

4.3 Zugprüfungen nach DIN 53 504

4.3.1 Mechanische Eigenschaften von Polyethylenfolien

Für die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen spielen neben den von außen einwirkenden Faktoren, wie Temperatur und umgebende Medien, die Molekularstruktur, die Zeit und die Größe der Belastung eine entscheidende Rolle. Des weiteren wird das mechanische Verhalten eines Polymers grundlegend vom Kristallisationsgrad der Probe beeinflusst. Die Bedeutung von Kristallinität und Molekulargewicht auf die Spannbreite von Eigenschaften wird in Abbildung 4.19 am Beispiel von Polyethylen demonstriert.

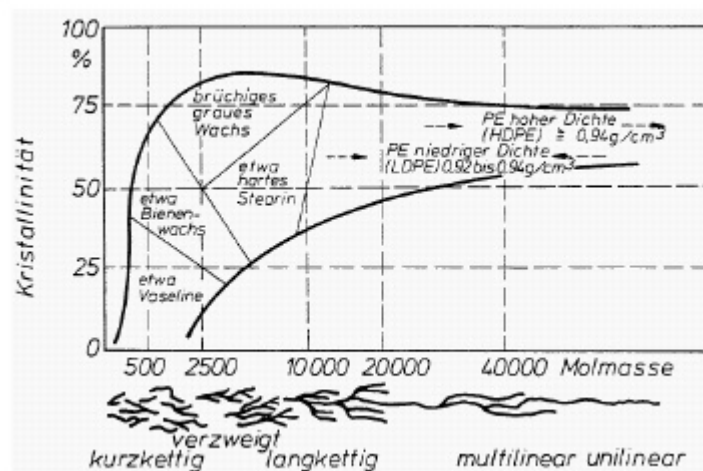


Abbildung 4.19: Einfluss der Molmasse auf Struktur und Konsistenz von Polyethylen ^[83]

Bei Raumtemperatur bestimmen die kristallinen Bereiche die Festigkeits- bzw. Steifigkeitseigenschaften von Polyethylen, während die amorphen Bereiche für das zähe, zeitabhängige Verhalten verantwortlich sind. Der Haupteffekt der Kristallite in der Probe beruht dabei auf ihrer Wirkung als Vernetzungsstellen in der Polymermatrix.

Die für den Anwender von Gewächshausfolien wichtigste Eigenschaft, die mechanische Stabilität, lässt sich durch die beiden Kenngrößen Reißfestigkeit und Reißdehnung ausreichend charakterisieren. Dazu wird der Prüfkörper in eine Zug-Dehnungsmaschine gespannt (siehe Abbildung 4.20) und mit konstanter Geschwindigkeit solange gedehnt bis er reißt. Die Spannung σ und die resultierende Dehnung ϵ werden währenddessen kontinuierlich gemessen.

Polymere wie Polyethylen zeigen unter Zugbeanspruchung ein Verhalten, wie es in Abbildung 4.21 dargestellt ist. Bei Erreichen der Streckgrenze (Punkt C) ist eine Einschnürung am Probenkörper zu beobachten. Diese Einschnürung verlängert sich bei weiterer Zugbe-

anspruchung, das Polymer fließt. Im linearen Bereich zwischen dem Ursprung A und dem Punkt B gilt das Hookesche Gesetz. Die Zugspannung ist der Dehnung proportional. Die Polymerproben nehmen bei Entlastung wieder ihre ursprüngliche Form an, sie sind elastisch.

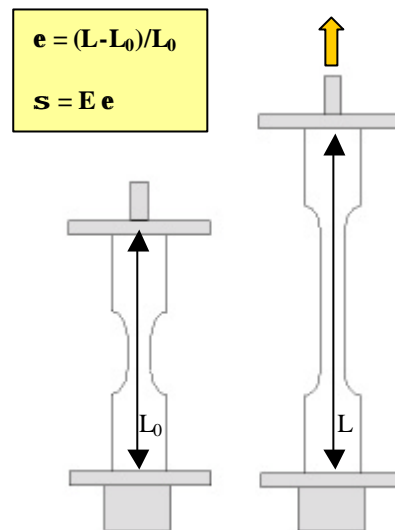


Abbildung 4.20: Dehnung des Prüfkörpers; ϵ = Dehnung, σ = Spannung und E = E-Modul

Oberhalb der Elastizitätsgrenze B führen innere Umlagerungen zu einer bleibenden Formveränderung. Erhöht man die Spannung σ weiter, so wächst die Dehnung deutlich stärker als die Spannung und erreicht im Punkt C ein lokales Maximum.

