – e.V., Ausgabe September 1997, Rudolf Müller
- [50] Deutsches Dachdeckerhandwerk – Regelwerk: Merkplatt Wärmeschutz bei Dächern. Zentralverband des Deutschen Dachdeckerhandwerks (ZVDH) – Fachverband Dach-, Wand- und Abdichtungstechnik – e.V., Ausgabe September 1997, Rudolf Müller
- [51] Dominghaus, H.: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften. 4. Auflage, VDI Verlag, Düsseldorf 1992
- [52] Dreyer/Bednar/Jachan: Untersuchung des feuchtetechnischen Verhaltens verschiedener Dachkonstruktionen. Forschungsbericht TU Wien, 2002
- [53] Fellner, R. L.: Accelerated Aging: Photochemical and Thermal Aspects. The Getty Conservation Institute, Los Angeles 1994
- [54] Frank, F.: Belüftung geneigter Dächer. IRB-Literaturauslese (1528), 3. Auflage, IRB-Verlag 1992
- [55] Frey, R., Funk, D.: Kristallisationseigenschaften von unterschiedlich witterungsbeständigen PVC-beschichteten Polyestergeweben. arcus 1985
- [56] Frey, R., Kirbus, K.: Photometrisches Verfahren zur Verfolgung von Kunststoffnachhärtungen. arcus 1985
- [57] Frey, R., Münsch, R.: Abhängigkeit der Lichtdurchlässigkeit vom Trübungsverlauf bei PVC-beschichteten Geweben. Kunststoffe 73, Hanser Verlag 1983
- [58] Frey, R., Münsch, R.: Einstufung der Wetterbeständigkeit vergleichbarer PVC-beschichteter Polyestergewebe mittels optisch verfolgtem Zeitraffertest. Kunststoffe 72, Hanser Verlag 1982
- [59] Frey, R.: Luftverschmutzung und Alterung PVC-reicher Gewebebeschichtungen. Bautenschutz und Bausanierung, 9. Jahrgang

- [60] Frey, R.: Untersuchung des Alterungsverhaltens PVC-beschichteter Polyestergewebe. 3. Internationales Symposium „Weitgespannte Flächentragwerke“, Stuttgart 1985
- [61] Garden, G.K.: CBD-70: Thermal Considerations in Roof Design. Canadian Building Digest NRC, 2001
- [62] Glück, L./Poschet, G.: Einfluss von Temperatur und Beregnung auf das Alterungsverhalten von PVC im Vergleich von künstlicher Bewitterung und Freibewitterung. Kunststoffe 72 (1982) Heft 6, Hanser Verlag
- [63] Großkinsky, Th./Gottschling, H./Sedlbauer, K./Leimer, H.-P.: Durchfeuchtungsgefahr bei nicht ausgebauten Dachgeschossen. IBP-Mitteilung 379 (2000)
- [64] Grossman, G.W.: Correlation of Laboratory to Natural Weathering. Presentation at the 20th Cleveland Society for Coatings Technology Symposium 1977
- [65] Hardcastle III, H.K.: Variables, Methods and Philosophies Considered in Coatings Durability. Atlas Weathering Services Group, Atlas Electric Divices Co.
- [66] Herlyn, J.W.: Simulationsmodelle für Gebrauchstauglichkeitsuntersuchungen von Holzbauteilen durch künstliche Bewitterung. Bauphysik 24 (2002), Heft 3, Ernst & Sohn
- [67] Holm, A./Künzel, H.-M.: Feuchtetechnisches Verhalten von Holzsparren bei einer Dachsanierung von außen. IBP-Mitteilung 370 (2000)
- [68] Hupfer, P./Kuttler, W.: Witterung und Klima. 10. Auflage, B.G. Teubner-Verlag, Stuttgart 1998
- [69] Kämpf, G.: Charakterisierung von Kunststoffen mit physikalischen Methoden. Hanser Verlag, 1994
- [70] Kämpf, G.: Industrielle Methoden der Kunststoff-Charakterisierung. 1. Auflage, Hanser Verlag, München 1996
- [71] Keiser, St.: Prognose der Nutzungsdauer von Bauprodukten. SchweizerBau-Journal, 1999

- [72] Keller, T.: Untersuchung extrem diffusionsoffener Unterspannbahnen. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Baukonstruktion und Bauphysik, BTU Cottbus 1998
- [73] Kinsella, J.: Performance of Roofing Membranes. Consultec Report, 12/2000
- [74] Klopfer, H.: Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen. Bauverlag GmbH 1974
- [75] Krus, M., Fitz, C.: Bestimmung des Diffusionswiderstandes extrem diffusions-offener Folien. IBP-Mitteilung 327, 27 (2000)
- [76] Künzel, H.-M./Sedlbauer, K.: Konstruktive Ausbildung von Bauteilen und Gebäuden unter besonderer Beachtung bauphysikalischer Kriterien: Steildächer. Bauphysik Kalender 2001, 1. Jahrgang, Ernst & Sohn 2001
- [77] Künzel, H.-M.: Feuchteschutz unbelüfteter Steildächer – Vereinbarkeit von DIN 68 800-2 und des Neuentwurfs der DIN 4108-3 aus bauphysikalischer Sicht. Vortrag zum Holzbautag der DGfH in Friedrichshafen am 5. Mai 2000
- [78] Künzel, H.-M.: Außen dampfdicht, vollgedämmt? bauen mit holz 8/98
- [79] Kwasny-Echterhagen, R.: Dauerhaftigkeit und Langzeitverhalten von Kunststoffen im Bauwesen. 1. Auflage, Verlag Mainz – Wissenschaftsverlag, Aachen 1993
- [80] Leimer, H.-P.: Diffusionsoffene Unterspannbahnen auf Vlies Basis. Bauen mit Holz 3/95
- [81] Leimer, H.-P.: Feuchteentwicklung in geneigten Dachsystemen: Einsatz von hochdiffusionsoffenen Unterspannbahnen – Vergleich zwischen Versuch und Berechnung. unveröffentlichter Aufsatz
- [82] Leimer, H.-P.: Reduktion von Bauschäden, hochdiffusionsoffene Unterspannbahnen. Bausubstanz 5/95
- [83] Leimer, H.-P.: Unterspannbahnen – der wahre s_d -Wert. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 1/98

-
- [84] Leu, Kurt W.: Alterungsverhalten von thermoplastischen Polymerwerkstoffen. AC-Laboratorium Spiez, 1996
- [85] Liersch, K.W.: Bauphysik kompakt: Wärme- und Feuchteschutz. Bauwerk Verlag Berlin 2001
- [86] Liersch, K.W.: Bauphysikalische Anforderungen an wärme gedämmte Dächer: Wärme- und Feuchteschutz. Der Dachdeckermeister Nr. 2/1998
- [87] Liersch, K.W.: Folien im wärme gedämmten Dach. Der Dachdeckermeister 5/1999
- [88] Liersch, K.W./Jaspers, D.: Eine einfache Methode zur Bestimmung realitätsnaher s_d -Werte von extrem diffusionsoffenen Unterspannbahnen in Anlehnung an DIN 52 615. Forum der Forschung 4, 1996, BTU Cottbus
- [89] Liersch, K.W./Schelisch, J.: Methoden zur Bestimmung des s_d -Wertes von extrem diffusionsoffenen Materialien. Bauphysik 24 Heft 03/2002, Ernst & Sohn Berlin
- [90] Liersch, K.W.: Belüftete Dach- und Wandkonstruktionen; Band 3, Dächer: Bauphysikalische Grundlagen des Wärme- und Feuchteschutzes. Bauverlag Wiesbaden und Berlin 1986
- [91] Liersch, K.W.: Belüftete Dach- und Wandkonstruktionen; Band 4, Dächer: Anwendungstechnische Grundlagen. Bauverlag Wiesbaden-Berlin 1990
- [92] Liersch, K.W.: Trocknungsvorgänge in hölzernen Dachkonstruktionen. Der Dachdeckermeister 08/1999
- [93] Liersch, K.W.: Vollsparrendämmung am geneigten Dach. bauzeitung 47 (1993)
- [94] Liersch, K.W.: Wärme gedämmte Dachschrägen: Belüftet oder unbelüftet? DBZ 2/91
- [95] Nentwig, J.: Kunststoff-Folien: Herstellung – Eigenschaften – Anwendung. 2. Auflage, Hanser Verlag, München 2000

- [96] Rieche, G.: Dauerhaftigkeit der Kunststoffabdichtungsbahn Sarnafil T. Kurzbericht zum Gutachten über die Dauerhaftigkeit der Kunststoffabdichtungsbahnen für Dächer vom Typ Sarnafil TS und Sarnafil TG, Institut für Bauteenschutz, Baustoffe und Bauphysik, Fellbach 2000
- [97] Roedel, W.: Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre. 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin 2000
- [98] Schöllner, A.: Dampfdiffusion bei Dächern, Band 2. IRB-Literaturauslese (2867), 1. Auflage, IRB-Verlag 1989
- [99] Schöllner, A.: Dampfdiffusion bei Dämmstoffen und Dichtstoffen. IRB-Literaturauslese (1203), 2. Auflage, IRB-Verlag 1989
- [100] Schulze, H.: Dämmstoffe und Folien im Holzbau: Die Bedeutung des Austrocknungsvermögens von Holzbauteilen. bauen mit holz 6/98
- [101] Schulze, H.: Geneigte Dächer ohne chemischen Holzschutz auch ohne Dampfsperre? bauen mit holz 8/92
- [102] Schulze, H.: Hausdächer in Holzbauart: Konstruktion, Statik, Bauphysik. Werner Verlag 1987
- [103] Seckmeyer, G.: Die genaue Messung und Simulation der solaren UV-Strahlung. Fraunhofer-Institut Atmosphärische Umweltforschung, Garmisch-Partenkirchen, Shaker-Verlag Aachen 1998
- [104] Sedlbauer, K./Grosskinski, Th./ Künzel , H.M.: Die Noppe auf das Dach! Noppenbahnen lassen Satteldächer gut austrocknen. IBP-Mitteilung 399, 29 (2002)
- [105] Sedlbauer, K./Grosskinski, Th.: Freilanduntersuchungen bestätigen: Auch gering belüftete Flachdächer trocknen aus. IBP-Mitteilung 400, 29 (2002)
- [106] Spetz, G.: Improving Precision of Rubber Test Methods: Part 2 – Ageing. Polymer Testing 13, 1994
- [107] Stauch, D.: Unterdächer, Unterdeckungen und Unterspannungen im ausgebauten Dach – Neue Beurteilungskriterien. Bundesbauplatt, Heft 5/97

- [108] Stocklas, K.: Luftschicht in der Gebäudehülle. IRB-Literaturauslese (1232), 1. Auflage, IRB-Verlag 1986

- [109] UEAtc: Technical Guide for the Assessment of Discontinuous Roofing Underlay Systems. BBA 2002

- [110] Weber, C.: Steildachkonstruktionen: Einwandfrei schadensfrei. Das Dachdeckerhandwerk, Heft 8/2002, Rudolf Müller Verlag

- [111] Weber, C.: Unterdeckung: die Qual der Wahl. Das Dachdeckerhandwerk, Heft 10/2002, Rudolf Müller Verlag

- [112] Wolfseher, R./Rechsteiner, A.: Lebenserwartung der Kunststoffabdichtungsbahn Sarnafil T. Beurteilung der Wolfseher und Partner AG, Technologiezentrum Adliswil

Anhang A: Übersicht am Markt erhältlicher Unterspann-/Unterdeckbahnen (Stand Juni 2003)

Tabelle A
Übersicht am Markt erhältlicher Unterspann-/Unterdeckbahnen (Stand Juni 2003)

Hersteller / Vertreiber	Produktname	Materialverbund	Gewicht g/m ²	Reissfestigkeit längs/quer N/5cm	Nagelausreissfestigkeit längs/quer N/5cm	Brand- verhalten	Wassersäule mm H ₂ O	s _d m	WDD g/m ² /d	UV- Stabilität	Temperatur- beständigkeit
Allform	lifo-Top light pro S										
Alujet	Alujet-Difujet	3-Lagen PP	135	190/150	170	B2	> 4000	0,15	260	2 Mon.	bis + 80
Aprithan	Diffucell	3-Lagen PP/PP/PP					> 10000			4 Mon.	"hoch"
Bauder	Bauder TOP SD 02	Vlies/Folien	160	280/200	130	B2		< 0,2		4 Mon.	
Bauder	Bauder TOP DIFUTEX	Vlies/Polymertbitumen						> 0,2			
Bauder	Bauder TOP DIFUBIT	Vlies/Polymertbitumen	400	450/400	250	B2		< 0,2			
BDT	Poly-Wrap	2-Lagen	160								
Blowitex	EURO-TOP	3-Lagen PP/PE/PP	160	250/180	> 110	B2	> 1000	0,05	1000	3 Mon.	bis + 100
Blowitex	EURO-TOP light	3-Lagen PP/PE/PP	130	200/125	100/135/(10 cm)	B2	> 1000	0,05	1000	3 Mon.	bis + 80
Blowitex	EURO-MAX	3-Lagen PP/PE/PP	190	> 1000	> 400	B2	> 800	0,05	1000	3 Mon.	bis + 100
Braas	Divoroll Pro	2-Lagen PP	95	210/145	95/85	B2	> 1500	0,013	1200	> 4 Mon.	bis + 80
Braas	Divoroll Light	2-Lagen PP	100	200/130	90/80	B2	> 1500	0,02	1200	4 Mon.	bis + 80
Braas	Divoroll Universal	3-Lagen PP	125	310/200	130/120	B2	> 3000	0,03	1000	4 Mon.	bis + 80
Braas	Divoroll	3-Lagen PP	160	210/115	90/80	B2	400	0,08		> 6 Mon.	bis + 80
Braas	Divoroll Top	Mehrlagen PP	195	400/230	185/160	B2	> 2500	0,034	800	> 4 Mon.	bis + 80
BWK	Difflex USB	2-Lagen PUR/PP-Vlies	100		100	B2		0,01			
BWK	Difflex USB pro S	2-Lagen PUR/PP-Vlies	130	210/170	> 100	B2		< 0,01			
BWK	Difflex 100	2-Lagen PUR/PP-Vlies	120	230/175		B2		0,05	700	3 Mon.	bis + 80
BWK	Bekafol	2-Lagen PUR/PP-Vlies	160	180/240	100	B2		0,02	1200	6 Mon.	bis + 80
BWK	Rewasil-Top	3-Lagen PP/?/PP	140	170/130	110	B2	> 1000	0,01	2500	6 Mon.	bis + 80
BWK/trobatec	trobafol	2-Lagen PUR/PP-Vlies									
Caplast	Valmex Divu Top L	2-Lagen PE/PP	85	450/280	150	B2	> 1500	0,02	680		bis + 80

Tabelle A
 Übersicht am Markt erhältlicher Unterspann-/Unterdeckbahnen (Stand Juni 2003), Fortsetzung

Hersteller / Vertreiber	Produktname	Materialverbund	Gewicht g/m ²	Reissfestigkeit längs/quer N/5cm	Nagelausreissfestigkeit längs/quer N/5cm	Brand- verhalten	Wassersäule mm H ₂ O	s _d m	WDD g/m ² /d	UV- Stabilität	Temperatur- beständigkeit
Capiast	Valmex Divu Top SR	2-Lagen PA/PES-Vlies	125	200/200	170/170	B1	> 2000	0,1		3 Mon.	bis + 90
Capiast	Valmex Divu Top XL	2-Lagen PA/PES-Vlies	170	320/320	130/130	B1	> 2000	0,15	130	3 Mon.	bis + 90
Capiast	Valmex Divu Top M 170	3-Lagen PP/PP/PP	150	210/160	120/160	B2	> 4000	0,04	515	3 Mon.	bis + 80
Capiast	Valmex Divu Top M 170	3-Lagen PP/PP/PP	155	200/205	120/140	B2	> 2000	0,04		3 Mon.	bis + 80
Capiast	Valmex Divu Top M 170	3-Lagen PP/PP/PP	170	200/200	100/100	B2	> 2000	0,1		3 Mon.	bis + 80
Capiast	Valmex Top TVB 190	3-Lagen gitterverstärkt	170	400/400	200/200	B2	> 2000	5	120	3 Mon.	bis + 80
Clever Top	AirTex duo	2-Lagen	90	180/130	95/75	B2	> 1500	0,02	1300	4 Mon.	bis + 80
Clever Top	AirTex smart	3-Lagen PP/PE/PP	125	225/150	100/125	B2	> 1500	0,02	1200	4 Mon.	
Clever Top	Difutec	2-LagenPUR/Schaum	200			B2	< 1500	0,14		1 Mon.	bis + 100
Dörken	Tyvek Plus	2-Lagen PP/HDPE	130	350	150	B2		0,02		4 Mon.	bis + 100
Dörken	Delta-Tekt S	HDPE/PE-armiert	85	300	100/(10cm)	B2	"dicht"	0,02			bis + 80
Dörken	Delta-Dinofol	2-Lagen PP/PP	90	190/130		B2	"dicht"	0,15		4 Mon.	bis + 80
Dörken	Delta-Dinofol S	3-Lagen PP	115	210/155		B2	"dicht"	0,02			
Dörken	Delta-Vent N	3-Lagen PP	120								
Dörken	Delta-Fizz (-Vent S)	3-Lagen PP	140	250/200		B2	"dicht"	0,15		4 Mon.	bis + 80
Dörken	Delta-Solar	3-Lagen PP	165	250/200		B2	"dicht"	0,02		3 Mon.	bis + 80
Dörken	Delta-Purafol	PES-Vlies/PU-Schicht	190	350		B1	"dicht"	0,16			
Dörken	Delta-Maxx/Maxx- Plus	PES-Vlies/PU-Schicht	190	350		B2	"dicht"	0,15			bis + 80
Dörken	Delta-Foxx	PES-Vlies/PU-Schicht	220	250		B2	"dicht"	0,02		6 Mon.	bis + 100
Dörken	Delta-Fol PVG	3-Lagen PP	185/210	300/270		B1	"dicht"	3		6 Mon.	bis + 80
Dörken	Tyvek Soft	einlagig HDPE	60	140		B2	> 1000	0,02		4 Mon.	bis + 100
Dörken	Tyvek Solid	einlagig HDPE	80	250		B2	> 2000	0,03		4 Mon.	bis + 100

Tabelle A
Übersicht am Markt erhältlicher Unterspann-/Unterdeckbahnen (Stand Juni 2003), Fortsetzung

Hersteller / Vertreiber	Produktname	Materialverbund	Gewicht g/m ²	Reissfestigkeit längs/quer N/5cm	Nagelausreissfestigkeit längs/quer N/5cm	Brand- verhalten	Wassersäule mm H ₂ O	s _d m	WDD g/m ² /d	UV- Stabilität	Temperatur- beständigkeit
Dörken	Tyvek Primo	3-Lagen PP	120	220/170		B2	> 3000	0,02		4 Mon.	bis + 100
Du Pont	Tyvek Pro	3-Lagen PP		220/190(2 DIINI)		B2	1500	0,02		4 Mon.	bis + 100
Du Pont	Tyvek Universal	3-Lagen PP	130	250/190		B2	> 3000	0,02		4 Mon.	bis + 100
Du Pont	Tyvek Supro	2-Lagen PP/HDPE	155	340	115/115	B2	> 2000	0,03		4 Mon.	bis + 100
Du Pont	Tyvek Aktiv Membran	k.A.									
Du Pont	Tyvek X3	k.A.									
EBC	Nicofoil HP Multi	2-Lagen	118	180/150		B2	> 1000	0,13			
Förch	Aqua-Protect	2-Lagen PAC/PP	> 150	170/140		B2	> 1500	0,05	> 1000	3 Mon.	bis + 120
Griltex	Ultradif Classic	2-Lagen PP/PP	95	210/145	95/85	B2		0,013	1350	3 Mon.	
Griltex	Ultradif Yellow/Grey	3-Lagen	105	190/135	80/70		> 2000		1500		bis + 80
Griltex	Ultradif Master	3-Lagen PP/PP/PP	120	310/200	130/120	B2		0,017	1445	3 Mon.	
Griltex	Ultradif Top	2-Lagen	150	160/135	90/90		1000				bis + 80
Griltex	Griltex Ultradif	2-Lagen PE	150	320		B2	> 800	0,05		3 Mon.	bis + 80
hagebau	Unterdeckbahn	2-Lagen PP/PAC	> 150	170/140		B2	1500	0,05		3 Mon.	bis + 80
HAUSProfi	TOP-Stream light	2-Lagen PP	105	150/120	180 DIN (54301)	B2	> 1500	0,027	800	3 Mon.	bis + 80
HAUSProfi	Top Roof 2	2-Lagen PP/PE	140		110	B2	> 1000	0,04	1000	3 Mon.	bis + 100
HAUSProfi	TOP-Stream	3-Lagen PP/TPEE/PP	150	250/200	200(DIN 54301)	B2	> 4000	0,11	330	3 Mon.	bis + 80
HAUSProfi	Top Roof 3	3-Lagen PP/PE/PP	160		150	B2	> 1500	0,05	1000	3 Mon.	bis + 100
HAUSProfi	Tyvek solid	HDPE	80		240	B2	"dicht"	0,02		4 Mon.	bis + 100
HAUSProfi	Tyvek supro	2-Lagen PP/HDPE	155	340	110	B2	> 2000	0,03		4 Mon.	bis + 100
Isola-Platon	Isola Top	2-Lagen PP/PP	95	200/150		B2	"dicht"	0,02	1350	4 Mon.	bis + 80
Isola-Platon	Isola Top Extra	3-Lagen PP/PP/PP	160	300/210		B2	"dicht"	0,01	1350	4 Mon.	bis + 80
IVT	Aqua Protect	2-Lagen PAC/PP	120	170/140		B2	1500	0,05	1000	3 Mon.	bis + 120
Jafoplast	jafo TEC	2-Lagen PE/PE-Glitter	85	270	75	B2	1250	0,04		4 Mon.	bis + 80
Jafoplast	jafo TOP-D	2-Lagen PP/PP				B2		0,1			
Jafoplast	jafo TOP-M	3-Lagen PP/PP/PP				B2		0,1			
Klöber	Permo classic	3-Lagen PP/PP/PP	100	220/145	110/145	B2	> 1500	0,02	1200	4 Mon.	bis + 80

Tabelle A
Übersicht am Markt erhältlicher Unterspann-/Unterdeckbahnen (Stand Juni 2003), Fortsetzung

Hersteller / Vertreiber	Produktname	Materialverbund	Gewicht g/m ²	Reissfestigkeit längs/quer N/5cm	Nagelausreissfestigkeit längs/quer N/5cm	Brand- verhalten	Wassersäule mm H ₂ O	s _d m	WDD g/m ² /d	UV- Stabilität	Temperatur- beständigkeit
Klöber	Permo easy	3-Lagen PP/PP/PP	120	225/150	115/125	B2	> 1500	0,02	1200	4 Mon.	bis + 80
Klöber	Permo easy H	3-Lagen PP/PP/PP	125	225/170	125/155	B2	> 1500	0,02	1200	4 Mon.	bis + 80
Klöber	Permo forte	3-Lagen PP/PP/PP	165	350/290	175/130	B2	> 1500	0,02	1200	4 Mon.	bis + 80
Klöber	Permo light	3-Lagen PP/PP/PP	140	180/160	100	B2	> 1500	0,02	1200	4 Mon.	bis + 80
Klöber	Tyvek HD-Dry	HDPE	60		70	B2	> 1000	0,02	1200	4 Mon.	bis + 100
Klöber	Tyvek HD-Soft	HDPE	60		70	B2	> 1000	0,02	1200	4 Mon.	bis + 100
Klöber	Tyvek HD-Pus	2-Lagen PP/HDPE	130		150	B2	> 1000	0,02	1200	4 Mon.	bis + 100
Lenzing	Lenzingtex DO 121	3-Lagen PP/PE/PUR	120	250	200		> 6000	0,02	300		bis + 80
Lenzing	Lenzingtex DO 140	Mehrlagen/armiert	140	600	450	B1	> 6000	0,02	200		bis + 80
Lohrunner	LOFA-TOP	3-Lagen PP/PP/PP	135	250		B2	> 800	0,02			
MAGE	AirTex Gitterfolie	PE-Folie armiert, MP	120	350	> 120	B1	200	2,5		3 Mon.	bis + 80
MAGE	AirTex Trend	3-Lagen PP/PE/PP	105	160/115	130/130	B2	> 1500	0,02	1200	2 Mon.	bis + 80
MAGE	MAGE-TOP S	3-Lagen PP/PP/PP	120	200/150	40/50	B2	2000	0,015	980	3 Mon.	bis + 80
MAGE	AirTex smart S2	3-Lagen PP/PE/PP	140	180/160	100	B2	> 1500	0,02	1200	4 Mon.	bis + 80
MAGE	AirTex TOP M	3-Lagen PP/PP/PP	160	365/520	165(10cm)	B2	1800	0,049	1000	3 Mon.	bis + 100
MAGE	AirTex Pro	3-Lagen PP/PP/PP	170	280/240	190/200	B2	> 2500	0,02	1200	4 Mon.	bis + 80
MAGE	AirTex TOP X	3-Lagen PP/PP/PP	160	330/210	290	B2	> 2000	0,01	1350	3 Mon.	bis + 80
MAGE	AirTex DuoBit	2-Lagen PES/Bitumen		406/369	186/168	B2		18			
Nögel	Nogo-Divu-top	2-Lagen armiert	85	400/280	150	B2	> 1500	0,02			
Nögel	Nogo Fol	2-Lagen PE/armiert, MP	110	375/275		B1			60		bis + 80
Nögel	Nogo-tex Diffusionsfolie	Folie armiert	110	400	150	B1		0,26			
Nögel	Silista-light	3-Lagen PP/PP/PP	100	170/130	140	B2	> 2000	0,02			
Pavatex	Ampatop T2	3-Lagen				B2	> 10000	0,01			
Pavatex	Sisalit 353	2-Lagen gitterverstärkt	255			B2		0,09	250	10 Tage	
Pavatex	Ampatex SB 100	2-Lagen PP/PP	130	240/240	B2			25		4 Mon.	
Peter von Ohle	Divu-Blue										