Der Punkt C wird als Fließpunkt bezeichnet. Bei zähen Materialien brechen oberhalb des Fließpunktes die van-der-Waals-Bindungen, d.h. die Kettensegmente rutschen voneinander ab, und das Material beginnt zu fließen. Die Zugdehnung ϵ_D ist die höchste Dehnung, die das Material gerade noch aushält; bei noch höherer Dehnung reißt oder bricht das Material im Punkt E. σ_E nennt man deshalb auch Reißfestigkeit und analog bezeichnet man ϵ_E als Reiß- oder auch Bruchdehnung.

Der E-Modul ist die Steigung σ/ϵ im anfänglichen elastischen Teil des Experiments. Bei Zugversuchen hängt er teilweise von der Zeit und der Dehnungsgeschwindigkeit $d\epsilon/dt$ ab. Aufgrund der Abhängigkeit des E-Moduls von der Dehnungsgeschwindigkeit wird diese genormt. Alle Zugversuche wurden nach DIN 53 504 mit einer Dehnungsgeschwindigkeit von 100 mm/min durchgeführt. Wegen der unkomplizierten Messmethode wird die Veränderung der Zugfestigkeit bei Alterungsprozessen oft als Schädigungskriterium benutzt.

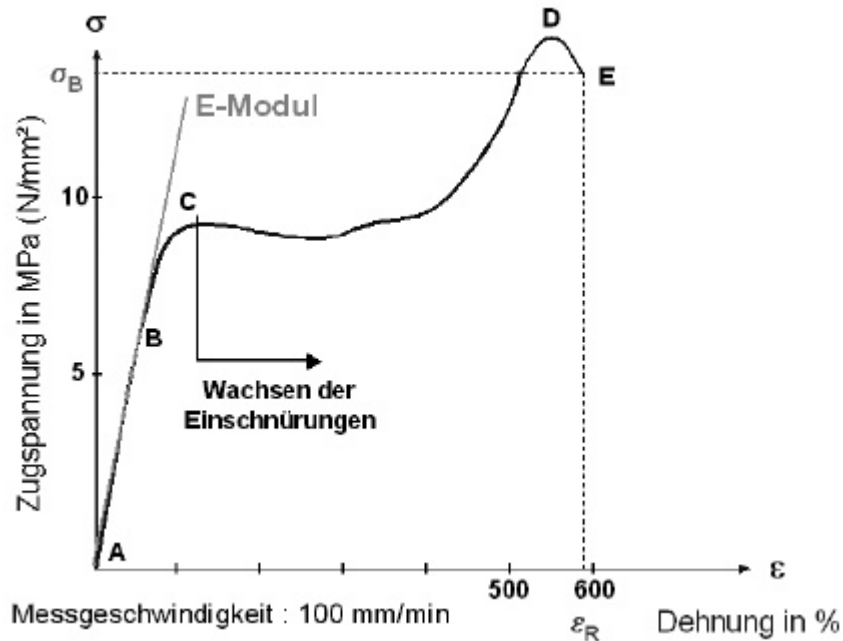


Abbildung 4.21: Prinzipdarstellung eines Zug-Dehnungs-Diagramms mit charakteristischen Punkten;
mit ϵ_R = Reißdehnung in %