Tabelle A
Übersicht am Markt erhältlicher Unterspann-/Unterdeckbahnen (Stand Juni 2003), Fortsetzung

Hersteller / Vertreiber	Produktname	Materialverbund	Gewicht g/m ²	Reissfestigkeit längs/quer N/5cm	Nagelausreissfestigkeit längs/quer N/5cm	Brand- verhalten	Wassersäule mm H ₂ O	s _d m	WDD g/m ² /d	UV- Stabilität	Temperatur- beständigkeit
PROFI TEAM	Difolen	2-Lagen PP/PP-Vlies	90	180/130	190/150 (10cm)	B2	"dicht"	0,02		3 Mon.	bis + 80
PROFI TEAM	Difolen	2-Lagen PP/PP-Vlies	105	160/115	145/140(10cm)	B2	"dicht"	0,02			
PROFI TEAM	Difolen S	3-Lagen PP/PP/PP	120	220/155	190/150(10cm)	B2	"dicht"	0,02			
PROFI TEAM	Difolen Plus	3-Lagen PP/PP/PP	135	230/180	(113/83)	B2	"dicht"	0,02			
PROFI TEAM	Difolen Plus	3-Lagen PP/PP/PP	140	250/220	270/250(10cm)	B2	"dicht"	0,03			
PROFI TEAM	OWOLEN	3-Lagen Glitterarmiert	155	400		B2	"dicht"	3			
pro clima	Solitex Plus	2-Lagen PP						0,1			
pro clima	Solitex Ultra							0,1			
pro clima	Solitex										
pro clima	Solitex DU	3-Lagen PP						0,1			
raab karcher	fix 100	3-Lagen PP/PP/PP	115	251/180	220/200(10cm)	B2	> 1500	0,02	1300	4 Mon.	
raab karcher	fix 200	3-Lagen PP/PP/PP	135	250/200	250/220(10cm)	B2	> 1500	0,02	1300	4 Mon.	
raab karcher	fix 300	3-Lagen PP/PP/PP	160	350/280	350/250(10cm)	B2	> 1500	0,02	1300	4 Mon.	
Ravago	Tyvek HD-DUO- PLUS	3-Lagen PP/HDPE/PP			> 315	B1	1000	0,02		4 Mon.	
R+R Coating	DRY-FLEXX	2-Lagen PP/PAC	140	230/175		B2	> 1500	< 0,05	1000	3 Mon.	bis + 120
Samafil	TU 108-05	3-Lagen						0,05			
Samafil	TU 111-05	3-Lagen	200	380	(450/CEN)			0,02			bis + 70
Scherf	Abustar	3-Lagen PP	130	170/130	30/40	B2	> 2000	0,01		3 Mon.	
Scherf	Abustar	3-Lagen PP	160	220/215	52/59	B2	> 2000	0,01		3 Mon.	
Tectothern	Tectothern-D	HDPE glitterverstärkt	90	300		B2	> 2000	0,02	1000	3 Mon.	bis + 80
Tectothern	Tectothern-Top	2-Lagen PP/PP	100	210/150		B2	> 2000	0,02	1350	4 Mon.	bis + 80
Tectothern	Tectothern-Lite	3-Lagen PP/PP/PP	105	160/100	130/130(10cm)	B2	> 1500	0,02		2 Mon.	bis + 80
Tectothern	Tectothern-Top 2000	3-Lagen PP/PP/PP	125	290/210	240/220(10cm)	B2	> 2000	0,02		4 Mon.	bis + 80
Tectothern	Tectothern-Xtra L	3-Lagen PP/PP/PP	140	270/180	250/220(10cm)	B2	> 4000	0,02		4 Mon.	bis + 80
Tectothern	Tectothern-Xtra L	3-Lagen PP/PP/PP	160	380/280	330/240(10cm)	B2	> 4000	0,01	1350	4 Monate	bis + 80
Tectothern	Tectothern H		195					3			
Texbond		2-Lagen PP									

Tabelle A
Übersicht am Markt erhältlicher Unterspann-/Unterdeckbahnen (Stand Juni 2003), Fortsetzung

Hersteller / Vertreiber	Produktname	Materialverbund	Gewicht g/m ²	Reißfestigkeit längs/quer N/5cm	Nagelausreißfestigkeit längs/quer N/5cm	Brand- verhalten	Wassersäule mm H ₂ O	s _d m	WDD g/m ² /d	UV- Stabilität	Temperatur- beständigkeit
trobatec	siehe Produkte BWK										
UNIElektronik	Riso-Tec 3S	3-Lagen	130								
UNIElektronik	Riso-Tec DS Extra	3-Lagen PP/PE/PP	130	275/230		B2	1500	0,02	1200		
UNIElektronik	Riso-Tec DS Plus	3-Lagen PP/PE/PP	160	365/520	160	B2	1770	0,049	827		
UNIElektronik	Riso-Tec M	HDPE gitterverstärkt	85	250/265	80	B2	> 2000	0,04	850		
UNIElektronik	Riso-Tec Plus	3-Lagen PP/PUR/PES	160	225	100	B1	> 4000	0,02	1500	3 Monate	
UNIElektronik	Riso-Top-Skin	PES-Vlies/Bitumen(talk.)		120/160	170/150			0,48			
UNI- Trockenbau	divu-star	2-Lagen PP-Gewebe	135	600	450	B1		0,25			
UNI- Trockenbau	divu-star 200 S						> 6000				
UNIBautechnik	divu-star 250 S										
UNIBautechnik	divu-star 700 S	PP-Glitter	140	500/600	550(DIN 54301)	B1	> 6000	0,21		8 Wochen	bis + 80
UNIBautechnik	UNI SX 550	mod. Bitumen, besandet									
Van Besouw	WDM Pink	2-Lagen Vlies/Polymer	300	200	80	B2	> 7000	0,5			
Vedag	Tegula	3-Lagen									
Vedag	Vedaform Fun	3-Lagen PP/PE/PP	140	180/160	100	B2	> 1500	0,02	1200	4 Monate	bis + 80
Vedag	Vedaform S										
Vedag	Vedaform KB-S										
Vedag	Vedaform KB-S KSK										
Wanit	Refatop	3-Lagen PP	160	295/225	125/115	B2	> 2500	0,01	4000	3 Monate	
Wanit	Refatop magic	3-Lagen PP	120	190/130	30/40	B2	6800	0,01			
Web Dynamics	Izotop 95	3-Lagen PP	95	190/140	190/150(ÖNB 3690)	B2	> 1500	>0,02	> 1300	4 Monate	
Web Dynamics	WEB 9	3-Lagen	100	190/130	190	B2	> 1500	0,02		2 Monate	

Tabelle A
Übersicht am Markt erhaltlicher Unterspann-/Unterdeckbahnen (Stand Juni 2003), Fortsetzung

Hersteller / Vertreiber	Produktname	Materialverbund	Gewicht g/m ²	Reissfestigkeit längs/quer N/5cm	Nagelausreissfestigkeit längs/quer N/5cm	Brand- verhalten	Wassersäule mm H ₂ O	s _d m	WDD g/m ² /d	UV- Stabilität	Temperatur- beständigkeit
Web Dynamics	WEB 10	3-Lagen	100	210/180	220	B2	> 1500	0,02		4 Monate	
Web Dynamics	WEB 76	3-Lagen	115	210/170	190	B2	> 1500	0,02		2 Monate	
Web Dynamics	Wiekor 10	3-Lagen PP	115	215/(155 e.M.)	220(60-65 e.M.)	B2		0,02	> 1300	4 Monate	bis + 80
Web Dynamics	WEB 77	3-Lagen	125	250/190	200	B2	> 1500	0,02		2 Monate	
Web Dynamics	Protect VP 300	3-Lagen	130	300/190(e.M.)	104/94(e.M.)	B2		0,02		3 Monate	
Web Dynamics	Wiekor 11	3-Lagen PP	135	250/(200e.M.)	250(90-100e.M.)	B2		0,02	> 1300	4 Monate	bis + 80
Web Dynamics	WEB 11	3-Lagen	135	270/250	270	B2	> 3500	0,02		4 Monate	
Web Dynamics	WEB 55	3-Lagen	145	300/260	270	B2	> 3500	0,02		4 Monate	
(Web Dynamics)	Diffu-light-S	3-Lagen PP	160	335/235(e.M.)		B2		0,02			
Würth	Wüttop DU 10	Mehrlagen/armiert	120	250	200	B2	> 5000	0,1	400	6 Wochen	bis + 80

Anhang B: Eigenschaftsmatrix am Markt erhaltlicher Unterspann-/Unterdeckbahnen

Tabelle B
Eigenschaftsmatrix am Markt erhaltlicher Unterspann-/Unterdeckbahnen

Produktname	Anzahl der Lagen			Gewicht in g/m ²		Reißfestigkeit in N/5 cm			Nagelausreißfestigkeit in N/5 cm			Wassersäule in mm			s ₀ -Wert in m				
	1	2	≥ 3	≤ 105	106 - 175	> 175	≤ 150	151 - 350	> 350	≤ 150	151 - 350	> 350	≤ 1000	1001 - 3000	> 3000	≤ 0,02	0,03 - 0,20	> 0,20	
Ilfo-Top light pro S																			
Alujet-Difujet			X		X		X				X				X				
Diffucell			X											X					
Bauder TOP SD 02				X				X											
Bauder TOP DIFUTEX																			X
Bauder TOP DIFUBIT						X			X										
Poly-Wrap		X			X														
EURO-TOP			X		X			X						X					X
EURO-TOP light			X		X		X							X					X
EURO-MAX			X		X				X				X						X
Divoroll Pro	X			X	X		X							X		X			
Divoroll Light	X			X	X		X							X		X			
Divoroll Universal			X		X										X				
Divoroll			X		X		X												
Divoroll Top			X		X			X											
Difflex USB	X			X												X			
Difflex USB pro S	X			X				X								X			
Difflex 100	X			X				X											X
Bekafof	X			X				X								X			
Rewasi-Top			X		X		X									X			
trobafof	X																		
Valmex Divu Top L	X			X				X						X		X			

Tabelle B
Eigenschaftsmatrix am Markt erhältlicher Unterspann-/Unterdeckbahnen (Fortsetzung)

Produktname	Anzahl der Lagen		Gewicht in g/m ²			Reißfestigkeit in N/5 cm			Nagelausreißfestigkeit in N/5 cm			Wassersäule in mm			s _d -Wert in m		
	1	2	≤105	106 - 175	> 175	≤ 150	151 - 350	> 350	≤ 150	151 - 350	> 350	≤ 1000	1001 - 3000	> 3000	≤ 0,02	0,03 - 0,20	> 0,20
Valmex Divu Top SR		x		x			x			x			x		x		
Valmex Divu Top XL		x		x						x			x		x		
Valmex Divu Top M 170			x				x			x				x			
Valmex Divu Top M 170		x		x			x			x						x	
Valmex Divu Top M 170		x		x			x			x						x	
Valmex Top TVB 190				x				x					x				x
AirTex duo		x		x				x					x				
AirTex smart		x		x				x					x				
Difutec		x			x								x				
Tyvek Plus		x		x						x							
Delta-Tekt S				x													
Delta-Dinofol		x		x				x									
Delta-Dinofol S				x													
Delta-Vent N		x		x													
Delta-Fizz (-Vent S)		x		x													
Delta-Solar		x		x													
Delta-Purafol					x												
Delta-Maxx/Maxx- Plus					x												
Delta-Foxx					x												
Delta-Fol PVG					x												x
Tyvek Soft	x			x								x					
Tyvek Solid	x			x									x				x
Tyvek Primo		x												x			
Tyvek Pro		x											x				
Tyvek Universal		x												x			

Tabelle B
Eigenschaftsmatrix am Markt erhältlicher Unterspann-/Unterdeckbahnen (Fortsetzung)

Produktname	Anzahl der Lagen		Gewicht in g/m ²			Reißfestigkeit in N/5 cm			Nagelausreißfestigkeit in N/5 cm			Wassersäule in mm			s _{pd} -Wert in m			
	1	2	≥ 3	≤ 105	106 - 175	> 175	≤ 150	151 - 350	> 350	≤ 150	151 - 350	> 350	≤ 1000	1001 - 3000	> 3000	≤ 0,02	0,03 - 0,20	> 0,20
Tyvek Aktiv Membran																		
Tyvek X3																		
Nicofol HP Multi		x			x									x				
Aqua-Protect		x			x									x				
Ultradif Classic		x		x														
Ultradif Yellow/Grey		x		x														
Ultradif Master		x			x													
Ultradif Top		x			x													
Griltex Ultradif		x			x													
Unterdeckbahn		x			x													
TOP-Stream light		x			x													
Top Roof 2		x			x													
TOP-Stream			x		x													
Top Roof 3			x		x													
Tyvek solid				x														
Tyvek supro		x			x													
Isola Top		x			x													
Isola Top Extra			x		x													
Aqua Protect		x			x													
Jafo TEC		x			x													
jafo TOP-D		x																
jafo TOP-M			x															
Permo classic			x															
Permo easy			x															
Permo easy H			x															
Permo forte			x															
Permo light			x															

Tabelle B
Eigenschaftsmatrix am Markt erhältlicher Unterspann-/Unterdeckbahnen (Fortsetzung)

Produktname	Anzahl der Lagen		Gewicht in g/m ²			Reißfestigkeit in N/5 cm			Nagelausreißfestigkeit in N/5 cm			Wassersäule in mm			s _g -Wert in m			
	1	2	≥ 3	≤ 105	106 - 175	> 175	≤ 150	151 - 350	> 350	≤ 150	151 - 350	> 350	≤ 1000	1001 - 3000	> 3000	≤ 0,02	0,03 - 0,20	> 0,20
Tyvek HD-Soft				X									X			X		
Tyvek HD-Pus		X			X									X		X		
Lenzingtex DO 121			X		X			X							X			
Lenzingtex DO 140			X		X			X							X			
LOFA-TOP			X		X								X					
AirTex Gitterfolie					X			X					X					X
AirTex Trend			X		X			X						X		X		
MAGE-TOP S			X		X			X						X		X		
AirTex smart S2			X		X			X						X		X		
AirTex TOP M			X		X			X						X		X		X
AirTex Pro			X		X			X						X		X		
AirTex TOP X			X		X			X						X		X		
AirTex DuoBit		X						X										X
Nogo-Divu-top		X		X				X						X		X		
Nogo Fol		X						X										
Nogo-tex Diffusionsfolie																		
Sillista-light					X			X										X
Ampatop T2			X		X			X						X		X		
Sisalit 353			X			X									X			
Ampatex SB 100		X			X			X										X
Divu-Blue																		
Difolen		X		X			X									X		
Difolen		X		X			X									X		
Difolen S			X		X			X								X		
Difolen Plus			X		X			X								X		
Difolen Plus			X		X			X			X							X

Tabelle B
Eigenschaftsmatrix am Markt erhältlicher Unterspann-/Unterdeckbahnen (Fortsetzung)

Produktname	Anzahl der Lagen			Gewicht in g/m ²			Reißfestigkeit in N/5 cm			Nagelausreißfestigkeit in N/5 cm			Wassersäule in mm			s _d -Wert in m		
	1	2	≥ 3	≤ 105	106 - 175	> 175	1	2	≥ 3	≤ 105	106 - 175	> 175	≤ 1000	1001 - 3000	> 3000	≤ 0,02	0,03 - 0,20	> 0,20
	Solitex Plus		x														x	
Solitex Ultra																x		
Solitex			x													x		
Solitex DU			x													x		
fix 100			x	x				x			x					x		
fix 200			x	x				x			x					x		
fix 300			x	x				x			x					x		
Typek HD-DUO-PLUS			x										x			x		
DRY-FLEXX		x																x
TU 108-05			x															x
TU 111-05			x			x						x						x
Abustar			x			x												x
Abustar			x			x												x
Tectothern-D																		x
Tectothern-Top		x																
Tectothern-Lite																		
Tectothern-Top 2000																		
Tectothern-Xtra L																		
Tectothern-Xtra L																		
Tectothern H																		
siehe Produkte BWK																		
Riso-Tec 3S			x															
Riso-Tec DS Extra			x															
Riso-Tec DS Plus			x															
Riso-Tec M																		
Riso-Tec Plus			x															

Tabelle B
Eigenschaftsmatrix am Markt erhältlicher Unterspann-/Unterdeckbahnen (Fortsetzung)

Produktname	Anzahl der Lagen			Gewicht in g/m ²			Reißfestigkeit in N/5 cm			Nagelausreißfestigkeit in N/5 cm			Wassersäule in mm			s _g -Wert in m		
	1	2	≥ 3	≤ 105	175	> 175	≤ 150	350	> 350	≤ 150	350	> 350	≤ 1000	1001 - 3000	> 3000	≤ 0,02	0,03 - 0,20	> 0,20
divu-star		X							X									X
divu-star 200 S															X			
divu-star 250 S																		
divu-star 700 S			X						X						X			X
UNI SX 550																		
WDM Pink		X				X				X					X			X
Tegula			X															
Vedaform Fun			X					X					X			X		
Vedaform S																		
Vedaform KB-S																		
Vedaform KB-S KSK																		
Refatop			X							X				X		X		
Refatop magic			X					X								X		
Izotop 95			X		X			X						X				
WEB 9			X		X			X						X		X		
WEB 10			X		X									X		X		
WEB 76			X											X		X		
Wiekor 10			X													X		
WEB 77			X											X		X		
Protect VP 300			X													X		
Wiekor 11			X													X		
WEB 11			X													X		
WEB 55			X													X		
Diffu-light-S			X													X		
Wüttop DU 10			X							X						X		