Nicht alle mechanischen Eigenschaften der Folien werden durch die Photoalterung im gleichen Ausmaß beeinflusst. So reagiert die Reißdehnung im Vergleich zur Reißfestigkeit und zum E-Modul besonders empfindlich auf Degradationsprozesse im Polymermaterial⁽⁸⁴⁾. Daher wurden für Vergleiche verschieden stabilisierter Folien hauptsächlich die Reißdehnungswerte herangezogen. Da bedingt durch die Herstellung der Folien eine mehr oder weniger ausgeprägte Anisotropie der Reißdehnungswerte in Längs- und Querrichtung der Folienbahn zu erwarten ist, wurden Probenkörper sowohl parallel als auch senkrecht zur Maschinenrichtung ausgestanzt und Zugprüfungen unterworfen. Im Rahmen ihrer Standardabweichungen lagen die Reißdehnungsmittelwerte der in Längs- und Querrichtung der Folienbahn ausgestanzten Probenkörper im gleichen Wertebereich. Daher wurden in allen folgenden Untersuchungen die Probenkörper immer parallel zur Maschinenrichtung ausgestanzt (siehe auch Abschnitt 3.3.10).

4.3.2 Zugprüfungen an Modellfolien

Variation des Stabilisortyps

Abbildung 4.22 und Abbildung 4.23 zeigen die prozentuale Abnahme der Reißdehnungswerte nach ADF-Test bzw. säurefreier Bewitterung am Beispiel der Folien M-2 bis M-10.

Bei allen untersuchten Folien förderte die Anwesenheit von Säure den Abbau der mechanischen Festigkeit in unterschiedlich starkem Maße. Legt man, wie in der Literatur oft üblich, einen Festigkeitsverlust von 50 % als Ausfallkriterium zu Grunde ^[85], so bewirkte die Anwesenheit von saurem Niederschlag bei Folie M-2 (grüne Kurve) eine Verkürzung der Lebensdauer um ca. 22 Tage.

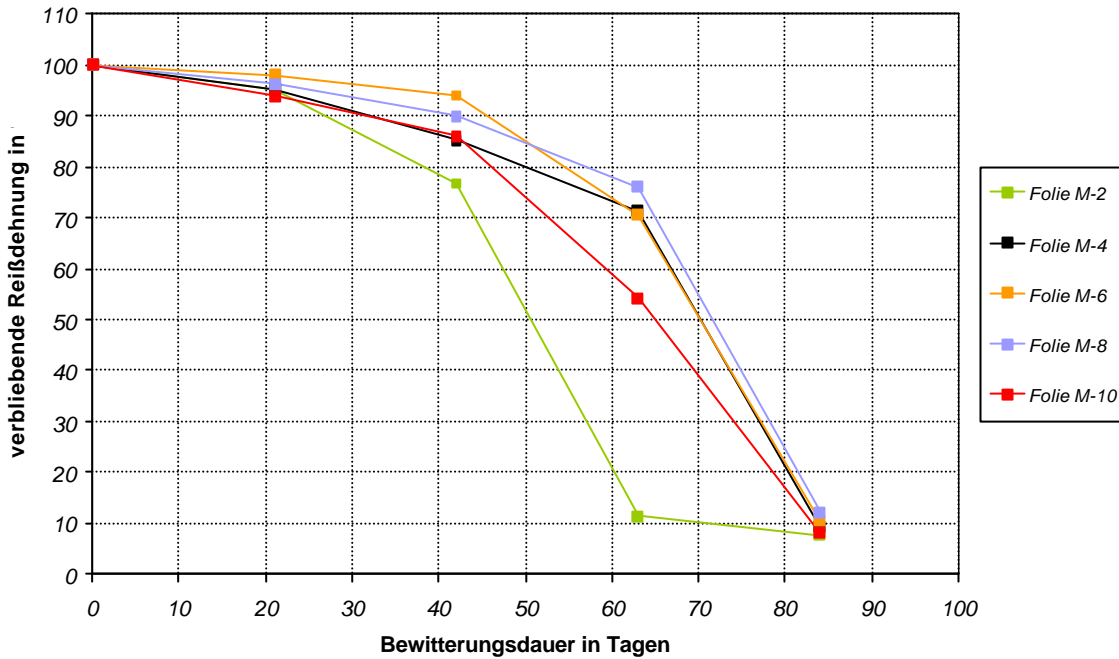


Abbildung 4.22: Relative Abnahme der prozentualen Reißdehnung (bezogen auf die unbewitterte Folie) im Verlauf des ADF-Tests