Anhang C: Ergänzende Daten einzelner Untersuchungen

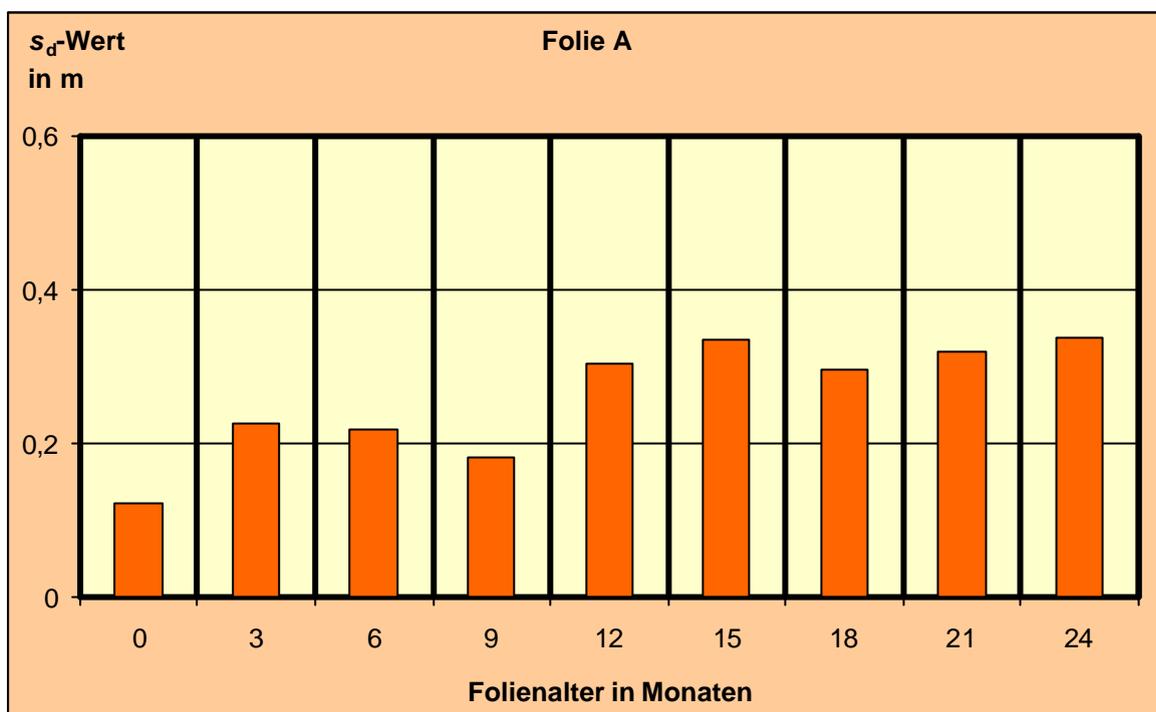


Abb. C-1

Ergebnisse der s_d -Wert-Bestimmung vor und nach einer natürlichen Alterung

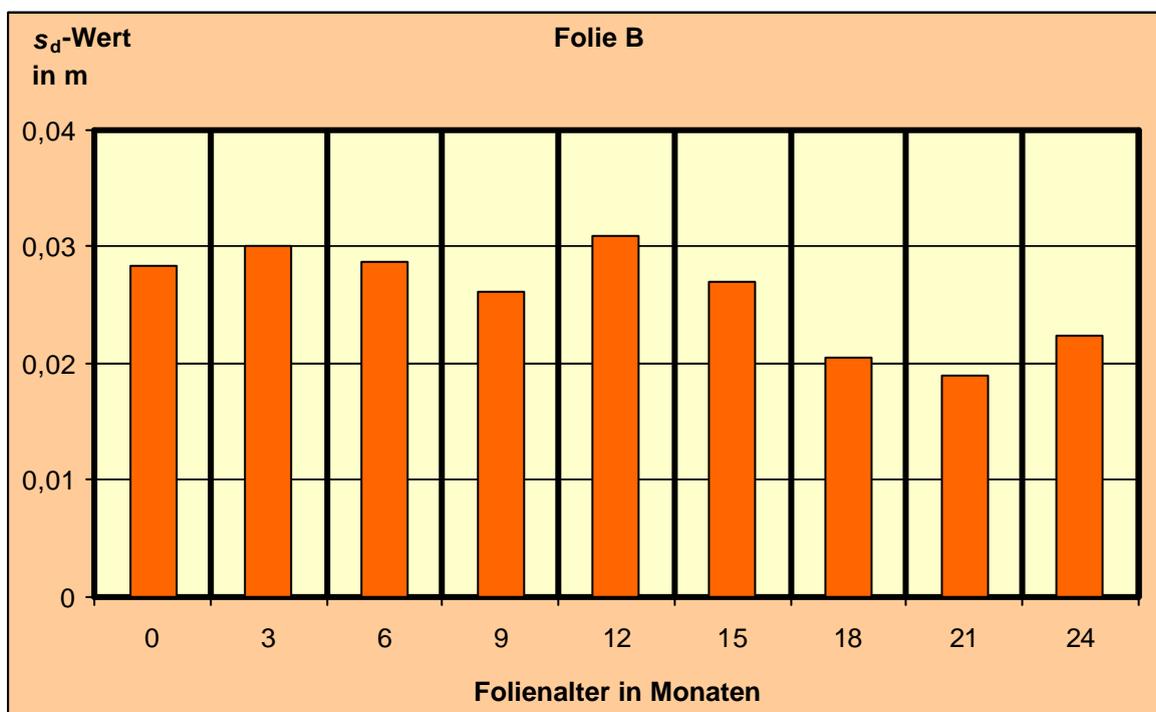


Abb. C-2

Ergebnisse der s_d -Wert-Bestimmung vor und nach einer natürlichen Alterung

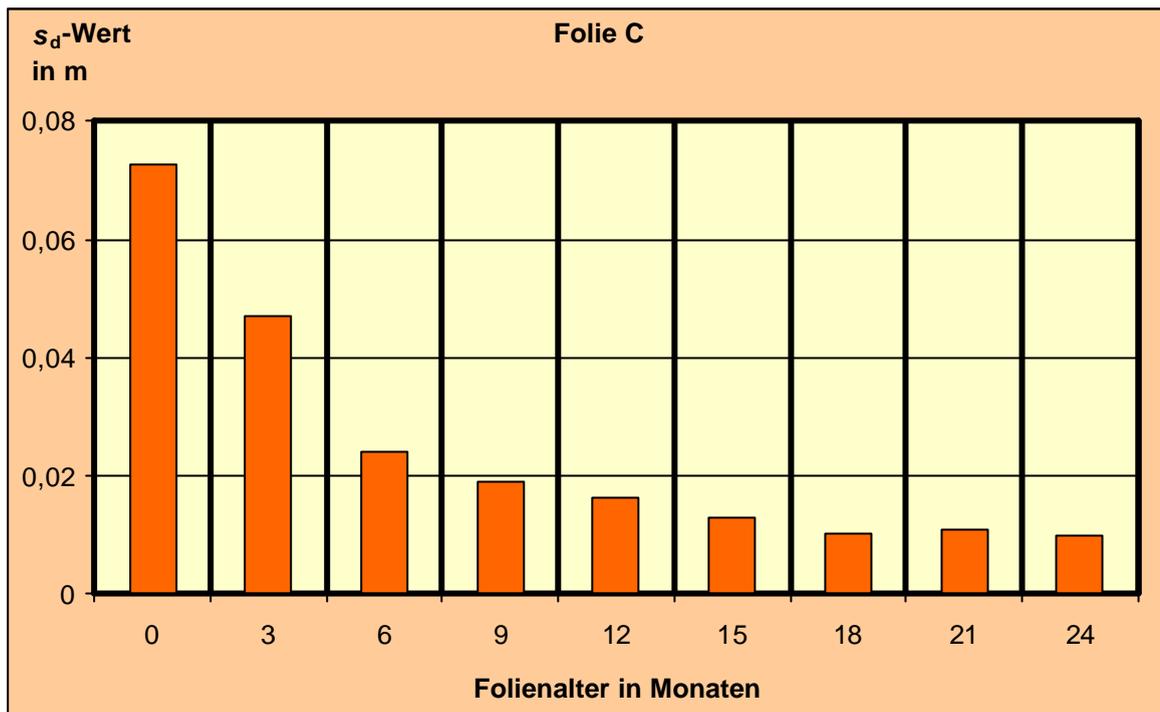


Abb. C-3

Ergebnisse der s_d -Wert-Bestimmung vor und nach einer natürlichen Alterung

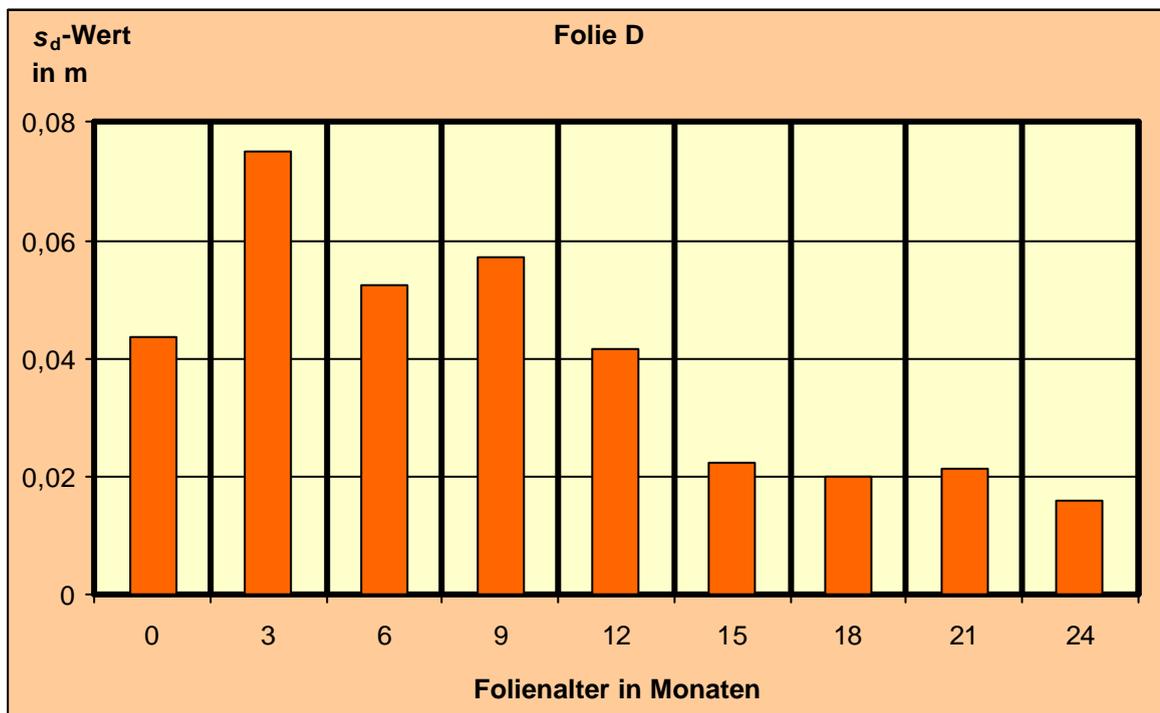
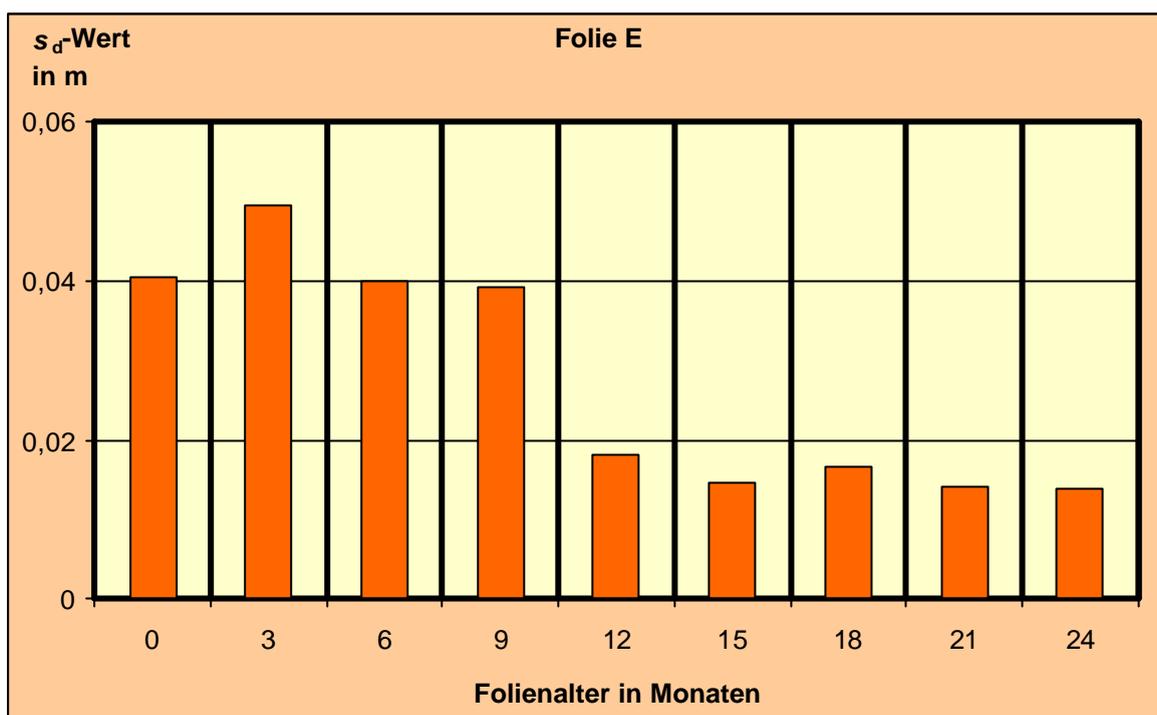
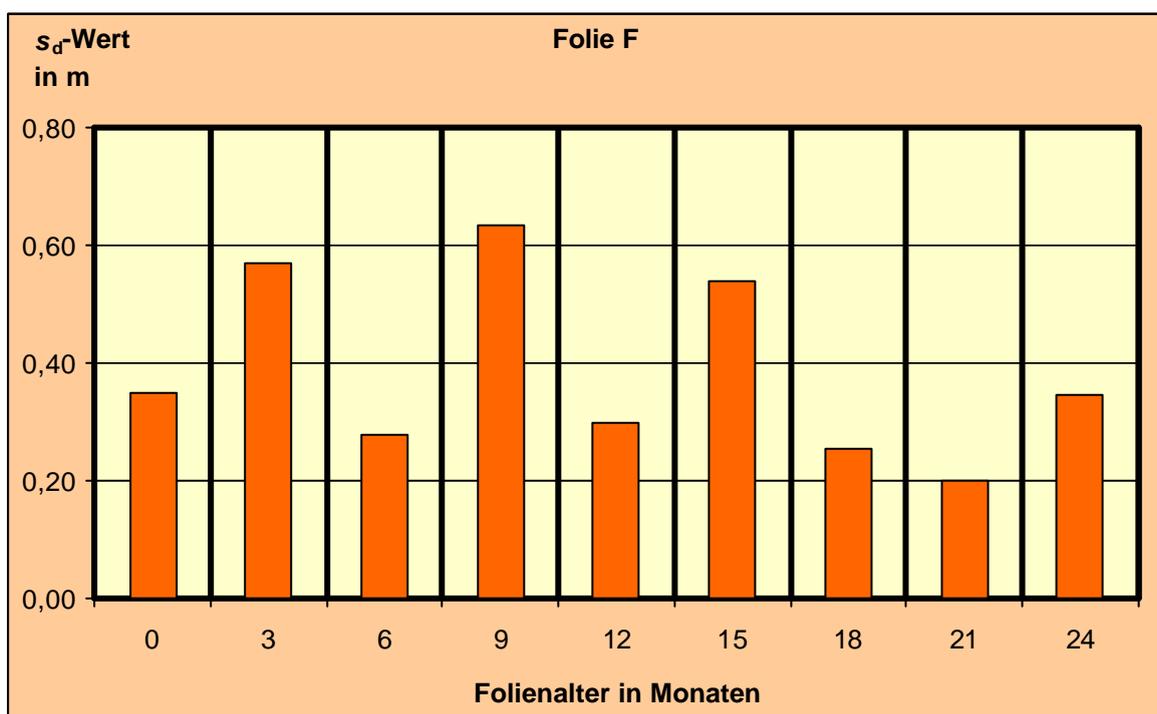


Abb. C-4

Ergebnisse der s_d -Wert-Bestimmung vor und nach einer natürlichen Alterung

**Abb. C-5**

Ergebnisse der s_d -Wert-Bestimmung vor und nach einer naturlichen Alterung

**Abb. C-6**

Ergebnisse der s_d -Wert-Bestimmung vor und nach einer naturlichen Alterung

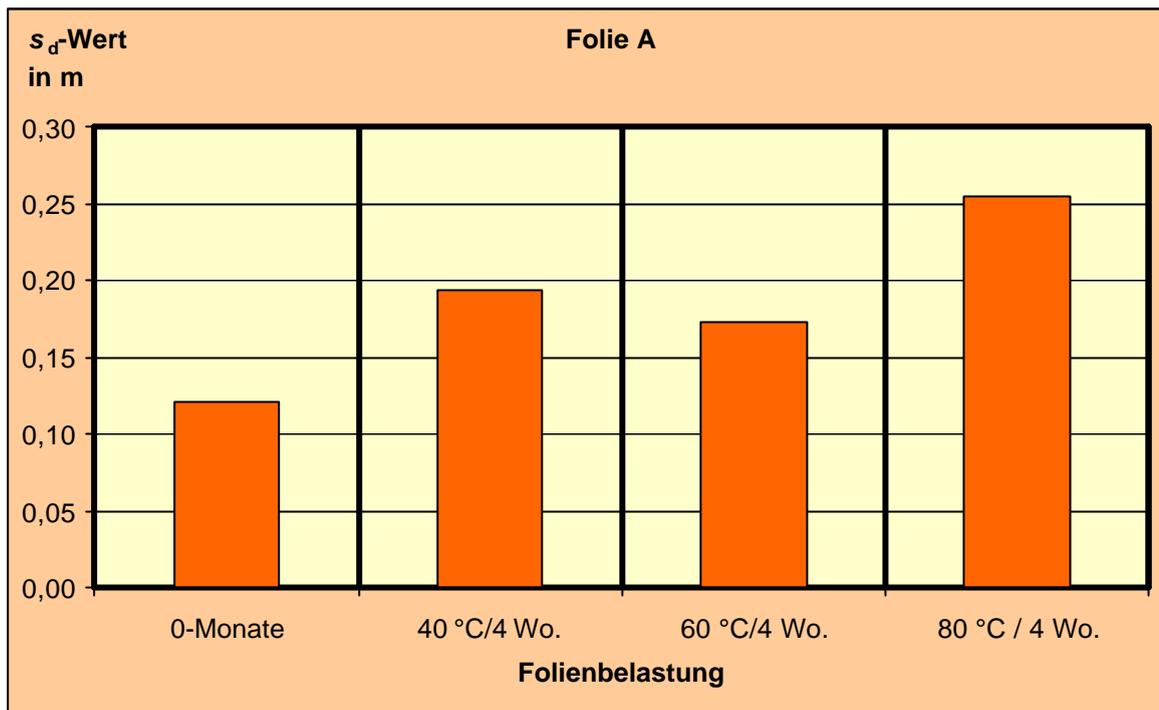


Abb. C-7

Ergebnisse der s_d -Wert-Bestimmung vor und nach der künstlichen Alterung durch Wärmelagerung

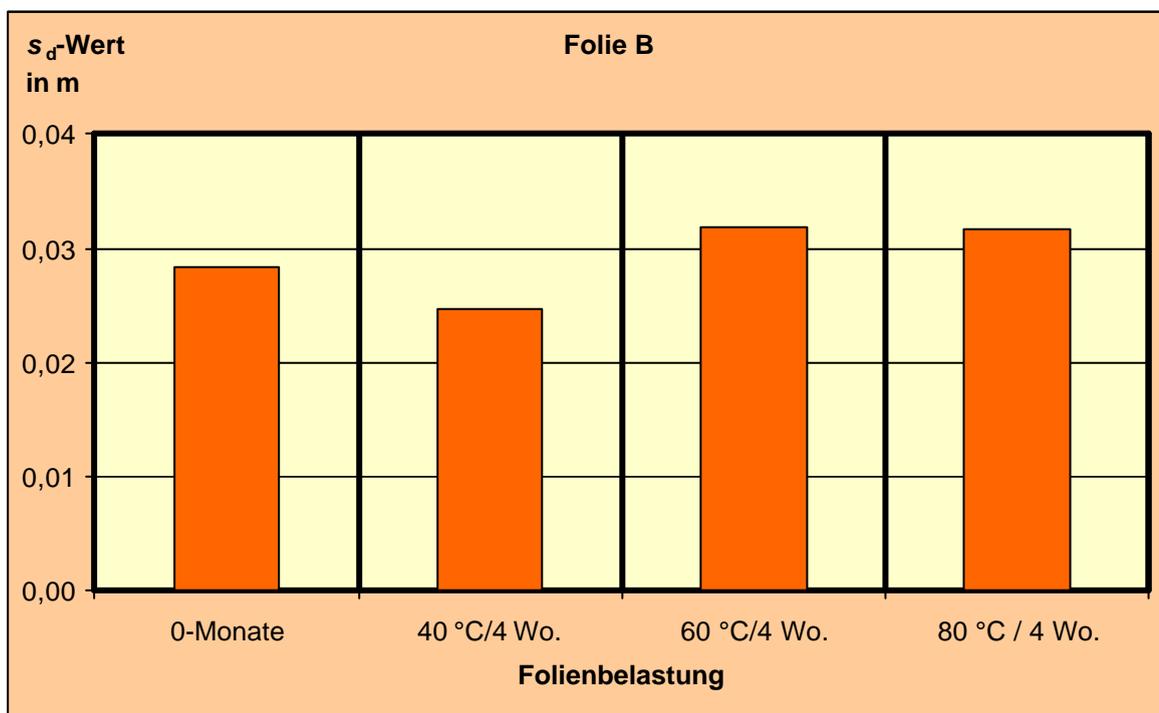
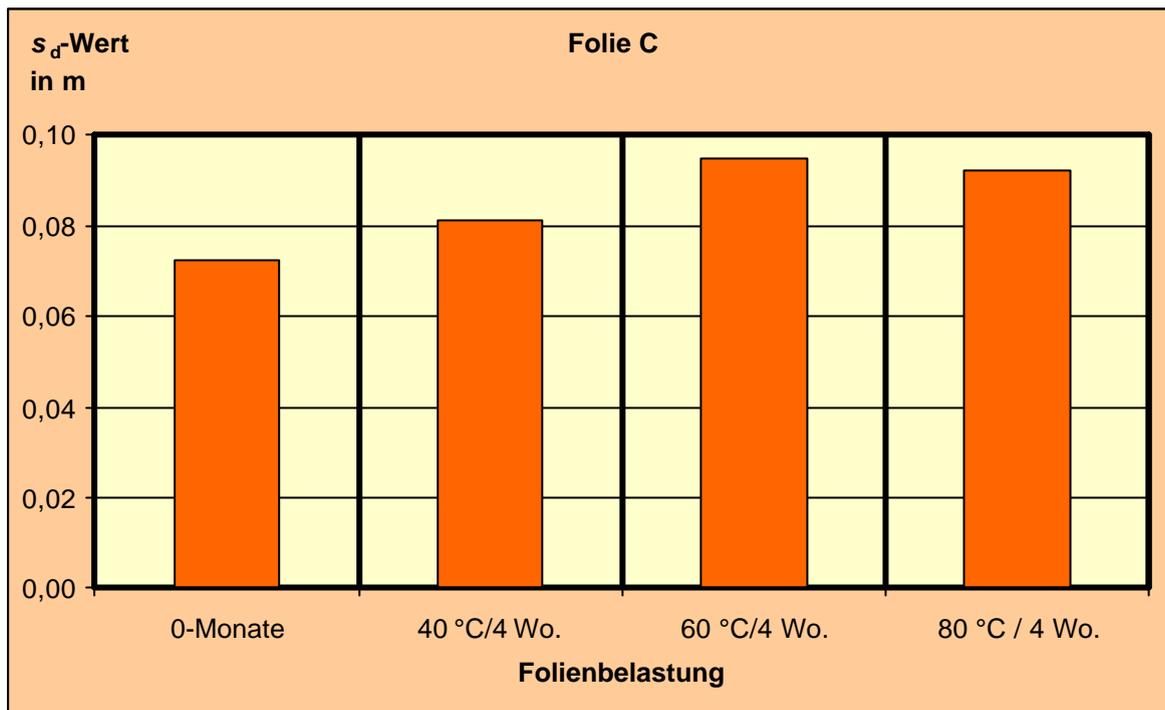
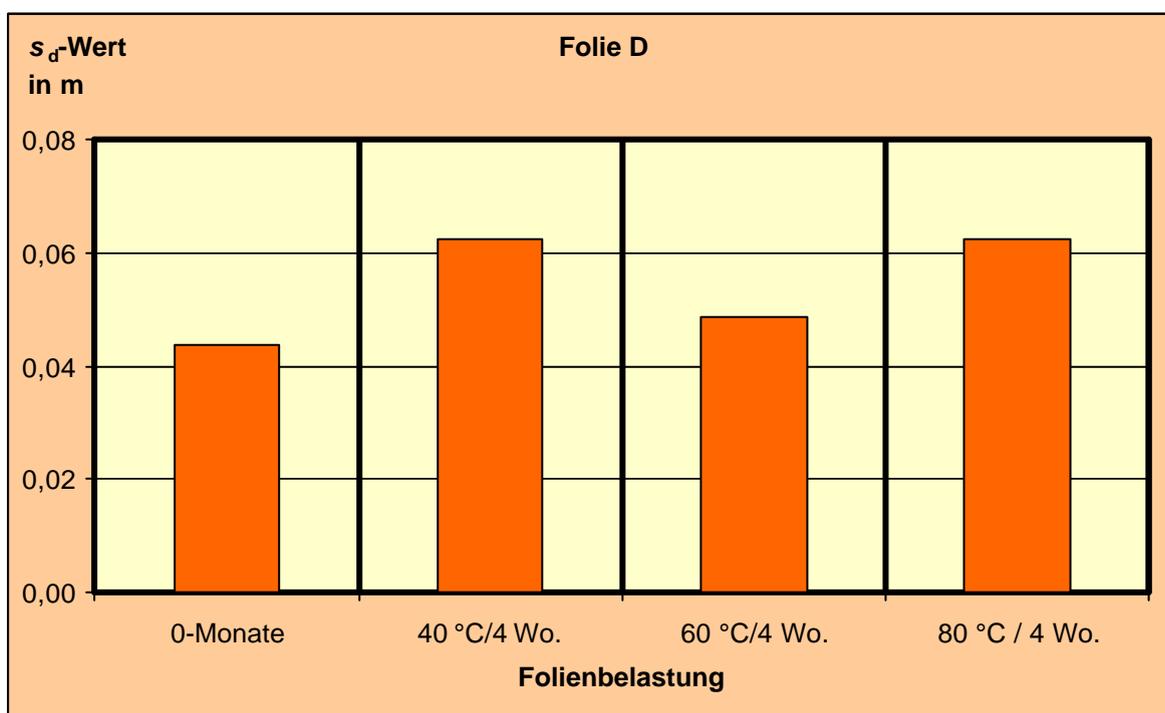


Abb. C-8

Ergebnisse der s_d -Wert-Bestimmung vor und nach der künstlichen Alterung durch Wärmelagerung

**Abb. C-9**

Ergebnisse der s_d -Wert-Bestimmung vor und nach der künstlichen Alterung durch Wärmelagerung

**Abb. C-10**

Ergebnisse der s_d -Wert-Bestimmung vor und nach der künstlichen Alterung durch Wärmelagerung

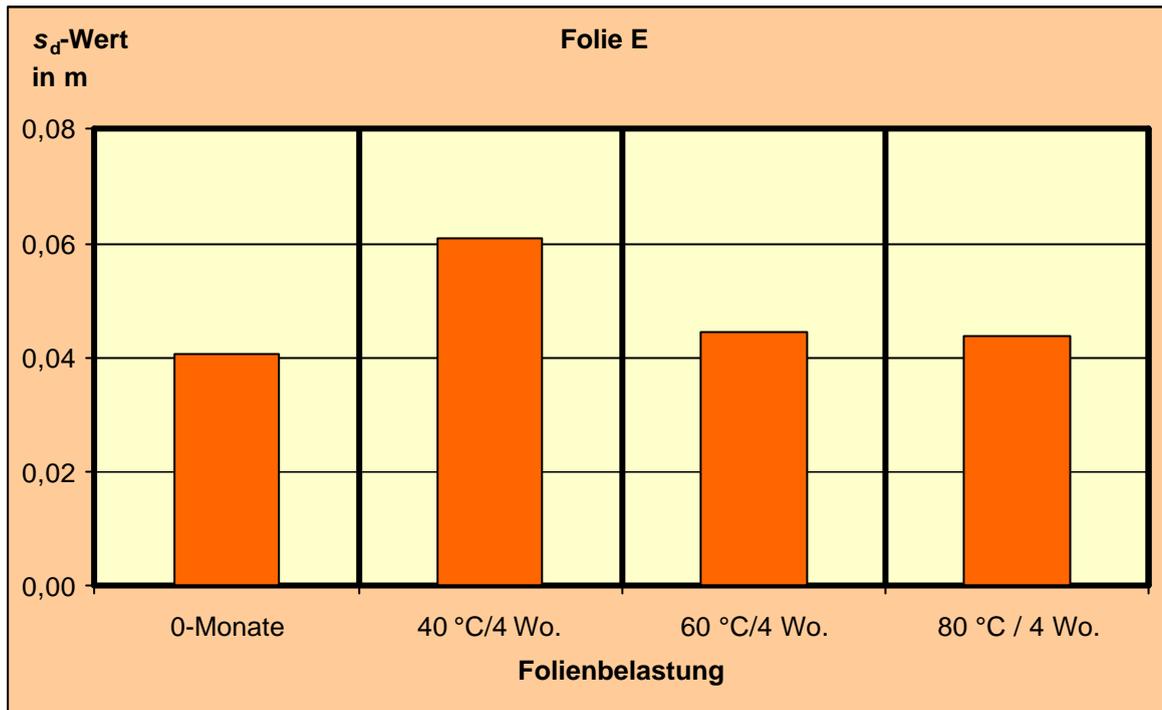


Abb. C-11

Ergebnisse der s_d-Wert-Bestimmung vor und nach der künstlichen Alterung durch Wärmelagerung