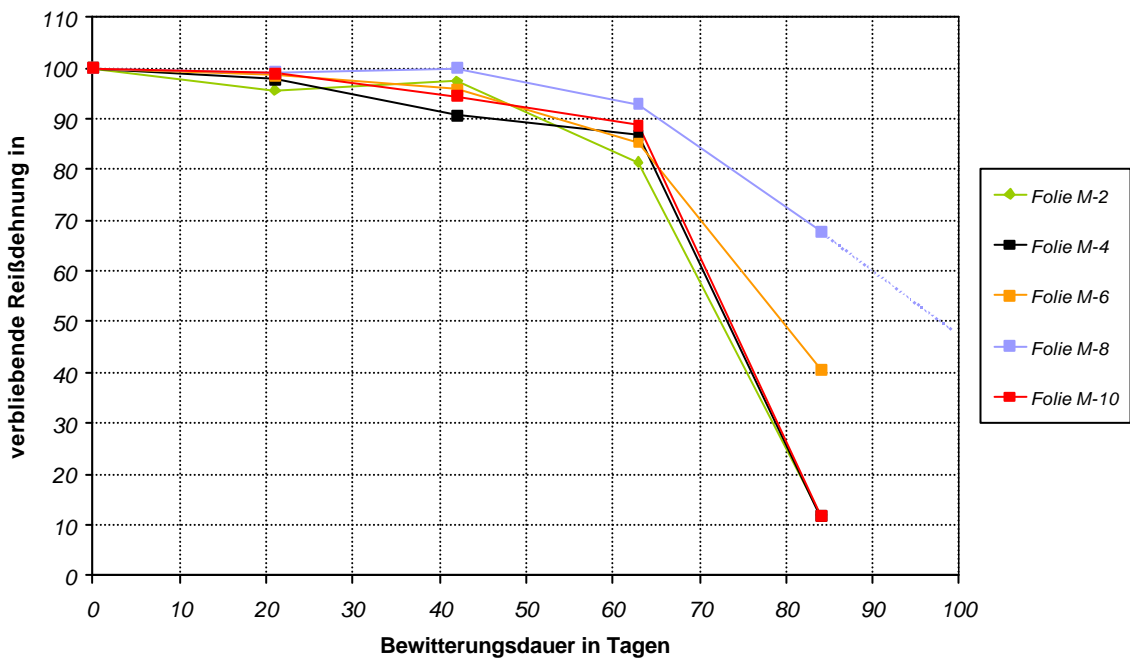


Abbildung 4.23: Relative Abnahme der prozentualen Reißdehnung (bezogen auf die unbewitterte Folie) im Verlauf der säurefreien Bewitterung

In Abbildung 4.24 wird die Lebensdauer (auf der Basis von 50 % Reißdehnungsverlust) unterschiedlich stabilisierter PE-Folien verglichen. Dabei ist jeweils die Lebensdauer nach saurer Belastung (ADF-Test; rote Balken) der Lebensdauer nach säurefreier Bewitterung (blaue Balken) gegenübergestellt.