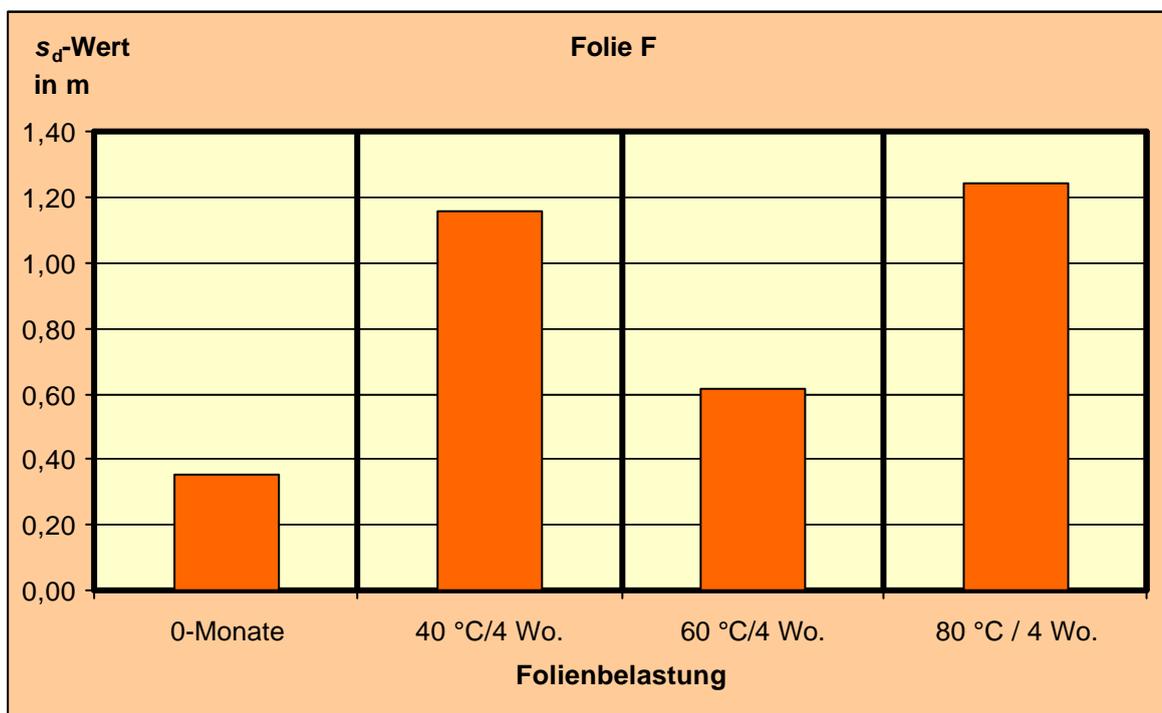
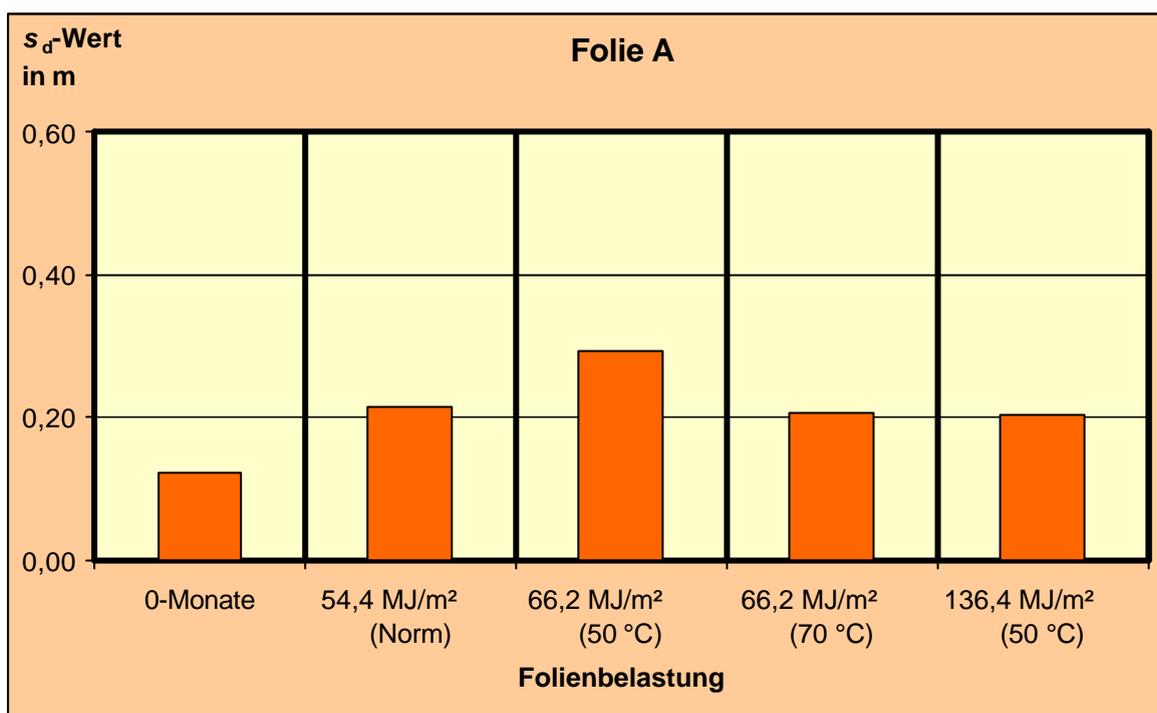
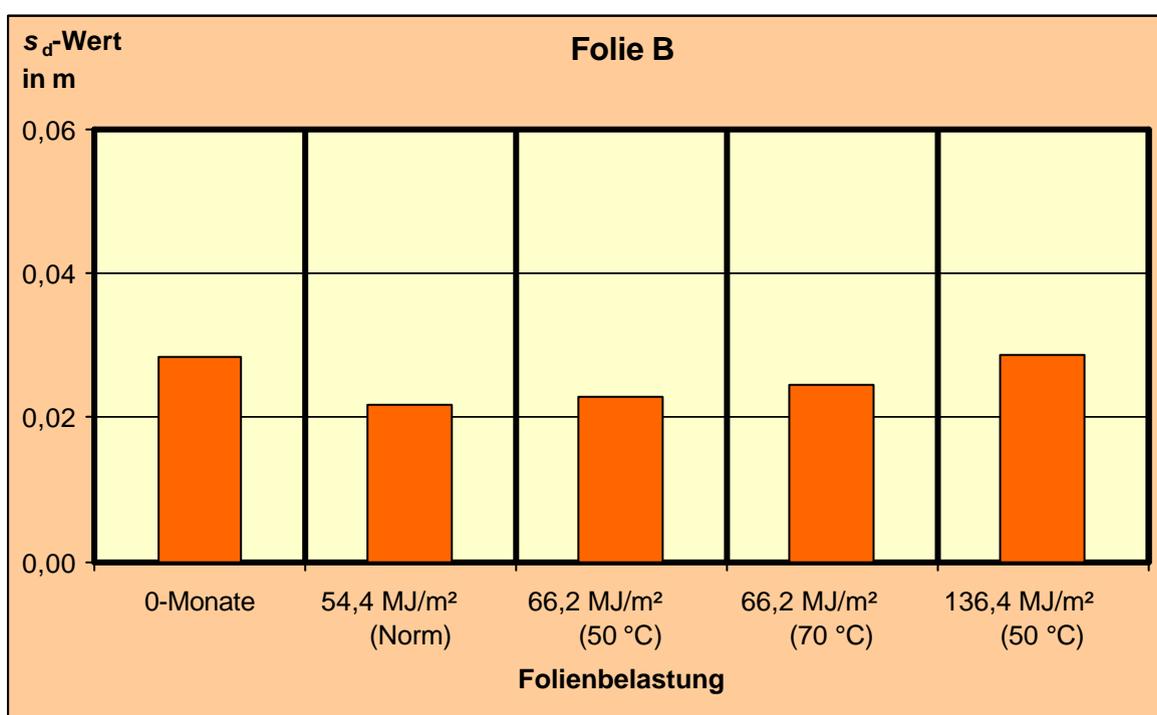


Abb. C-12

Ergebnisse der s_d-Wert-Bestimmung vor und nach der künstlichen Alterung durch Wärmelagerung

**Abb. C-13**

Ergebnisse der s_d -Wert-Bestimmung vor und nach der künstlichen Alterung durch UV-Bestrahlung

**Abb. C-14**

Ergebnisse der s_d -Wert-Bestimmung vor und nach der künstlichen Alterung durch UV-Bestrahlung

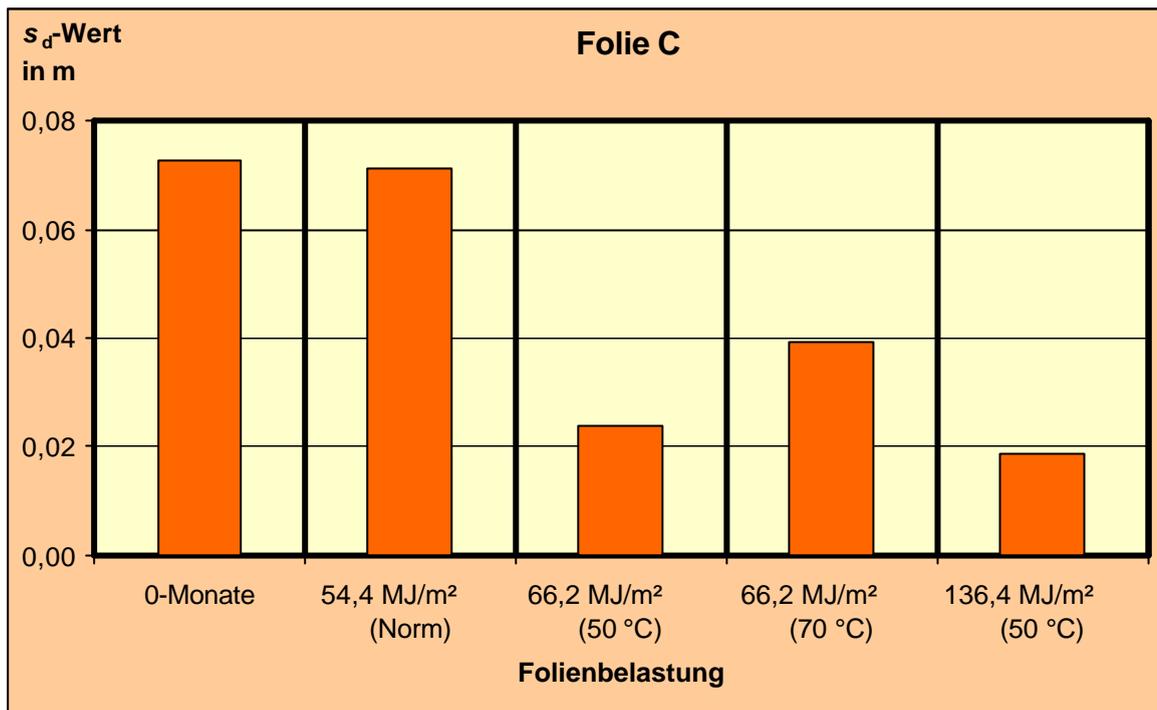


Abb. C-15

Ergebnisse der s_d -Wert-Bestimmung vor und nach der künstlichen Alterung durch UV-Bestrahlung

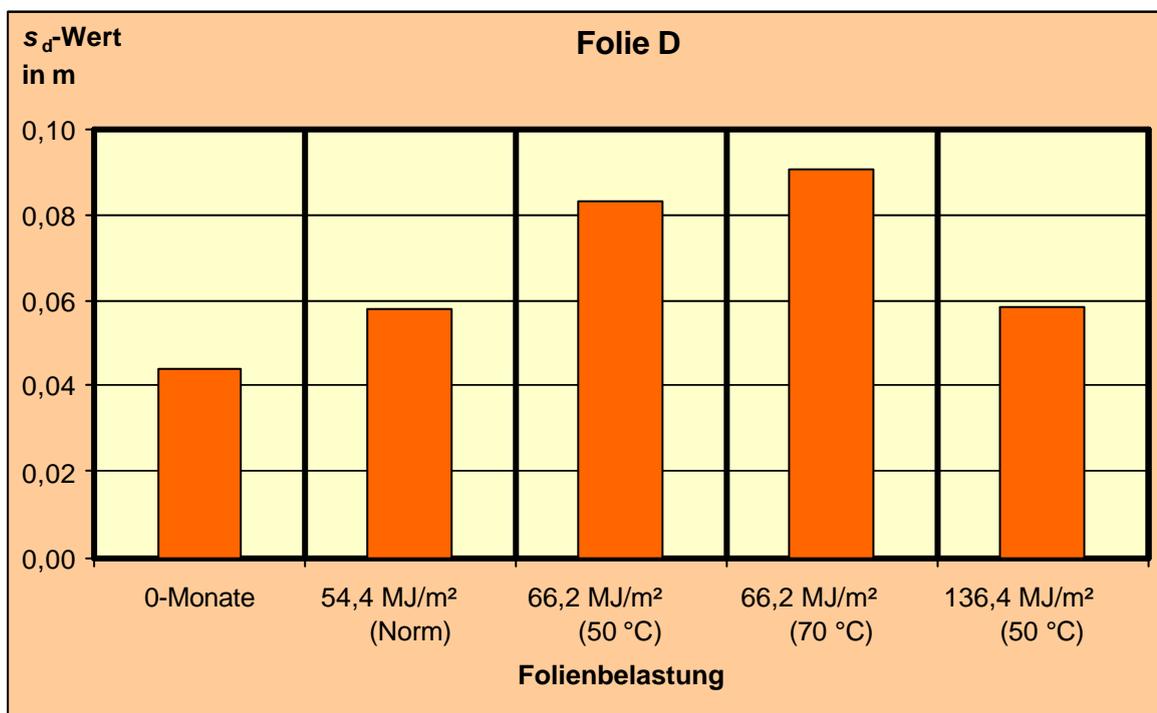
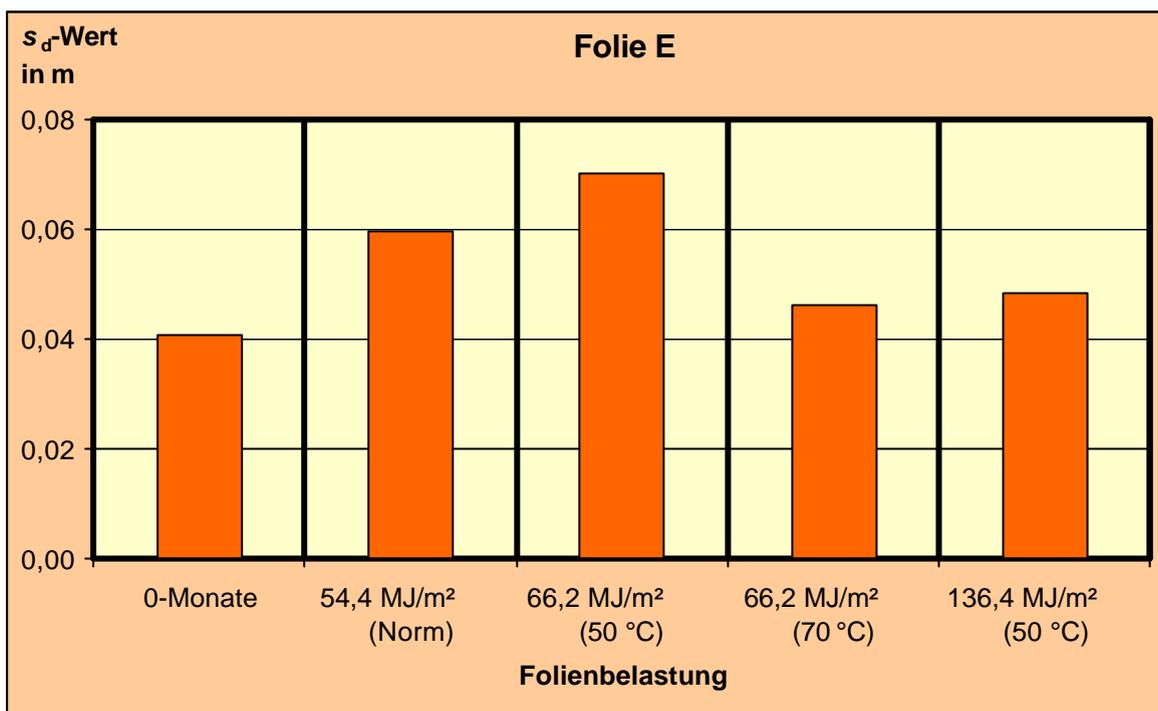
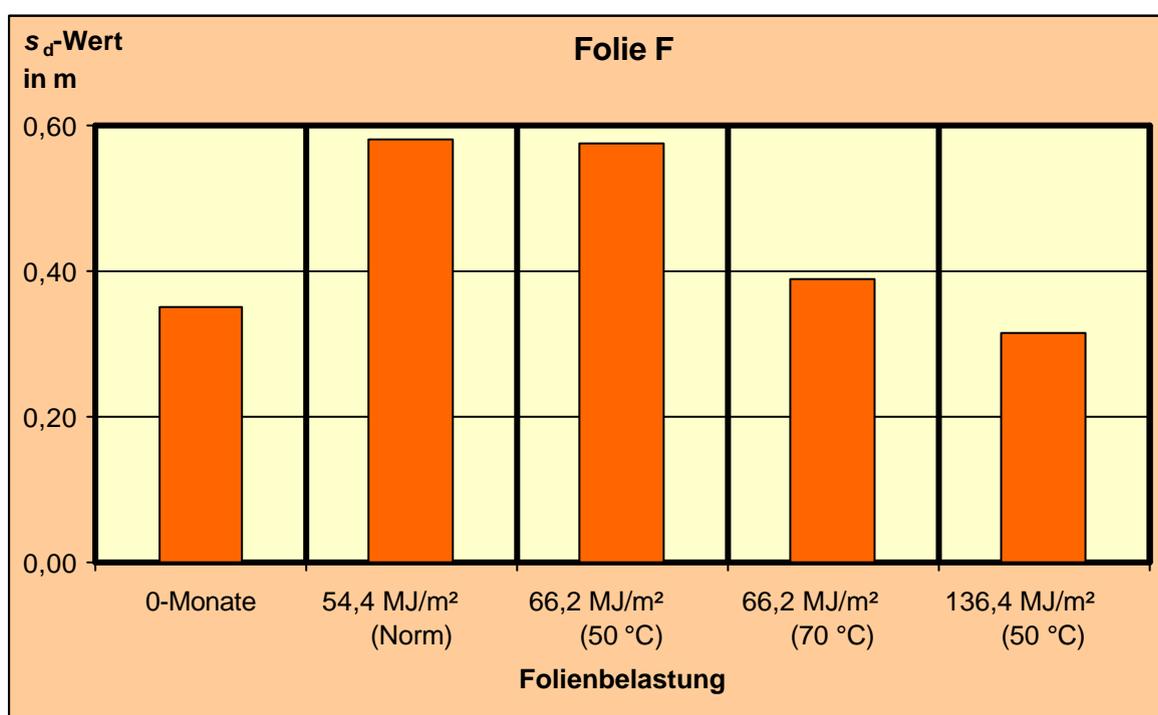


Abb. C-16

Ergebnisse der s_d -Wert-Bestimmung vor und nach der künstlichen Alterung durch UV-Bestrahlung

**Abb. C-17**

Ergebnisse der s_d -Wert-Bestimmung vor und nach der künstlichen Alterung durch UV-Bestrahlung

**Abb. C-18**

Ergebnisse der s_d -Wert-Bestimmung vor und nach der künstlichen Alterung durch UV-Bestrahlung

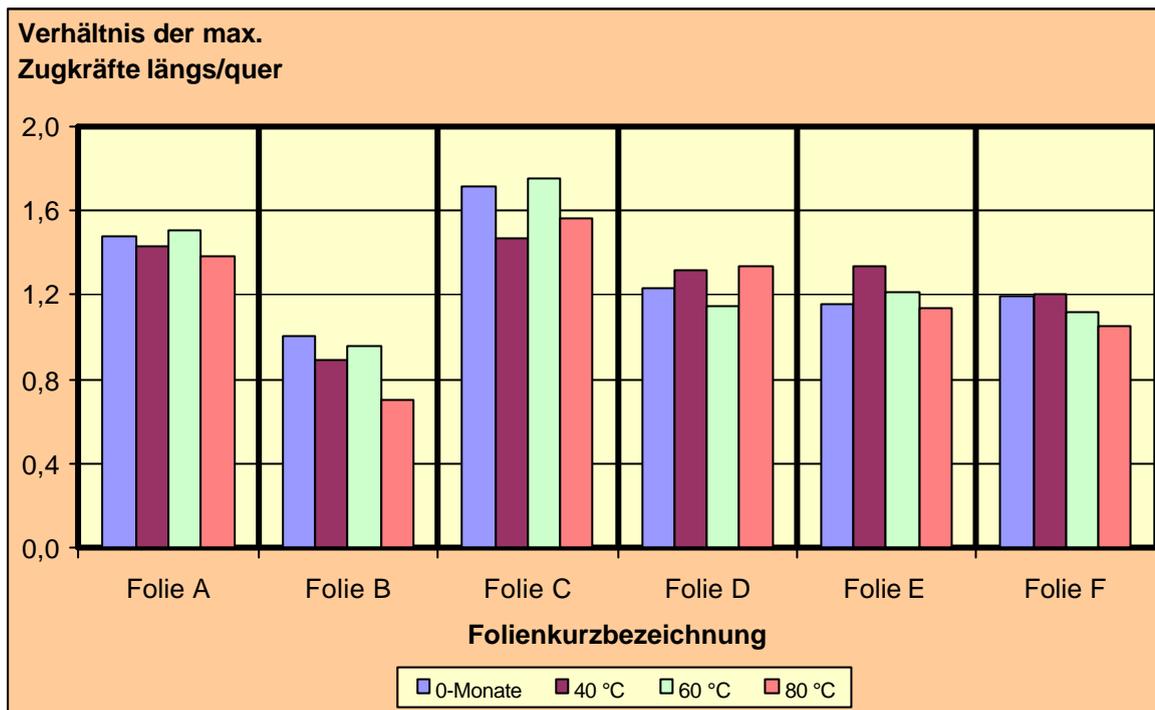


Abb. C-19

Verhältnis längs/quer der maximalen Zugkräfte nach der künstlichen Alterung durch Wärmelagerung

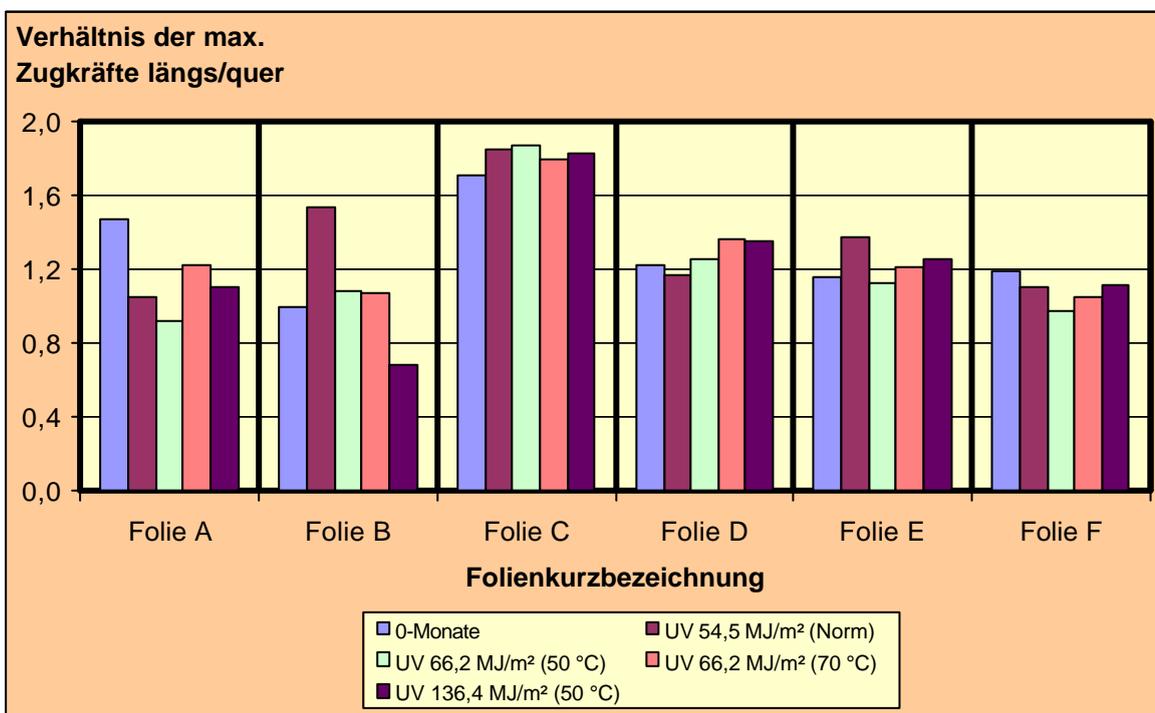


Abb. C-20

Verhältnis längs/quer der maximalen Zugkräfte nach der künstlichen Alterung durch UV-Bestrahlung