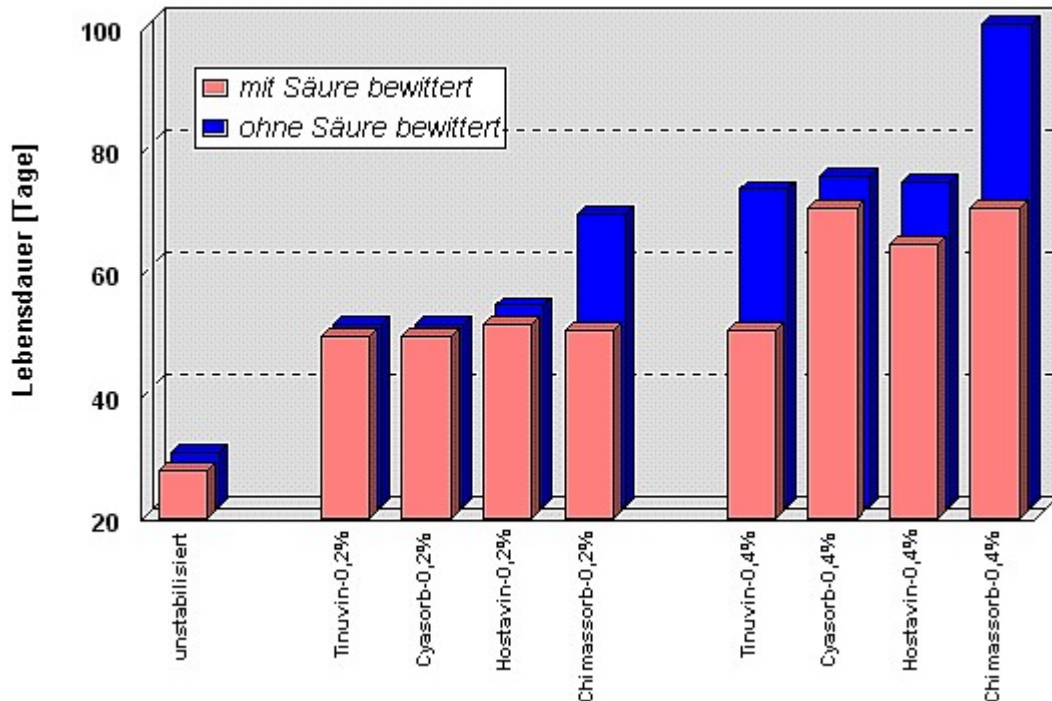


Abbildung 4.24: Lebensdauer (auf der Basis von 50 % Reißdehnungsverlust) unstabilisierter PE-LD-Folien sowie unterschiedlich HALS-stabilisierter PE-Folien im ADF-Test bzw. in der säurefreien Bewitterung; zur Probenbezeichnung vgl. Tabelle 3-1

Abbildung 4.24 zeigt, dass für die mit 0,2 % HALS stabilisierten Folien zum Teil nur sehr geringe bzw. keine Unterschiede in der Lebensdauer zwischen ADF-Test und säurefreier Bewitterung detektiert werden können. Einzig bei der mit 0,2 % Chimassorb 119 stabilisierten Folie wird eine zusätzliche deutliche Verringerung der Lebensdauer durch die saure Bewitterung beobachtet. Für die mit 0,4 % HALS stabilisierten Folien ist jedoch ein deutlicher Einfluss saurer Niederschläge auf die Lebensdauer der Folien zu erkennen. Je nach verwendeten Lichtschutzmittel ist dieser zusätzliche Einfluss unterschiedlich stark ausgeprägt. Bei den mit Tinuvin 622 und Chimassorb 119 stabilisierten Folien M-2 und M-8 ergeben sich z.B. Verkürzungen der Lebensdauer um 29 % durch Säurebelastung. Wesentlich geringere Unterschiede in der Lebensdauer zwischen ADF-Test und säurefreier Bewitterung ergeben sich bei der Verwendung von Cyasorb UV 3346 (Verkürzung der Lebensdauer um 4 %) bzw. Hostavin N 30 (Verkürzung der Lebensdauer um 11 %) als Lichtschutzmittel. Die Lebensdauer der unstabilisierten Folie liegt mit ca. 30 Tagen deutlich

niedriger als bei den mit HALS stabilisierten Folien. Eine zusätzliche Verringerung der Lebensdauer durch saure Bewitterung konnte nicht festgestellt werden.

Variation des Stabilisatorgehaltes

Abbildung 4.25 zeigt die Reißdehnungsmittelwerte der Folien M-11 bis M-17 nach 84 Tagen künstlicher Bewitterung mit Säurebeanspruchung (rote Balken) und ohne Säurebeanspruchung (blaue Balken). Für die Folien M-11 (0 % Stabilisator) und M-12 (0,1 % Stabilisator) konnten keine Reißdehnungswerte ermittelt werden, da das Folienmaterial bereits so spröde war, dass bei Beginn der Zugbelastung der Materialbruch sofort eintrat. Trotz steigenden Gehaltes an Hostavin N30, beschleunigt die Anwesenheit von Säure den Abbau der mechanischen Festigkeit. Die Reißdehnungswerte nach