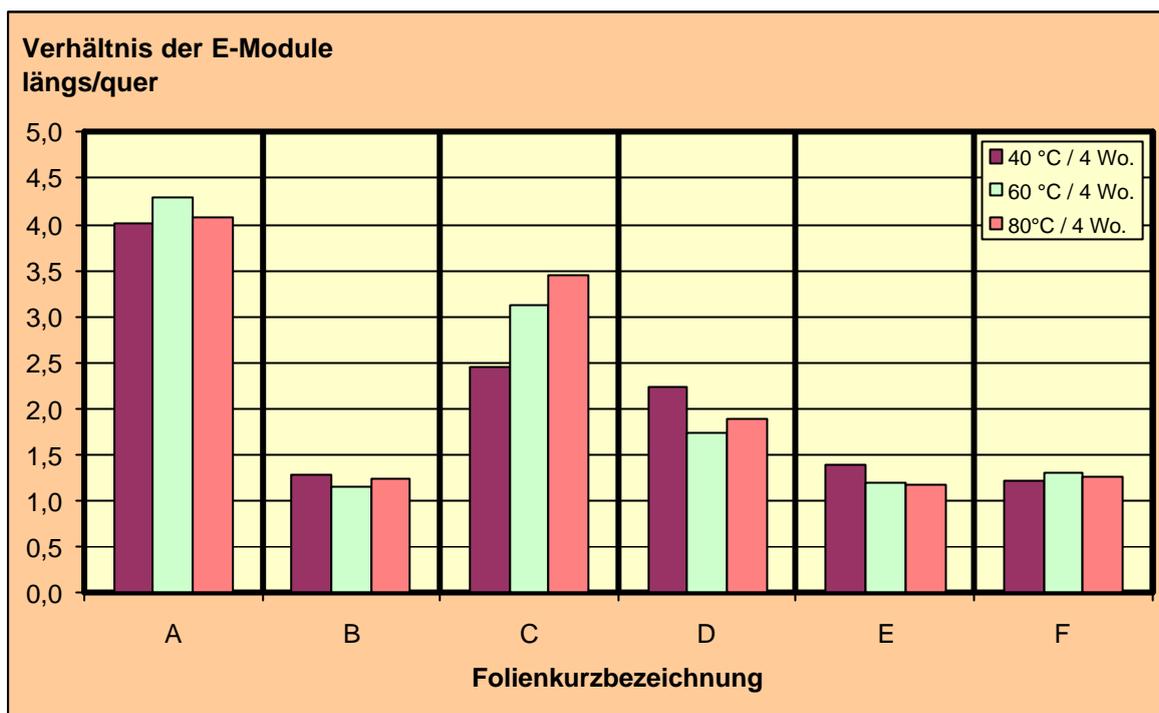


Abb. C-21

Verhältnis längs/quer der E-Module nach der künstlichen Alterung durch Wärmelagerung

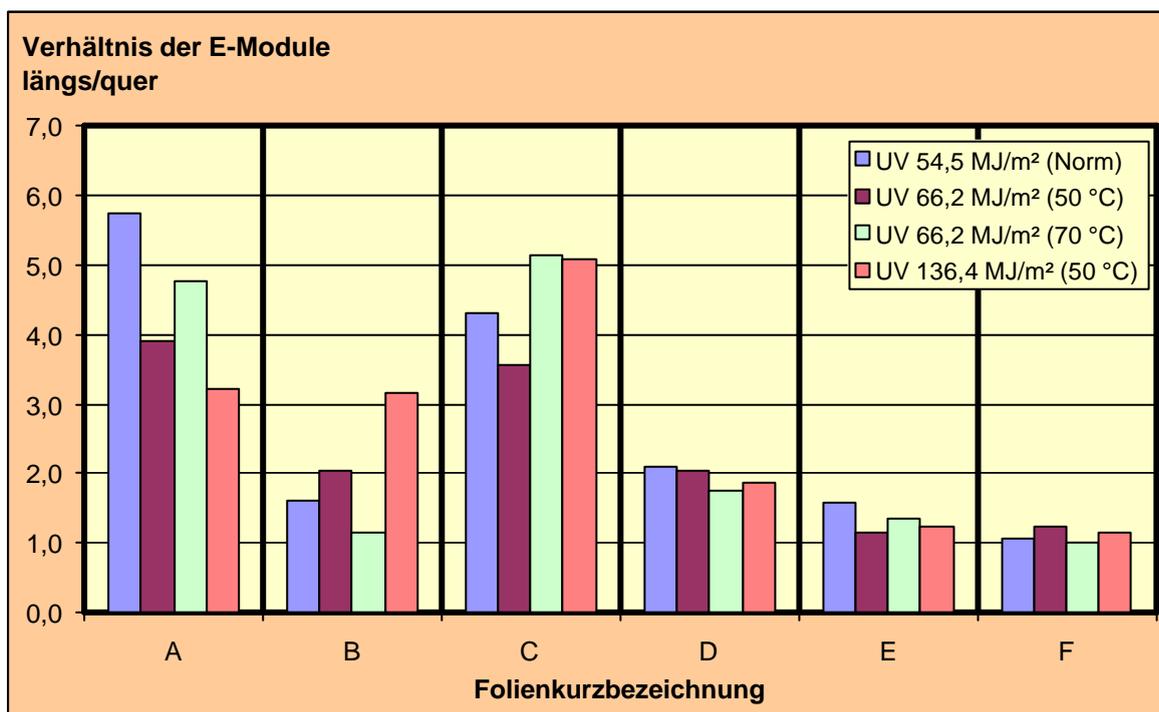


Abb. C-22

Verhältnis längs/quer der E-Module nach der künstlichen Alterung durch UV-Be-strahlung

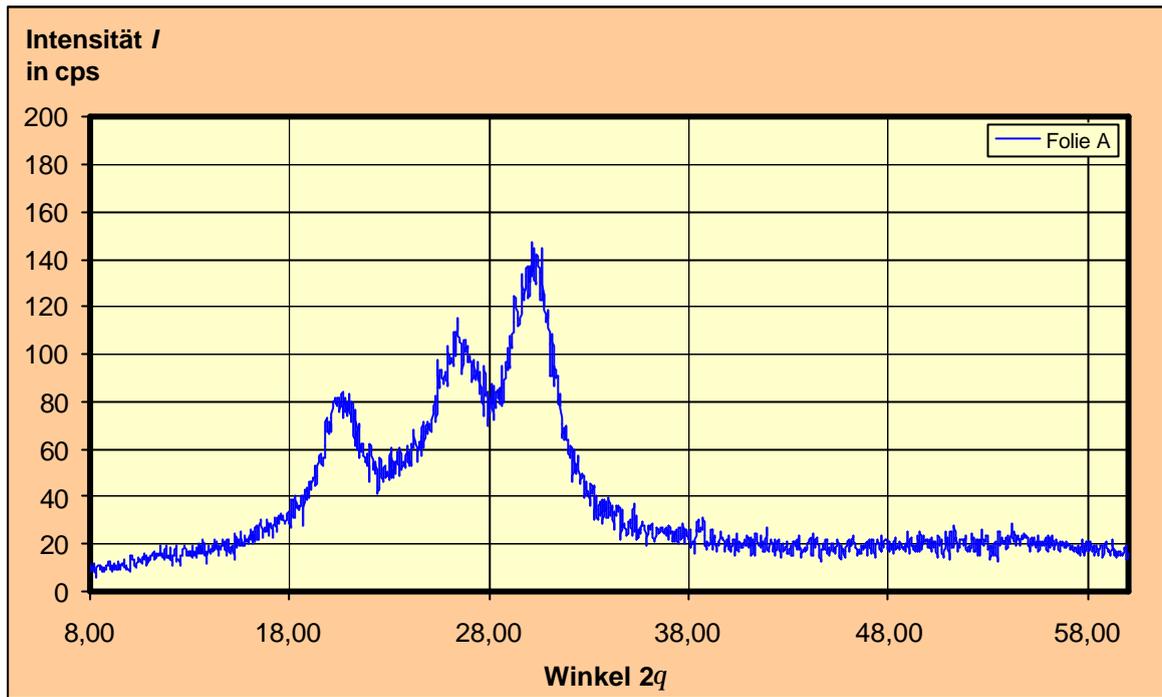


Abb. C-23
Röntgen-Diffraktometerdiagramm der neuen Unterspannbahn A

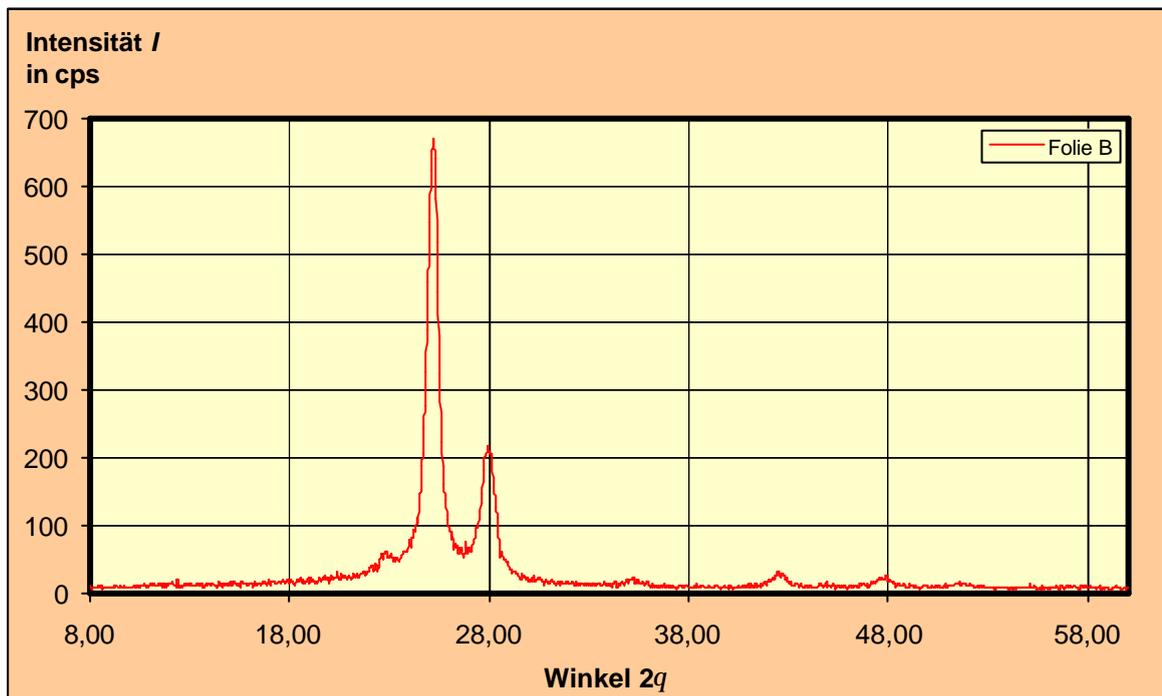
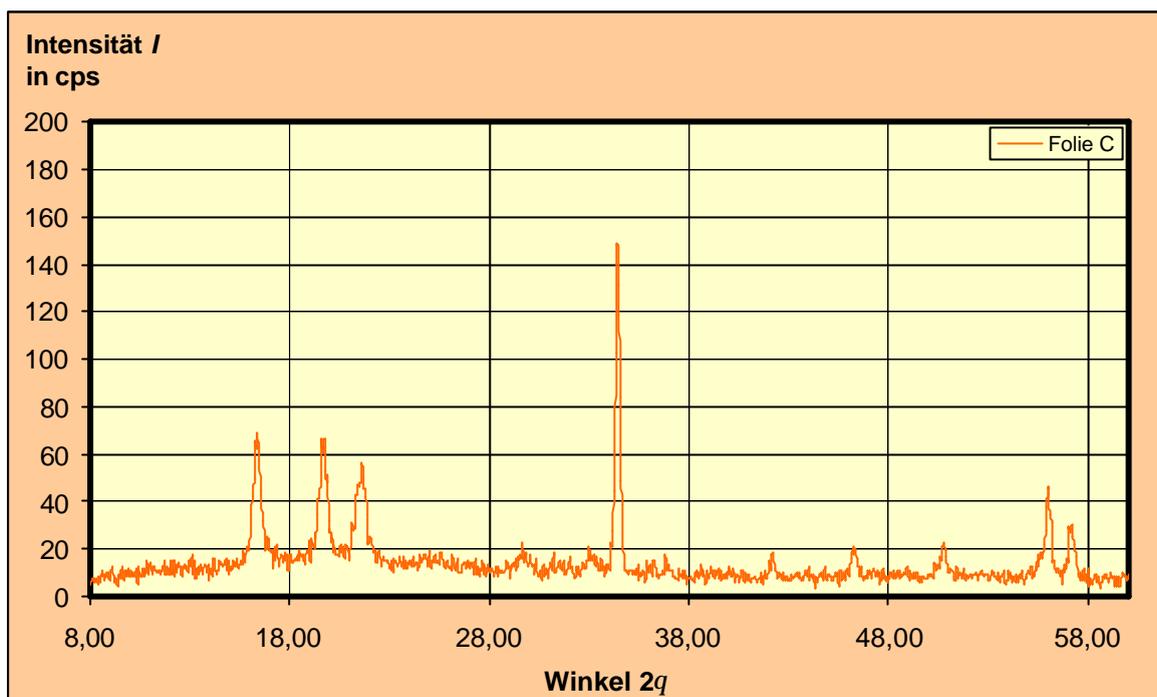
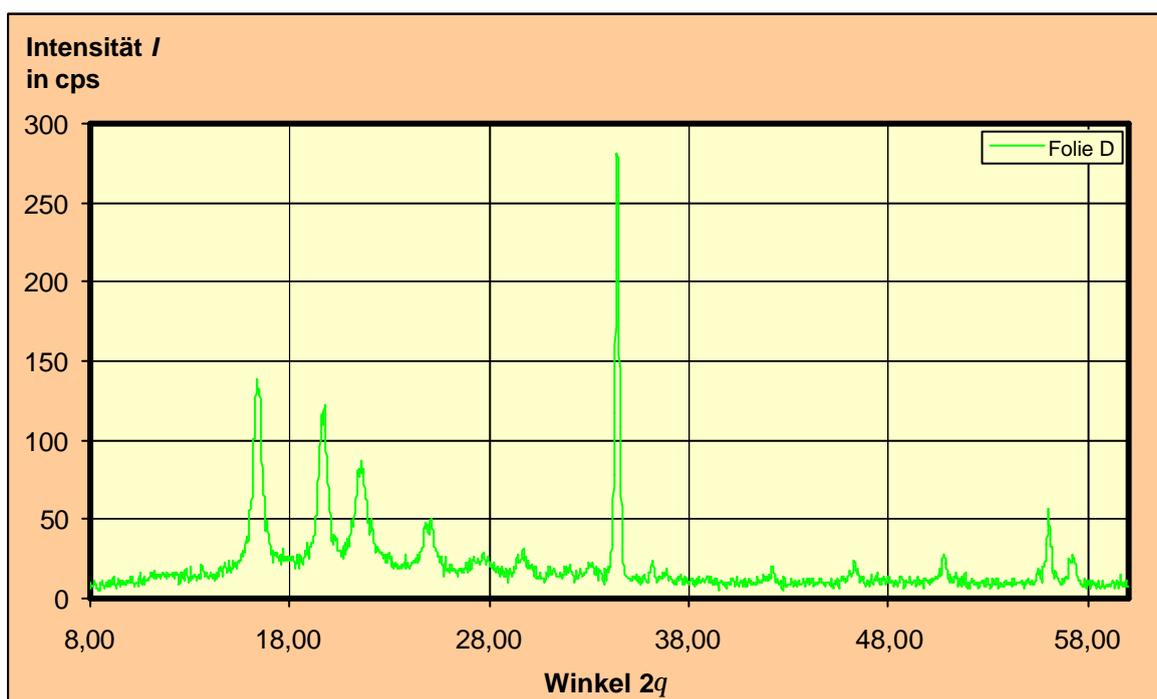


Abb. C-24
Röntgen-Diffraktometerdiagramm der neuen Unterspannbahn B

**Abb. C-25**

Röntgen-Diffraktometerdiagramm der neuen Unterspannbahn C

**Abb. C-26**

Röntgen-Diffraktometerdiagramm der neuen Unterspannbahn D

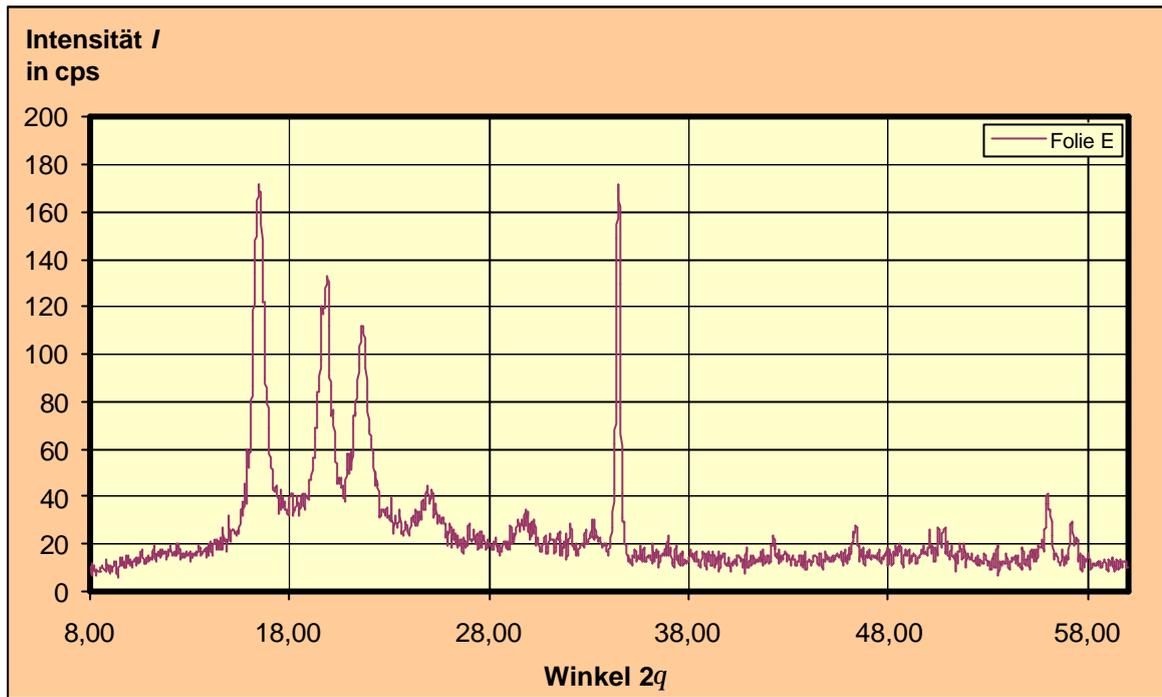


Abb. C-27
Röntgen-Diffraktometerdiagramm der neuen Unterspannbahn E

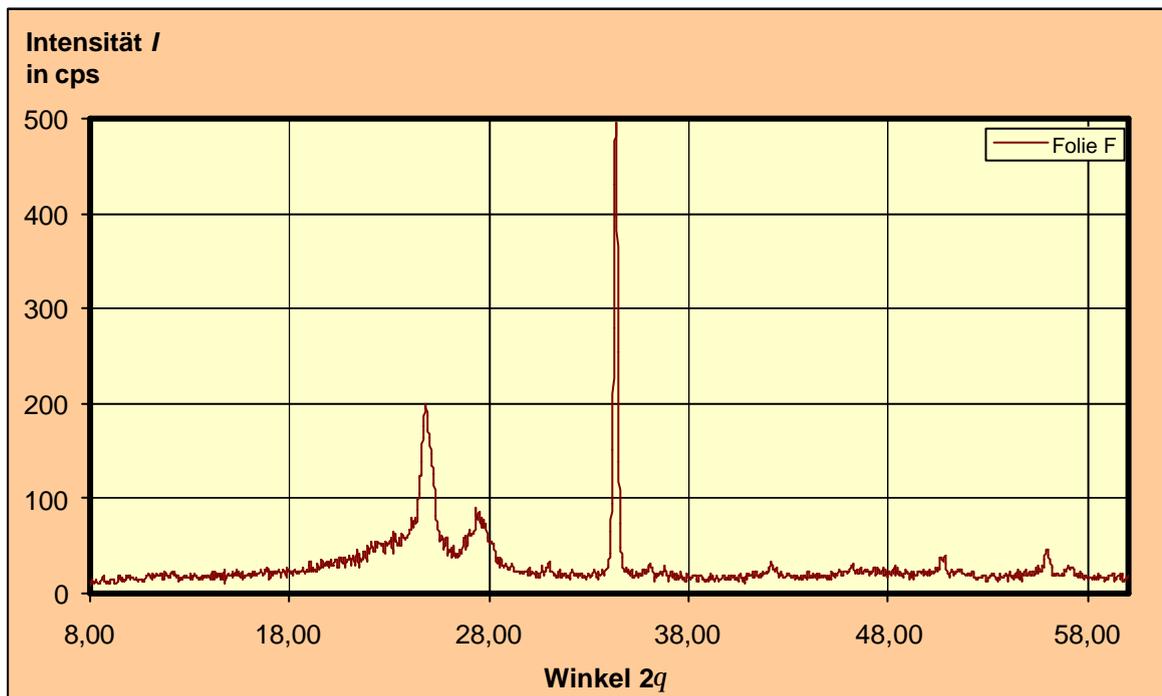
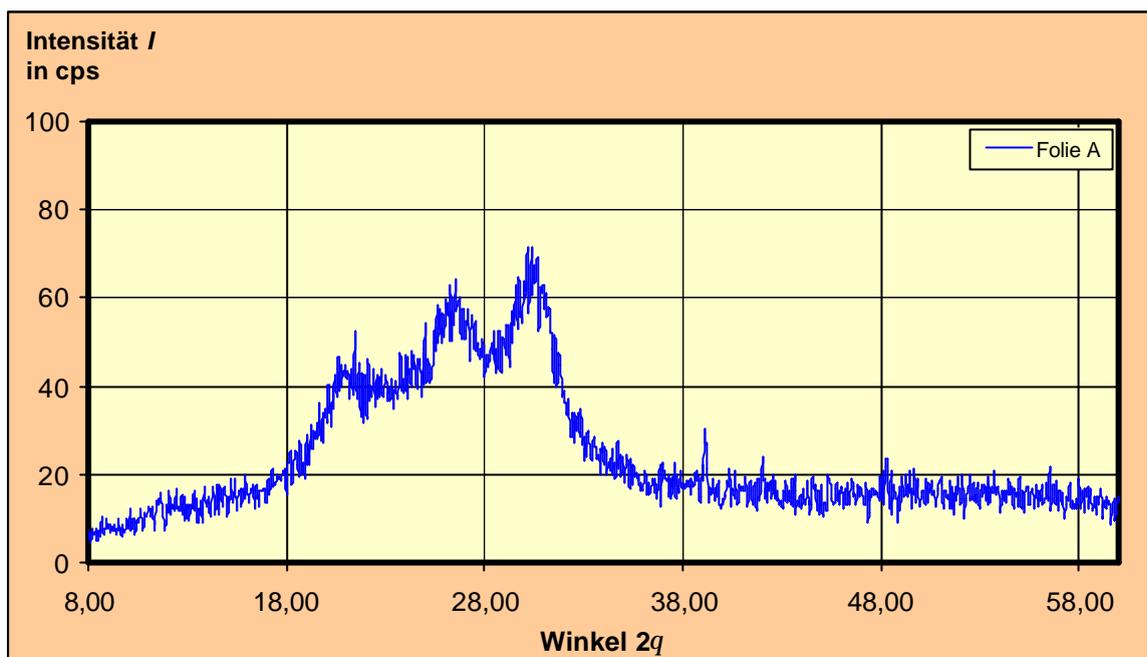
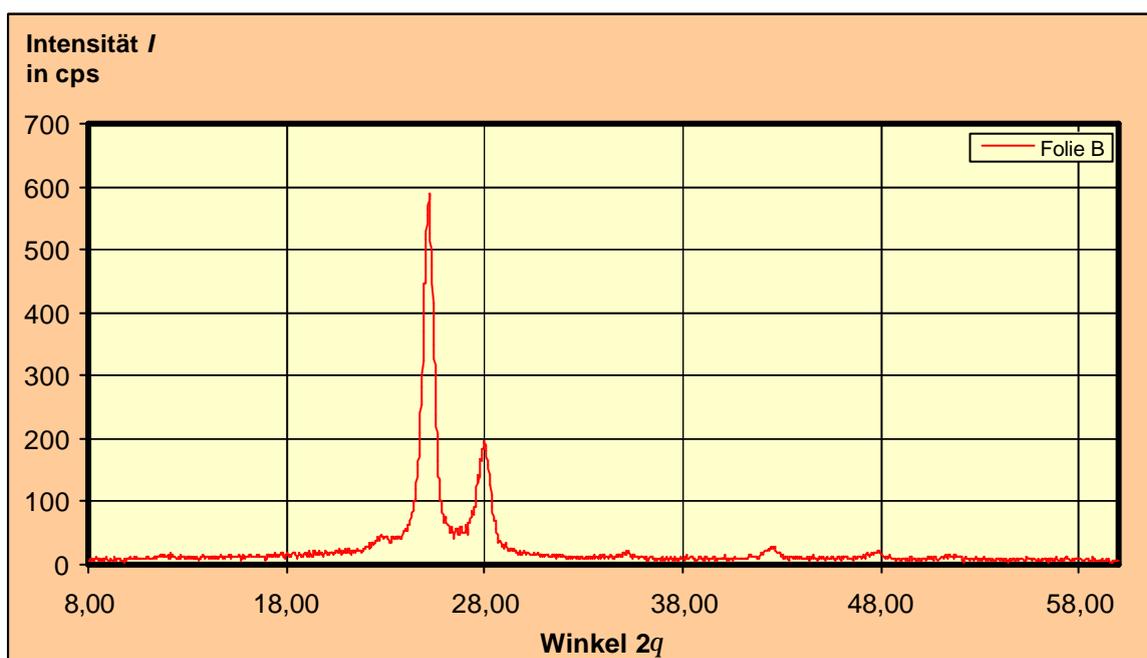


Abb. C-28
Röntgen-Diffraktometerdiagramm der neuen Unterspannbahn F

**Abb. C-29**

Röntgen-Diffraktometerdiagramm der 12 Monate frei bewitterterten Unterspannbahn A

**Abb. C-30**

Röntgen-Diffraktometerdiagramm der 12 Monate frei bewitterterten Unterspannbahn B

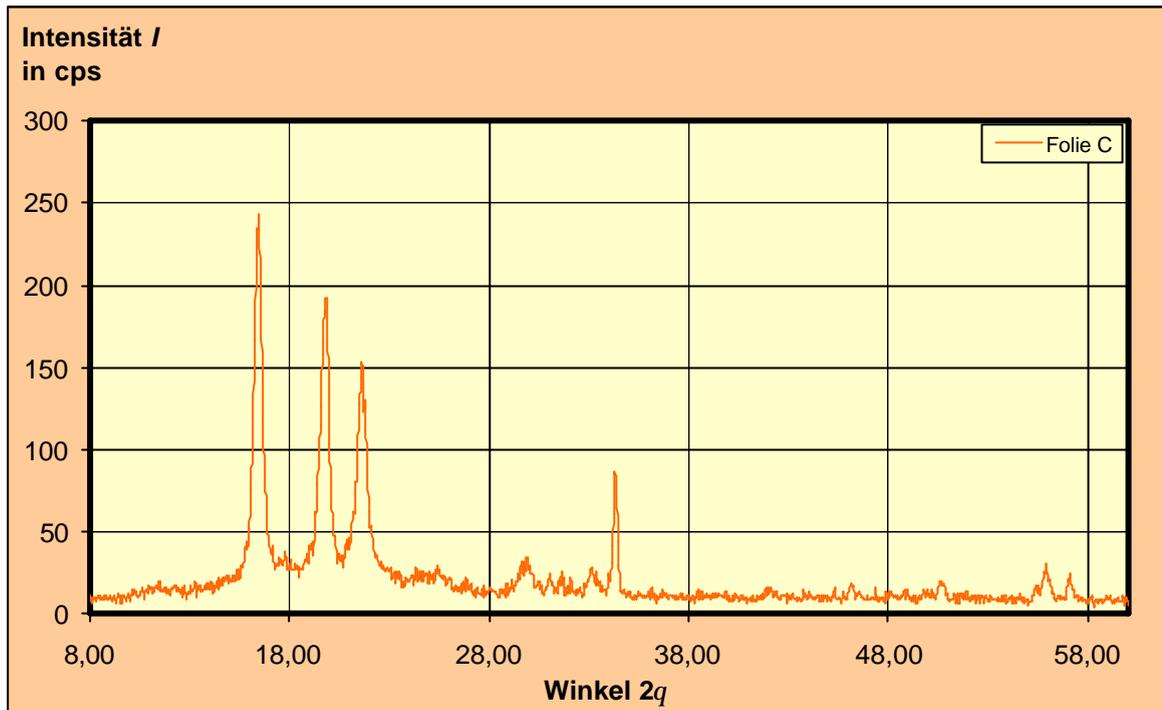


Abb. C-31
Röntgen-Diffraktometerdiagramm der 12 Monate frei bewitterterten Unterspannbahn C

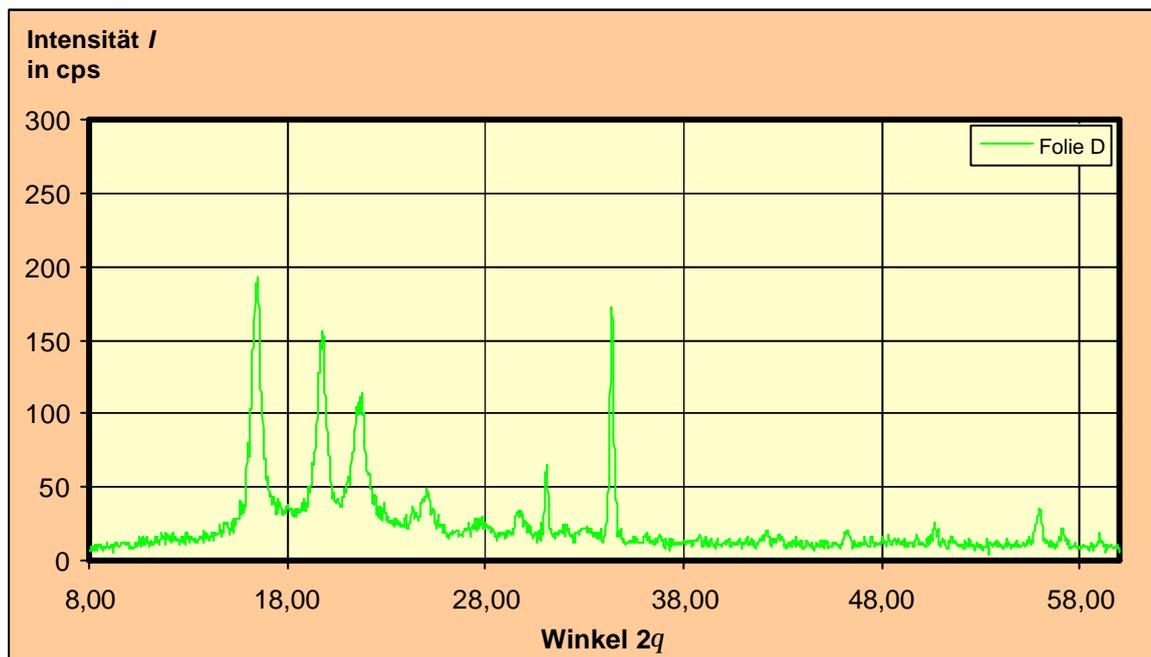
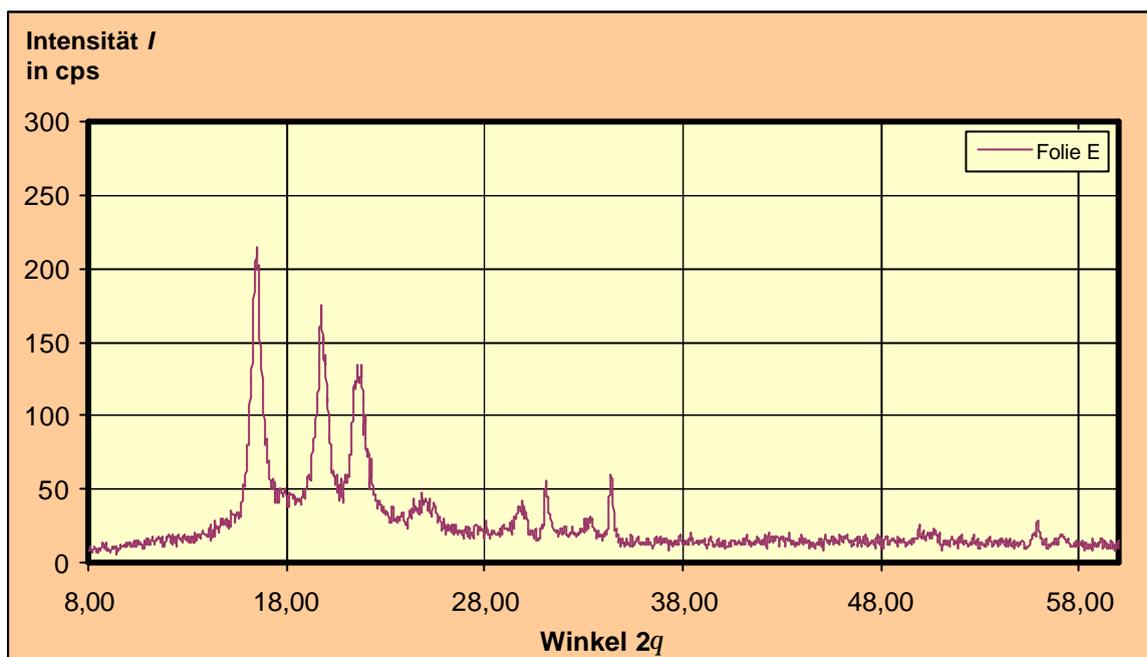
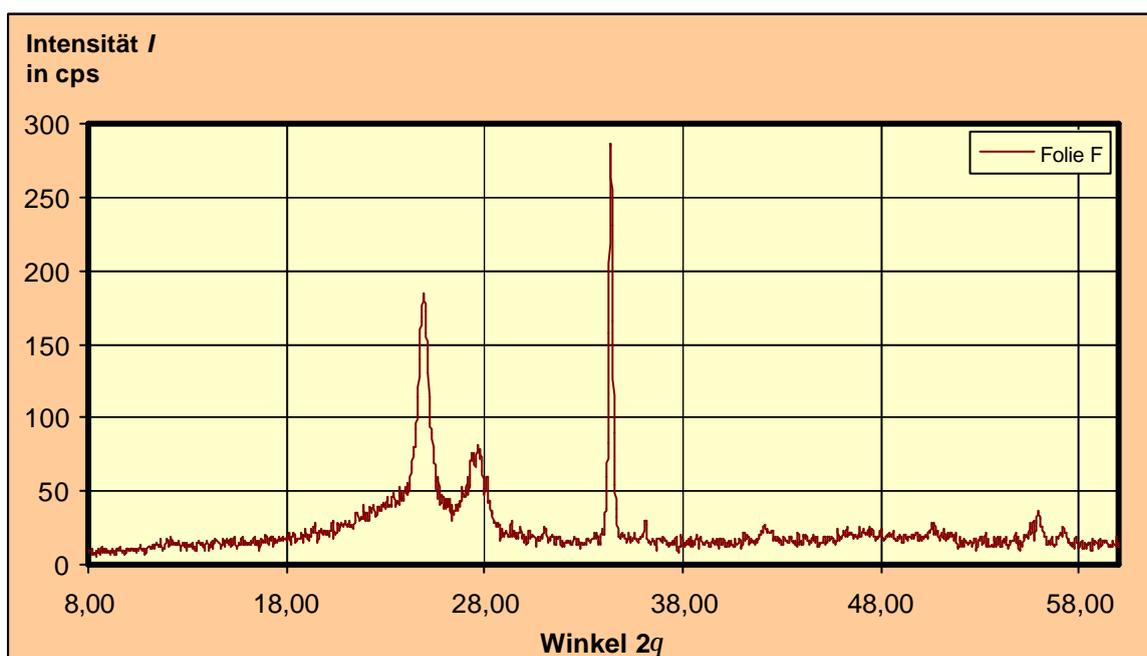


Abb. C-32
Röntgen-Diffraktometerdiagramm der 12 Monate frei bewitterterten Unterspannbahn D

**Abb. C-33**

Röntgen-Diffraktometerdiagramm der 12 Monate frei bewitterterten Unterspannbahn E

**Abb. C-34**

Röntgen-Diffraktometerdiagramm der 12 Monate frei bewitterterten Unterspannbahn F

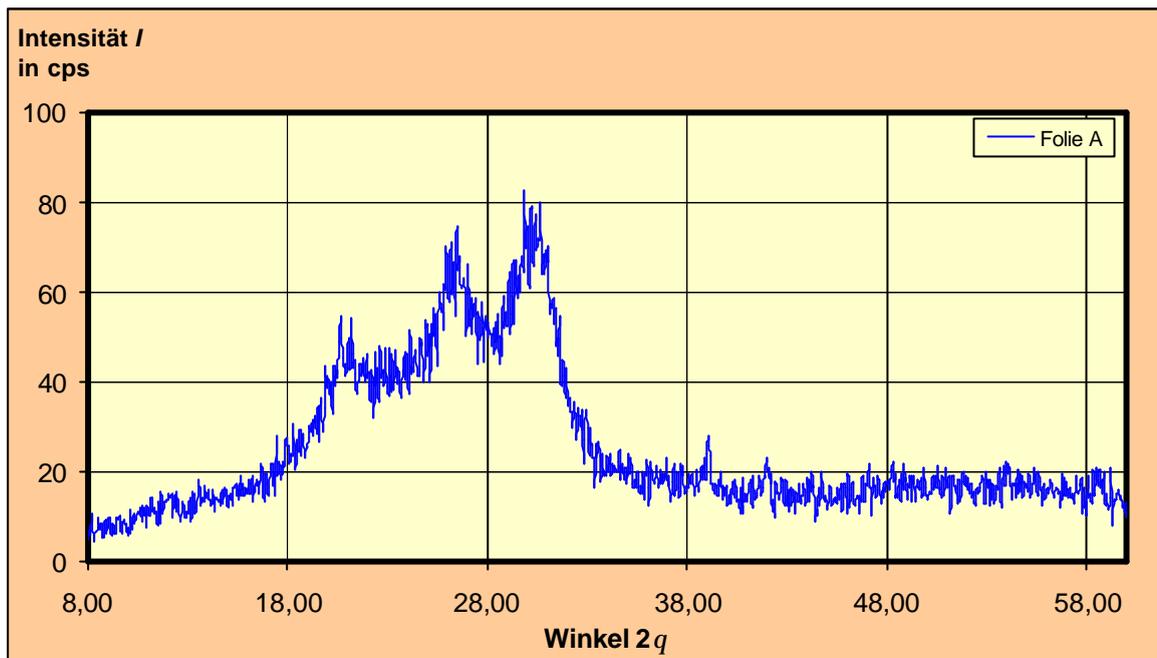


Abb. C-35

Röntgen-Diffraktometerdiagramm der wärmegelagerten Unterspannbahn A (80 °C / 4 Wo.)

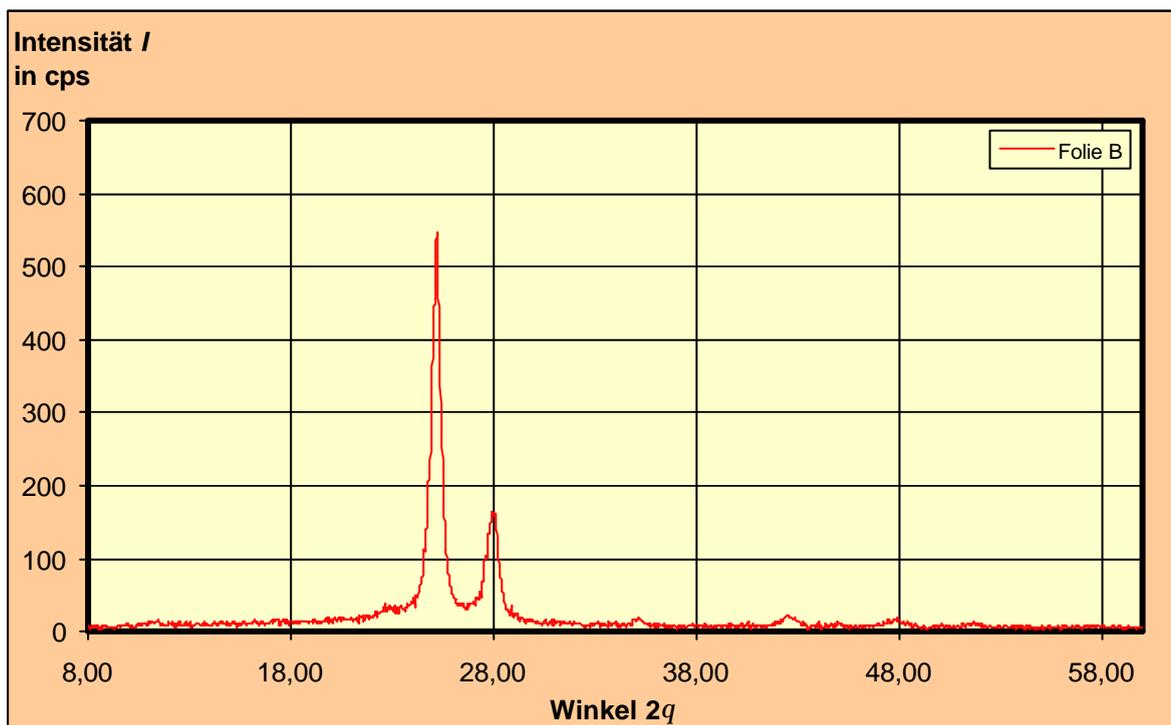
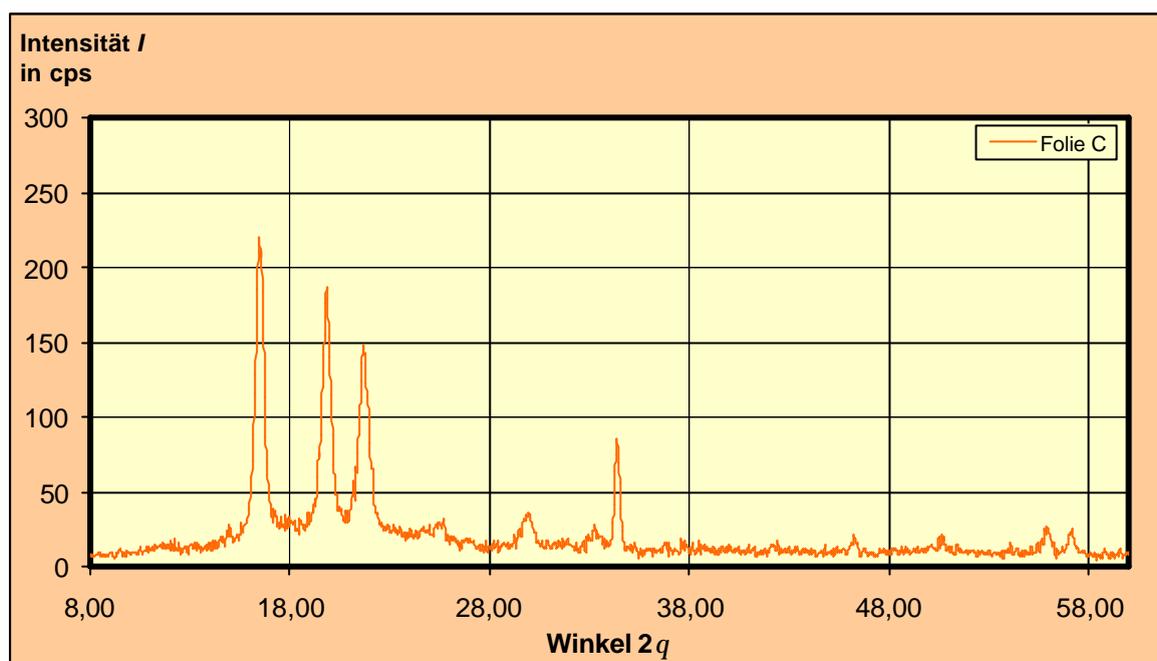
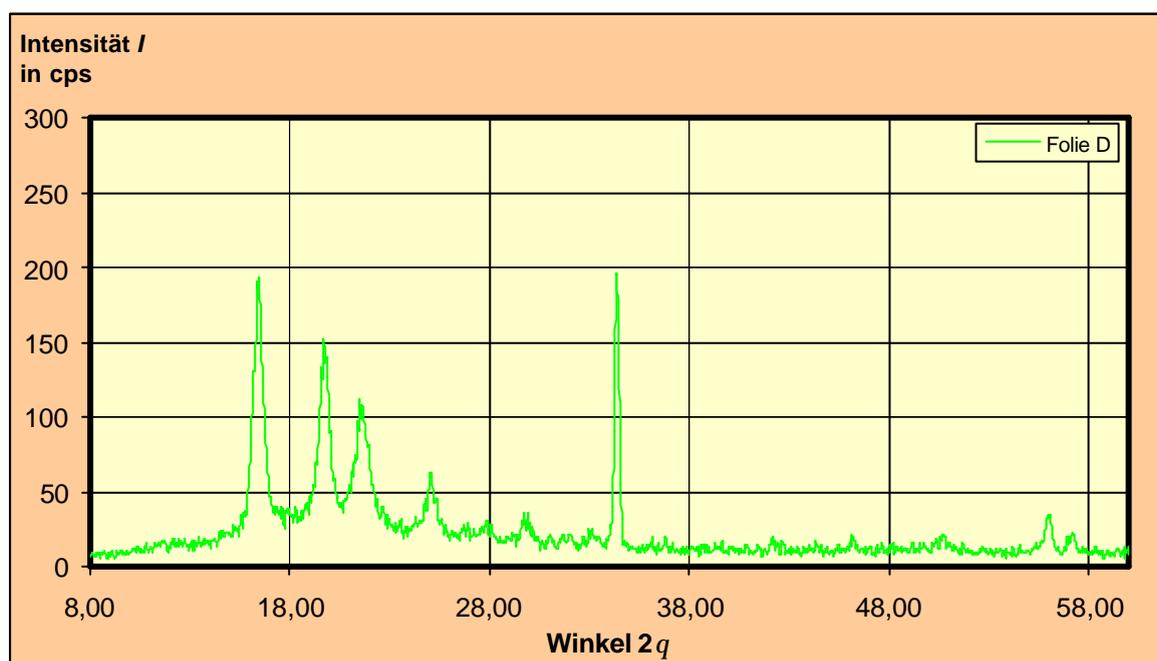


Abb. C-36

Röntgen-Diffraktometerdiagramm der wärmegelagerten Unterspannbahn B (80 °C / 4 Wo.)

**Abb. C-37**

Röntgen-Diffraktometerdiagramm der wärmegelagerten Unterspannbahn C
(80 °C / 4 Wo.)

**Abb. C-38**

Röntgen-Diffraktometerdiagramm der wärmegelagerten Unterspannbahn D
(80 °C / 4 Wo.)

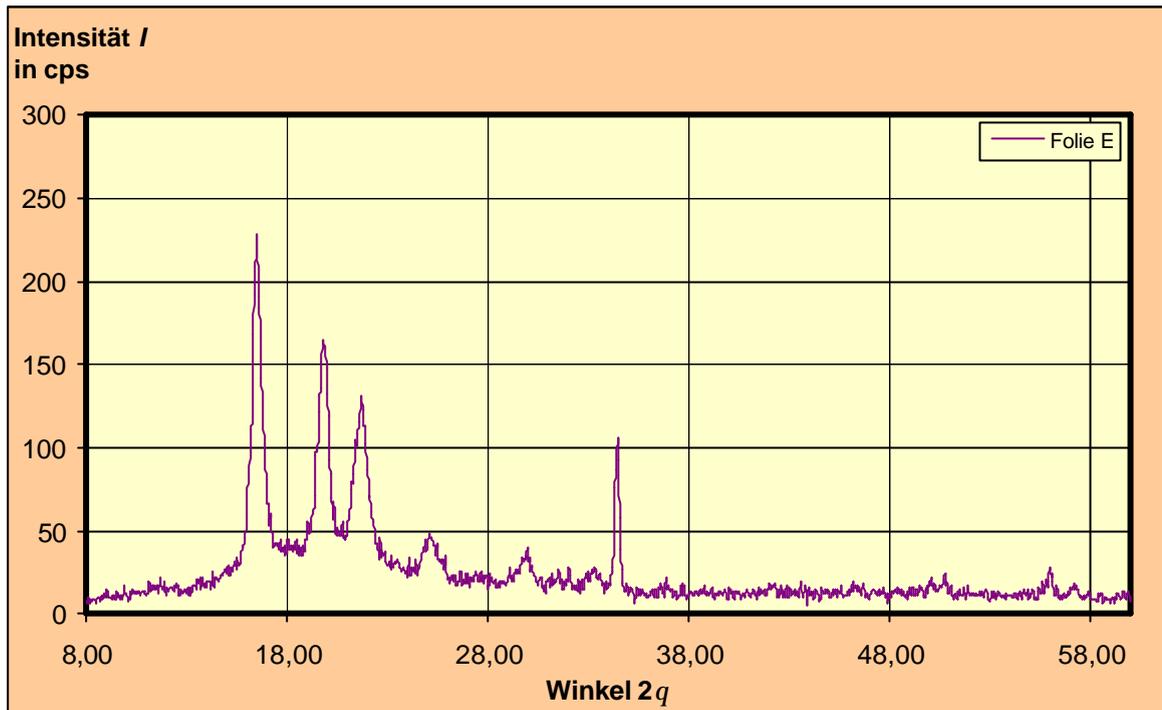


Abb. C-39

Röntgen-Diffraktometerdiagramm der wärmegelagerten Unterspannbahn E (80 °C / 4 Wo.)

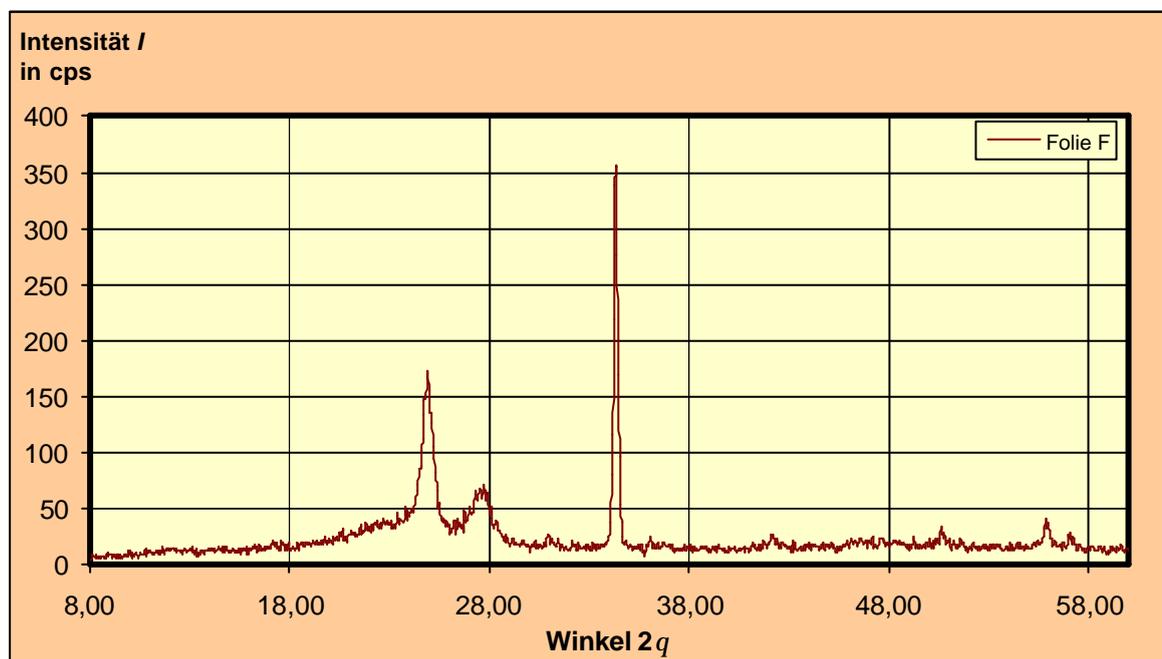
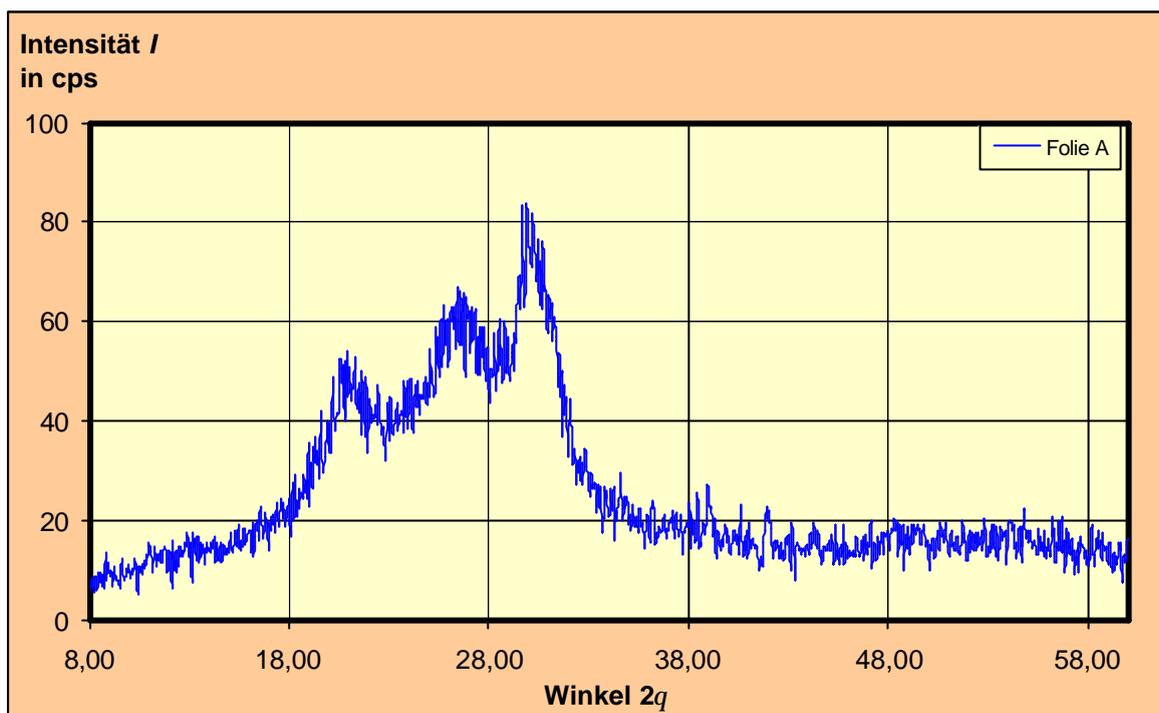
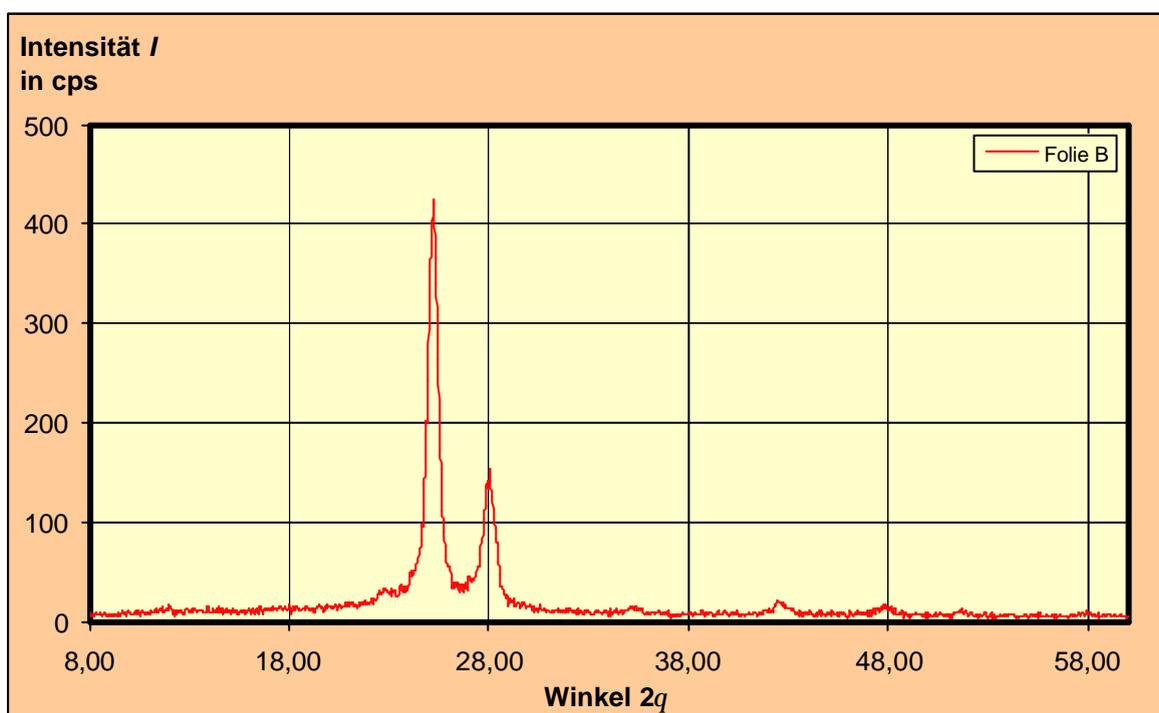


Abb. C-40

Röntgen-Diffraktometerdiagramm der wärmegelagerten Unterspannbahn F (80 °C / 4 Wo.)

**Abb. C-41**

Diffraktometerdiagramm der UV-gealterten Unterspannbahn A
(66,2 MJ/m² bei 50 °C)

**Abb. C-42**

Diffraktometerdiagramm der UV-gealterten Unterspannbahn B
(66,2 MJ/m² bei 50 °C)

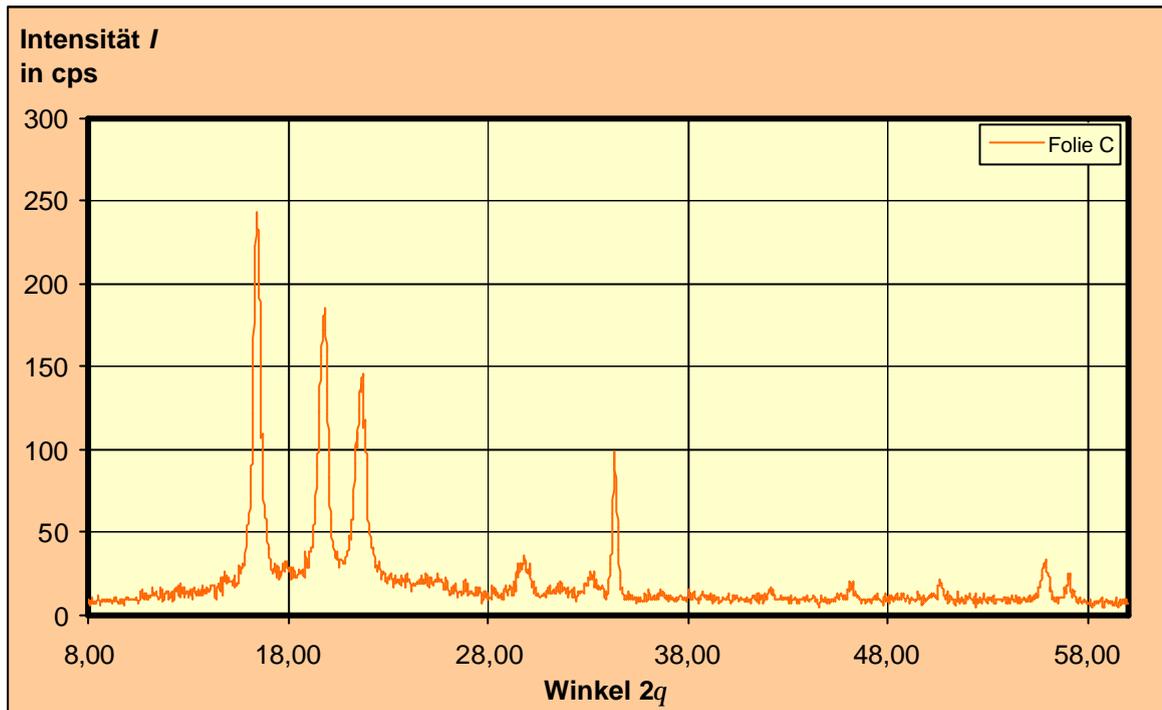


Abb. C-43
Diffraktometerdiagramm der UV-gealterten Unterspannbahn C
(66,2 MJ/m² bei 50 °C)

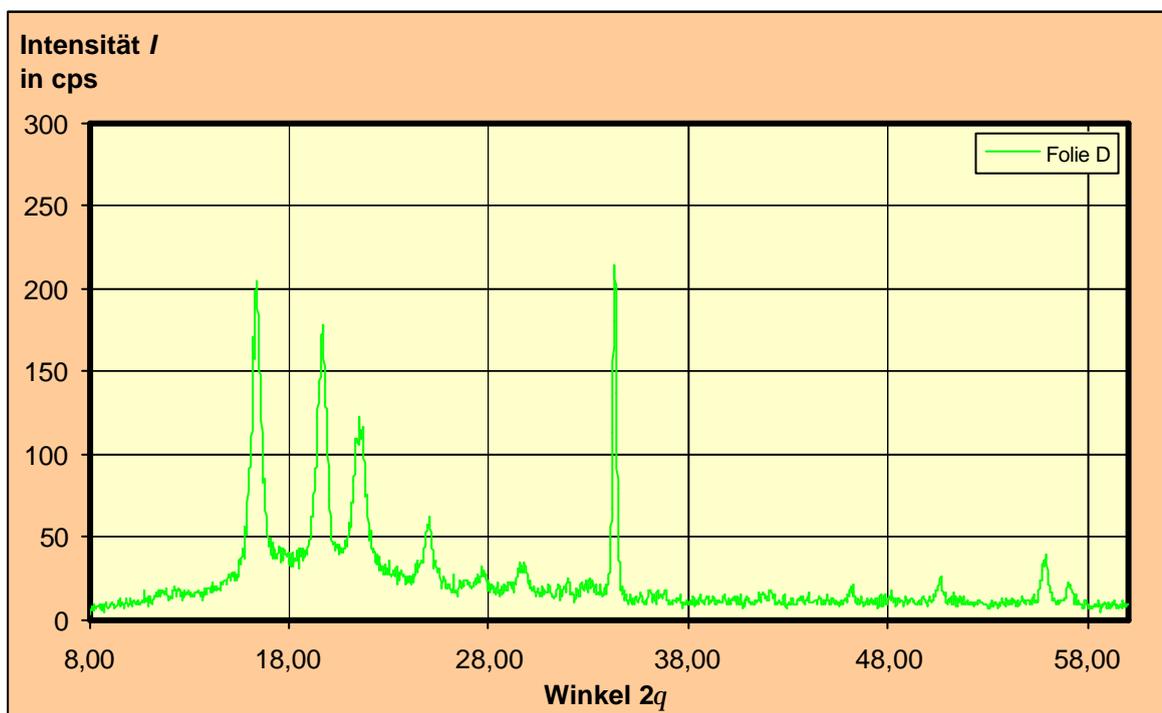
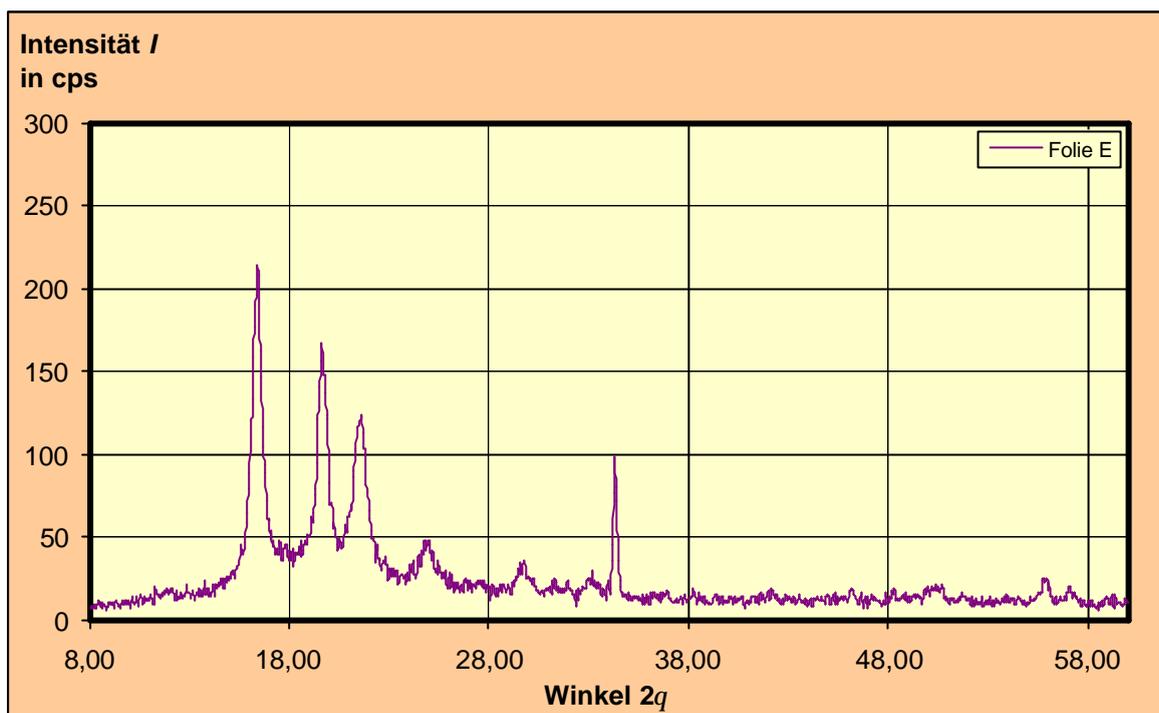
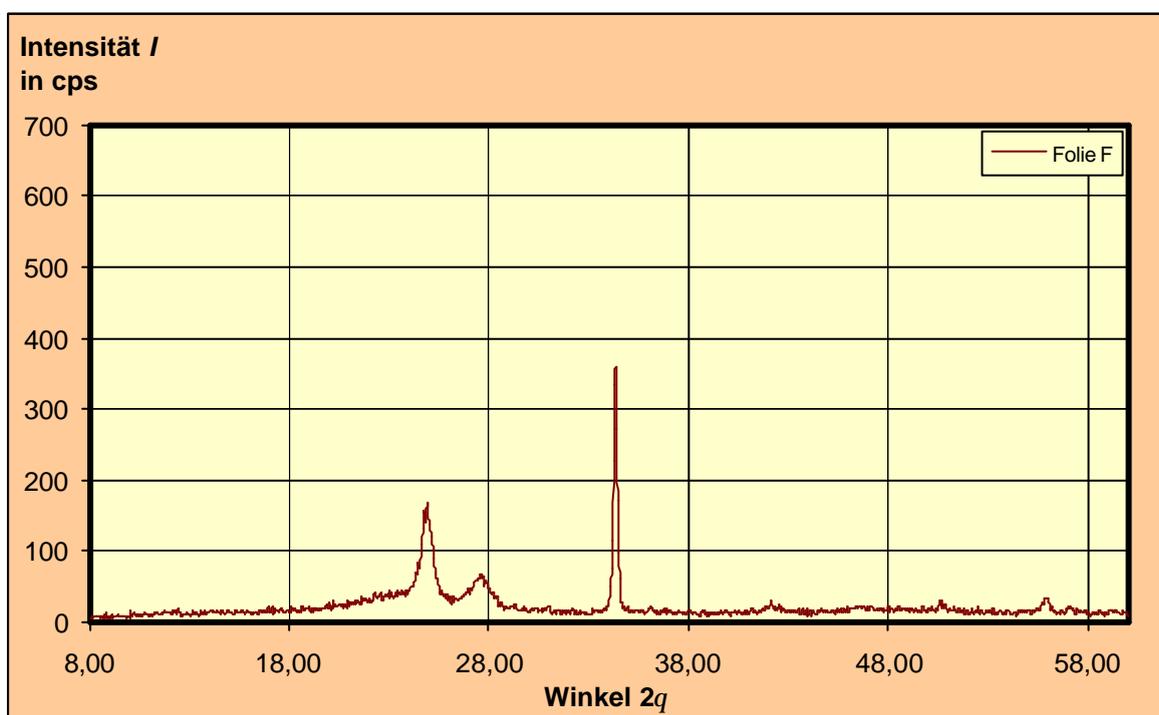


Abb. C-44
Diffraktometerdiagramm der UV-gealterten Unterspannbahn D
(66,2 MJ/m² bei 50 °C)

**Abb. C-45**

Diffraktometerdiagramm der UV-gealterten Unterspannbahn E
(66,2 MJ/m² bei 50 °C)

**Abb. C-46**

Diffraktometerdiagramm der UV-gealterten Unterspannbahn F
(66,2 MJ/m² bei 50 °C)

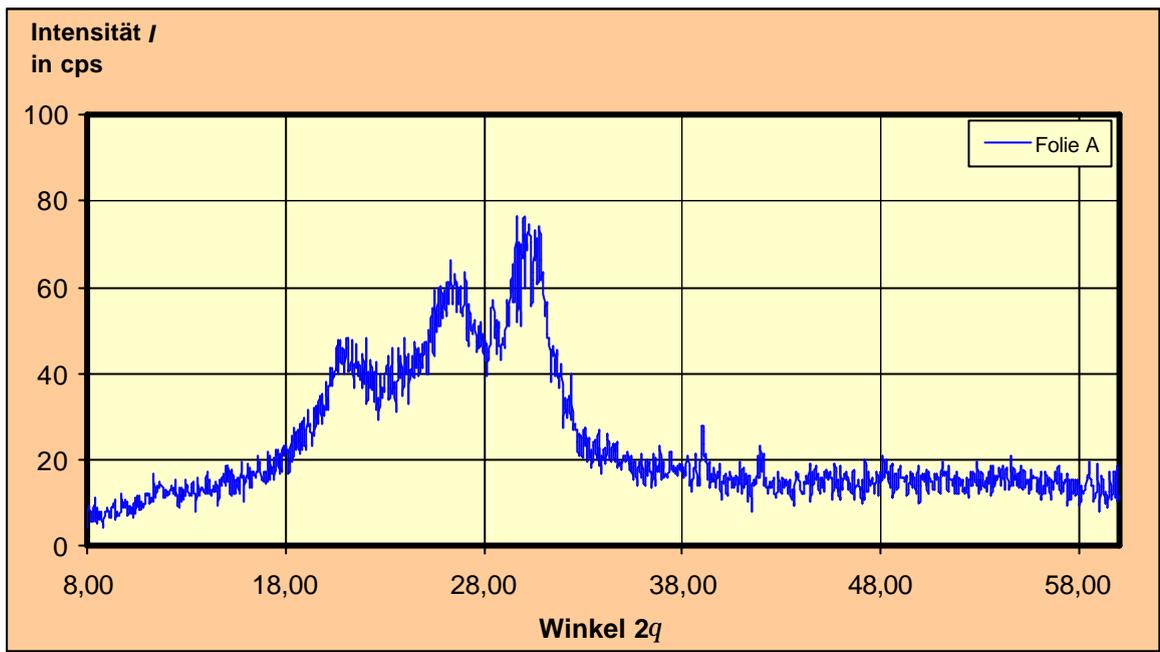


Abb. C-47
Diffraktometerdiagramm der nach Norm gealterten Unterspannbahn A
(54,5 MJ/m² bei 50 °C sowie 70 °C für 90 Tage)

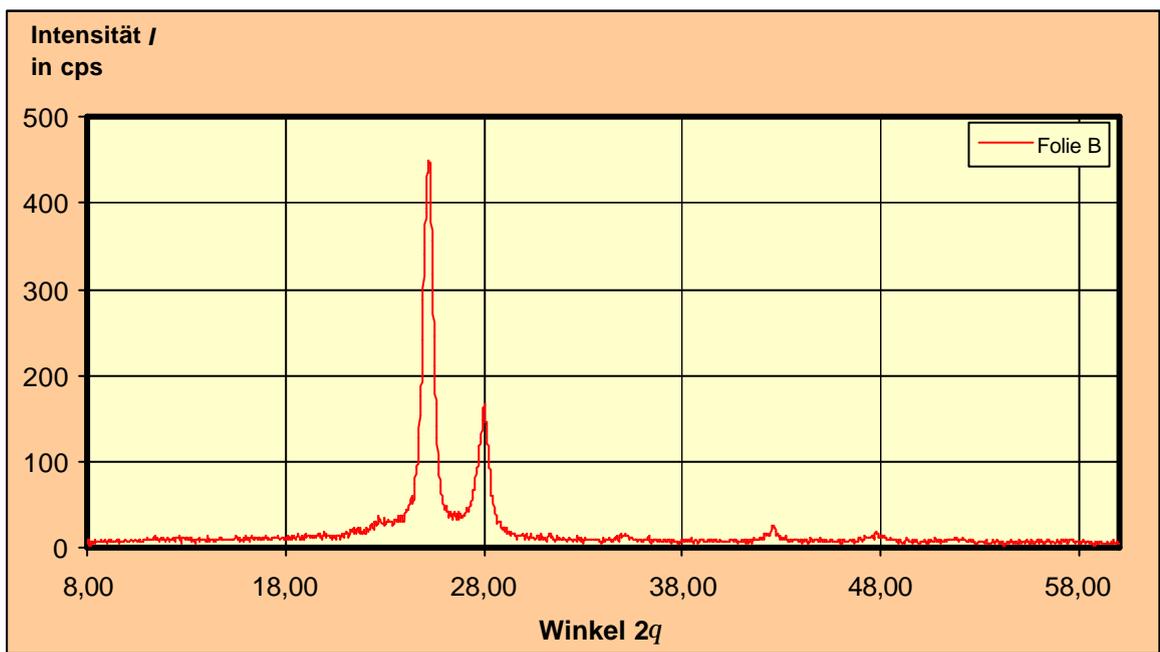
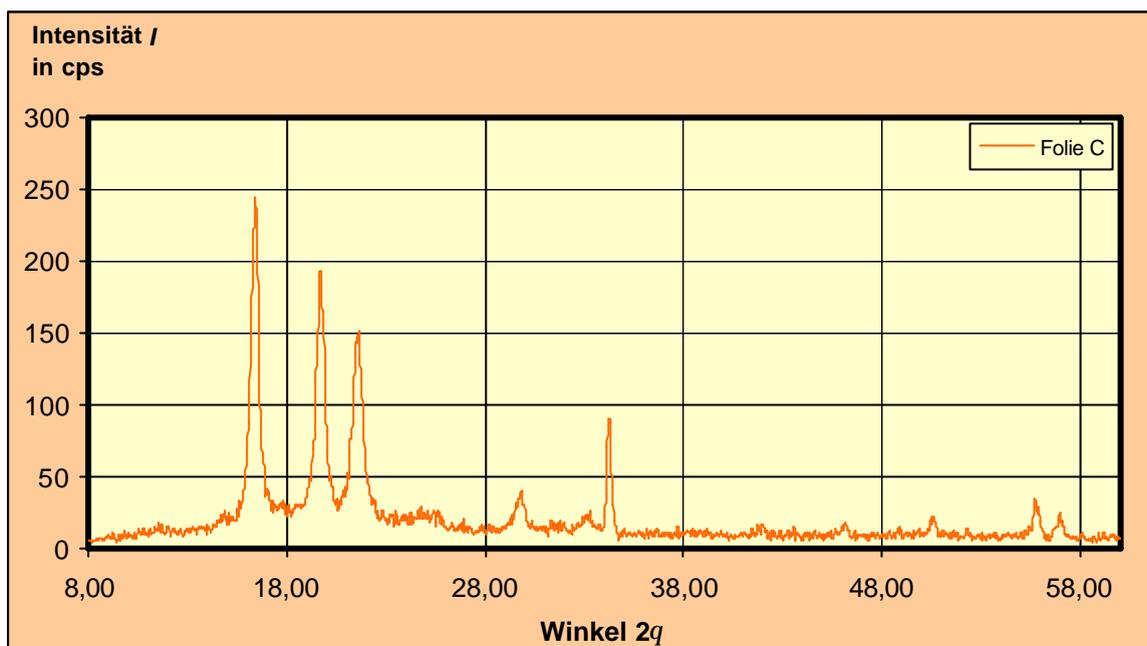
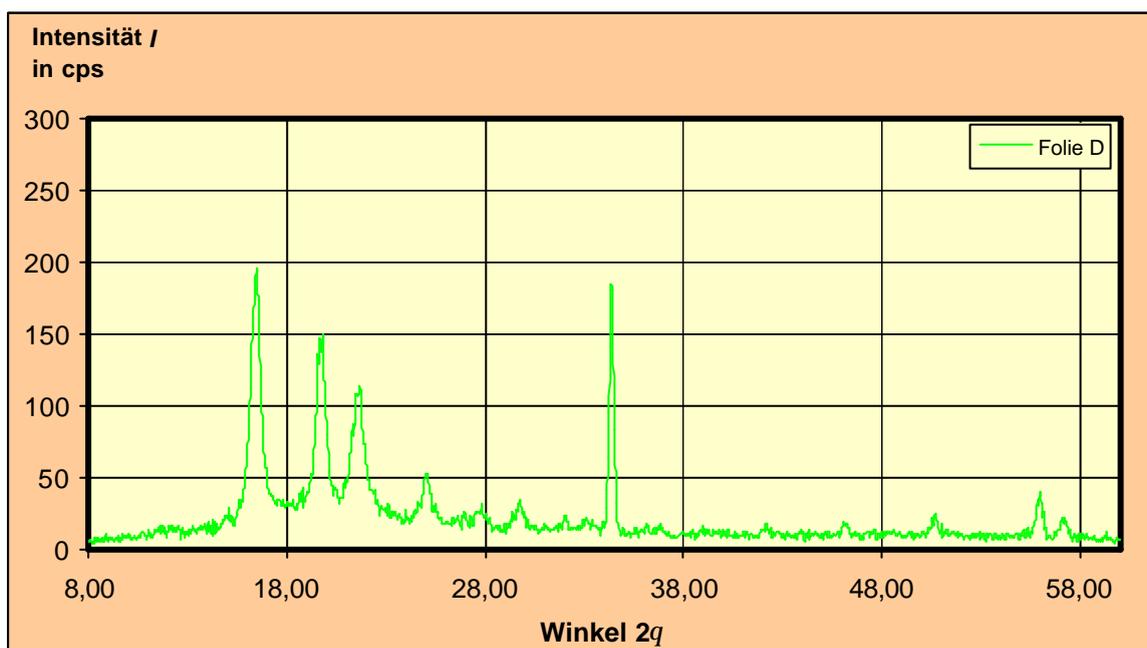


Abb. C-48
Diffraktometerdiagramm der nach Norm gealterten Unterspannbahn B
(54,5 MJ/m² bei 50 °C sowie 70 °C für 90 Tage)

**Abb. C-49**

Diffraktometerdiagramm der nach Norm gealterten Unterspannbahn C
(54,5 MJ/m² bei 50 °C sowie 70 °C für 90 Tage)

**Abb. C-50**

Diffraktometerdiagramm der nach Norm gealterten Unterspannbahn D
(54,5 MJ/m² bei 50 °C sowie 70 °C für 90 Tage)

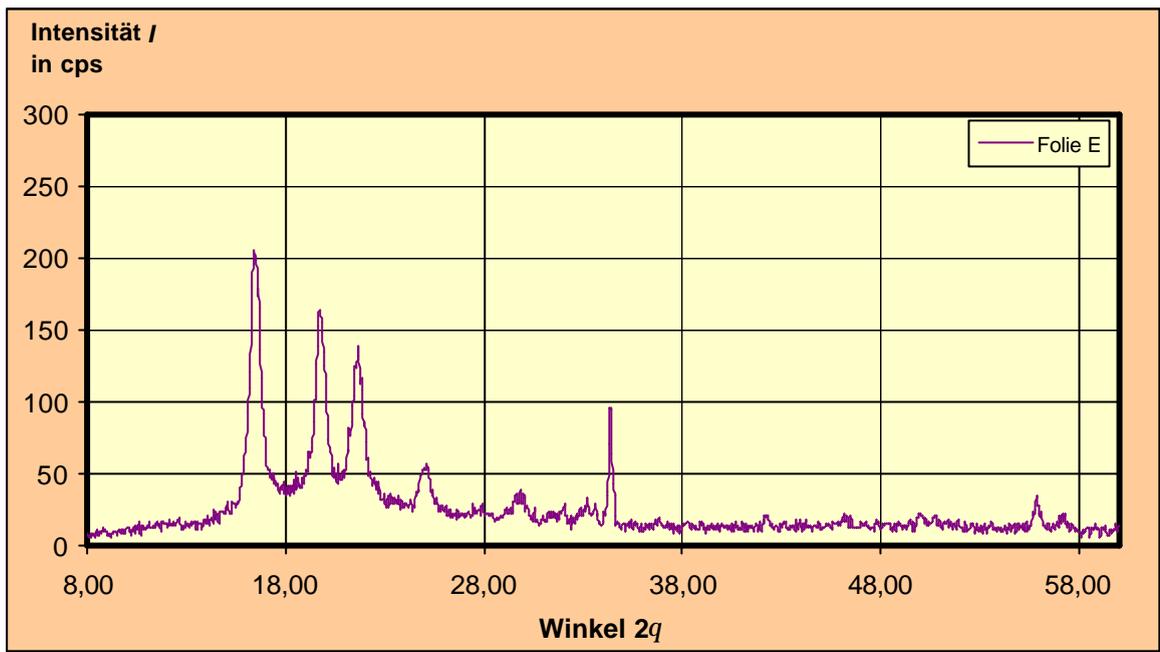


Abb. C-51

Diffraktometerdiagramm der nach Norm gealterten Unterspannbahn E (54,5 MJ/m² bei 50 °C sowie 70 °C für 90 Tage)

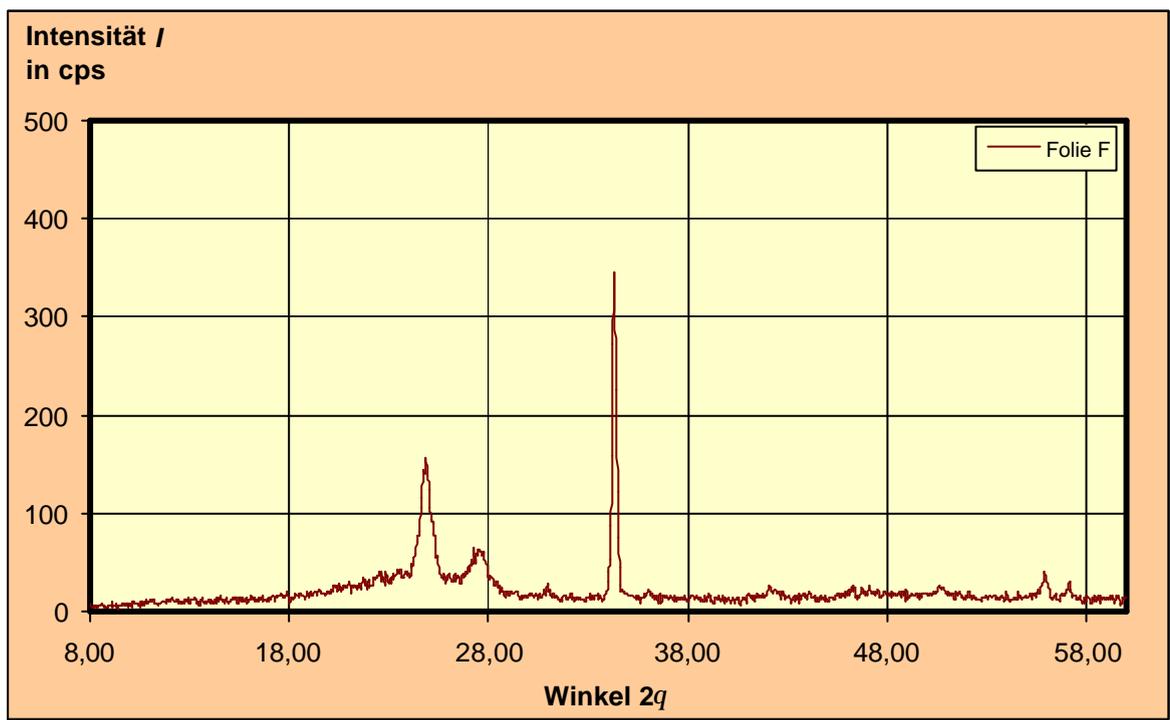


Abb. C-52

Diffraktometerdiagramm der nach Norm gealterten Unterspannbahn F (54,5 MJ/m² bei 50 °C sowie 70 °C für 90 Tage)

Anhang D: Alterungskennziffern d_t

Tabelle D-1

 Ermittlung der Alterungskennziffer d_t für die natürlich gealterte Folie A

Alterungs- kennziffer	Zeit t in Monaten									
	0	3	6	9	12	15	18	21	24	
h	900	939	1000	971	530	421	303	304	178	
d_h	h/h_{100}	4,50	4,70	5,00	4,86	2,65	2,11	1,52	1,52	0,89
	s_d	0,1217	0,2265	0,2174	0,1804	0,3046	0,3337	0,2964	0,3184	0,3367
d_{s_d}	$(s_d/s_{d,100})^{-1}$	4,11	2,21	2,30	2,77	1,64	1,50	1,69	1,57	1,49
	s	800	740	780	660	500	410	460	630	550
d_s	(s/s_{100})	8,00	7,40	7,80	6,60	5,00	4,10	4,60	6,30	5,50
	v_L	0,015	0,025	0,040	0,010	0,025	0,085	0,055	0,045	0,085
d_{v_L}	$(v_L/0,1)^{-1}$	6,67	4,00	2,50	10,00	4,00	1,18	1,82	2,22	1,18
$d_t = d_h \cdot d_{s_d} \cdot d_s \cdot d_{v_L}$		986,03	306,78	224,24	888,11	87,00	15,21	21,38	33,42	8,55

Tabelle D-2

 Ermittlung der Alterungskennziffer d_t für die natürlich gealterte Folie B

Alterungs- kennziffer	Zeit t in Monaten									
	0	3	6	9	12	15	18	21	24	
h	180	168	165	153	159	146	129	135	111	
d_h	h/h_{100}	0,90	0,84	0,83	0,77	0,80	0,73	0,65	0,68	0,56
	s_d	0,0283	0,0301	0,0287	0,0262	0,0308	0,0269	0,0204	0,0189	0,0223
d_{s_d}	$(s_d/s_{d,100})^{-1}$	17,67	16,61	17,42	19,08	16,23	18,59	24,51	26,46	22,42
	s	280	200	190	170	130	100	30	100	90
d_s	(s/s_{100})	2,80	2,00	1,90	1,70	1,30	1,00	0,30	1,00	0,90
	v_L	0,265	0,330	0,315	0,370	0,375	0,460	0,360	0,565	0,585
d_{v_L}	$(v_L/0,1)^{-1}$	0,38	0,30	0,32	0,27	0,27	0,22	0,28	0,18	0,17
$d_t = d_h \cdot d_{s_d} \cdot d_s \cdot d_{v_L}$		16,80	8,46	8,67	6,71	4,47	2,95	1,32	3,16	1,91

Tabelle D-3

 Ermittlung der Alterungskennziffer d_t für die natürlich gealterte Folie C

Alterungs- kennziffer	Zeit t in Monaten									
	0	3	6	9	12	15	18	21	24	
h	227	12	24	10	1	0	0	0	0	
d_h	h/h_{100}	1,14	0,06	0,12	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	s_d	0,0726	0,0471	0,0240	0,0189	0,0161	0,0129	0,0100	0,0107	0,0097
d_{s_d}	$(s_d/s_{d,100})^{-1}$	6,89	10,62	20,83	26,46	31,06	38,76	50,00	46,73	51,55
	s	380	290	300	270	140	110	170	220	210
d_s	(s/s_{100})	3,80	2,90	3,00	2,70	1,40	1,10	1,70	2,20	2,10
	v_L	0,010	4,350	7,745	17,775	106,71	432,80	452,18	432,80	432,80
d_{v_L}	$(v_L/0,1)^{-1}$	10,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$d_t = d_h \cdot d_{s_d} \cdot d_s \cdot d_{v_L}$		297,04	0,04	0,10	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabelle D-4

Ermittlung der Alterungskennziffer d_t für die natürlich gealterte Folie D

Alterungs-kennziffer		Zeit t in Monaten								
		0	3	6	9	12	15	18	21	24
	h	489	166	153	139	33	6	0	0	0
d_h	h/h_{100}	2,45	0,83	0,77	0,70	0,17	0,03	0,00	0,00	0,00
	s_d	0,0437	0,0749	0,0524	0,0570	0,0417	0,0224	0,0201	0,0215	0,0157
d_{sd}	$(s_d/s_{d,100})^{-1}$	11,44	6,68	9,54	8,77	11,99	22,32	24,88	23,26	31,85
	s	450	340	340	300	200	110	130	110	60
d_s	(s/s_{100})	4,50	3,40	3,40	3,00	2,00	1,10	1,30	1,10	0,60
	v_L	0,010	0,010	0,010	0,010	0,175	11,625	7,150	0,025	0,065
d_{vL}	$(v_L/0,1)^{-1}$	10,00	10,00	10,00	10,00	0,57	0,01	0,01	4,00	1,54
$d_t = d_h \cdot d_{sd} \cdot d_s \cdot d_{vL}$		1258,9	188,38	248,19	182,89	2,26	0,01	0,00	0,00	0,00

Tabelle D-5

Ermittlung der Alterungskennziffer d_t für die natürlich gealterte Folie E

Alterungs-kennziffer		Zeit t in Monaten								
		0	3	6	9	12	15	18	21	24
	h	344	188	86	12	0	0	0	0	0
d_h	h/h_{100}	1,72	0,94	0,43	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	s_d	0,0406	0,0495	0,0399	0,0393	0,0181	0,0145	0,0167	0,0141	0,0137
d_{sd}	$(s_d/s_{d,100})^{-1}$	12,32	10,10	12,53	12,72	27,62	34,48	29,94	35,46	36,50
	s	530	360	370	350	230	220	220	120	130
d_s	(s/s_{100})	5,30	3,60	3,70	3,50	2,30	2,20	2,20	1,20	1,30
	v_L	0,015	0,075	0,025	0,470	70,335	340,40	256,75	332,92	332,92
d_{vL}	$(v_L/0,1)^{-1}$	6,67	1,33	4,00	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$d_t = d_h \cdot d_{sd} \cdot d_s \cdot d_{vL}$		748,44	45,58	79,75	0,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabelle D-6

Ermittlung der Alterungskennziffer d_t für die natürlich gealterte Folie F

Alterungs-kennziffer		Zeit t in Monaten								
		0	3	6	9	12	15	18	21	24
	h	644	533	462	366	261	93	43	30	0
d_h	h/h_{100}	3,22	2,67	2,31	1,83	1,31	0,47	0,22	0,15	0,00
	s_d	0,3510	0,5711	0,2766	0,6346	0,2989	0,5384	0,2536	0,2002	0,3448
d_{sd}	$(s_d/s_{d,100})^{-1}$	1,42	0,88	1,81	0,79	1,67	0,93	1,97	2,50	1,45
	s	970	820	620	970	670	700	840	870	720
d_s	(s/s_{100})	9,70	8,20	6,20	9,70	6,70	7,00	8,40	8,70	7,20
	v_L	0,010	0,015	0,015	0,010	0,010	0,050	0,050	0,040	0,050
d_{vL}	$(v_L/0,1)^{-1}$	10,00	6,67	6,67	10,00	10,00	2,00	2,00	2,50	2,00
$d_t = d_h \cdot d_{sd} \cdot d_s \cdot d_{vL}$		444,93	127,55	172,60	139,86	146,26	6,05	7,12	8,15	0,00

Tabelle D-7Ermittlung der Alterungskennziffer d_t für die künstlich gealterte Folie A

Alterungs- kennziffer		Belastung						Norm
		40 °C 4 Wo.	60 °C 4 Wo.	80 °C 4 Wo.	66,2 MJ/m ² (50 °C)	66,2 MJ/m ² (70 °C)	136,4 MJ/m ² (50 °C)	
	h	1062	1082	1085	1100	800	811	1062
d_h	h/h_{100}	5,31	5,41	5,43	5,50	4,00	4,06	5,31
	s_d	0,1948	0,1732	0,2546	0,2933	0,2059	0,2019	0,2143
d_{sd}	$(s_d/s_{d,100})^{-1}$	2,57	2,89	1,96	1,70	2,43	2,48	2,33
	s	819,30	832,20	701,20	577,00	466,50	577,00	603,20
d_s	(s/s_{100})	8,19	8,32	7,01	5,77	4,67	5,77	6,03
	v_L	0,015	0,020	0,015	0,010	0,053	0,035	0,010
d_{vL}	$(v_L/0,1)^{-1}$	6,67	5,00	6,67	10,00	1,90	2,86	10,00
$d_t = d_h \cdot d_{sd} \cdot d_s \cdot d_{vL}$		744,44	649,86	498,04	541,00	85,98	165,55	747,31

Tabelle D-8Ermittlung der Alterungskennziffer d_t für die künstlich gealterte Folie B

Alterungs- kennziffer		Belastung						Norm
		40 °C 4 Wo.	60 °C 4 Wo.	80 °C 4 Wo.	66,2 MJ/m ² (50 °C)	66,2 MJ/m ² (70 °C)	136,4 MJ/m ² (50 °C)	
	h	170	189	123	178	178	178	189
d_h	h/h_{100}	0,85	0,95	0,62	0,89	0,89	0,89	0,95
	s_d	0,0246	0,0318	0,0317	0,0229	0,0246	0,0287	0,0219
d_{sd}	$(s_d/s_{d,100})^{-1}$	20,33	15,72	15,77	21,83	20,33	17,42	22,83
	s	166,90	216,70	145,80	165,30	166,10	87,40	173,50
d_s	(s/s_{100})	1,67	2,17	1,46	1,65	1,66	0,87	1,74
	v_L	0,250	0,210	0,210	0,305	0,074	0,285	0,280
d_{vL}	$(v_L/0,1)^{-1}$	0,40	0,48	0,48	0,33	1,35	0,35	0,36
$d_t = d_h \cdot d_{sd} \cdot d_s \cdot d_{vL}$		11,53	15,33	6,73	10,53	40,55	4,75	13,37

Tabelle D-9Ermittlung der Alterungskennziffer d_t für die künstlich gealterte Folie C

Alterungs- kennziffer		Belastung						Norm
		40 °C 4 Wo.	60 °C 4 Wo.	80 °C 4 Wo.	66,2 MJ/m ² (50 °C)	66,2 MJ/m ² (70 °C)	136,4 MJ/m ² (50 °C)	
	h	285	313	230	89	78	0	44
d_h	h/h_{100}	1,43	1,57	1,15	0,45	0,39	0,00	0,22
	s_d	0,0811	0,0949	0,0921	0,0239	0,0394	0,0187	0,0713
d_{sd}	$(s_d/s_{d,100})^{-1}$	6,17	5,27	5,43	20,92	12,69	26,74	7,01
	s	367,90	376,40	349,70	330,70	308,00	237,40	340,30
d_s	(s/s_{100})	3,68	3,76	3,50	3,31	3,08	2,37	3,40
	v_L	0,010	0,010	0,010	0,020	35,384	93,795	0,880
d_{vL}	$(v_L/0,1)^{-1}$	10,00	10,00	10,00	5,00	0,00	0,00	0,11
$d_t = d_h \cdot d_{sd} \cdot d_s \cdot d_{vL}$		323,22	310,36	218,33	153,93	0,04	0,00	0,60

Tabelle D-10Ermittlung der Alterungskennziffer d_t für die künstlich gealterte Folie D

Alterungs- kennziffer		Belastung						Norm
		40 °C 4 Wo.	60 °C 4 Wo.	80 °C 4 Wo.	66,2 MJ/m ² (50 °C)	66,2 MJ/m ² (70 °C)	136,4 MJ/m ² (50 °C)	
	h	604	561	496	511	422	289	451
d_h	h/h_{100}	3,02	2,81	2,48	2,56	2,11	1,45	2,26
	s_d	0,0623	0,0488	0,0623	0,0833	0,0904	0,0581	0,0580
d_{sd}	$(s_d/s_{d,100})^{-1}$	8,03	10,25	8,03	6,00	5,53	8,61	8,62
	s	447,90	443,10	441,80	418,60	408,00	342,2	416,00
d_s	(s/s_{100})	4,48	4,43	4,42	4,19	4,08	3,42	4,16
	v_L	0,010	0,010	0,010	0,010	0,022	0,010	0,010
d_{vL}	$(v_L/0,1)^{-1}$	10,00	10,00	10,00	10,00	4,46	10,00	10,00
$d_t = d_h \cdot d_{sd} \cdot d_s \cdot d_{vL}$		1085,60	1273,46	879,35	641,97	212,57	425,54	808,69

Tabelle D-11Ermittlung der Alterungskennziffer d_t für die künstlich gealterte Folie E

Alterungs- kennziffer		Belastung						Norm
		40 °C 4 Wo.	60 °C 4 Wo.	80 °C 4 Wo.	66,2 MJ/m ² (50 °C)	66,2 MJ/m ² (70 °C)	136,4 MJ/m ² (50 °C)	
	h	417	532	474	604	522	411	0
d_h	h/h_{100}	2,09	2,66	2,37	3,02	2,61	2,06	0,00
	s_d	0,0610	0,0445	0,0436	0,0704	0,0463	0,0484	0,0599
d_{sd}	$(s_d/s_{d,100})^{-1}$	8,20	11,24	11,47	7,10	10,80	10,33	8,35
	s	538,60	520,90	495,60	481,60	479,50	477,00	518,30
d_s	(s/s_{100})	5,39	5,21	4,96	4,82	4,80	4,77	5,18
	v_L	0,010	0,010	0,015	0,015	0,051	0,025	0,010
d_{vL}	$(v_L/0,1)^{-1}$	10,00	10,00	6,67	6,67	1,96	4,00	10,00
$d_t = d_h \cdot d_{sd} \cdot d_s \cdot d_{vL}$		920,48	1556,85	897,99	688,65	264,48	405,06	0,00

Tabelle D-12Ermittlung der Alterungskennziffer d_t für die künstlich gealterte Folie F

Alterungs- kennziffer		Belastung						Norm
		40 °C 4 Wo.	60 °C 4 Wo.	80 °C 4 Wo.	66,2 MJ/m ² (50 °C)	66,2 MJ/m ² (70 °C)	136,4 MJ/m ² (50 °C)	
	h	1067	960	979	1029	1029	728	1067
d_h	h/h_{100}	5,34	4,80	4,90	5,15	5,15	3,64	5,34
	s_d	1,1614	0,6167	1,2434	0,5754	0,3885	0,3151	0,5807
d_{sd}	$(s_d/s_{d,100})^{-1}$	0,43	0,81	0,40	0,87	1,29	1,59	0,86
	s	1010,40	962,60	986,40	904,30	1121,50	1043,10	1095,70
d_s	(s/s_{100})	10,10	9,63	9,86	9,04	11,22	10,43	10,96
	v_L	0,010	0,015	0,020	0,010	0,042	0,020	0,010
d_{vL}	$(v_L/0,1)^{-1}$	10,00	6,67	5,00	10,00	2,36	5,00	10,00
$d_t = d_h \cdot d_{sd} \cdot d_s \cdot d_{vL}$		232,07	249,74	97,08	404,29	175,15	301,24	503,32

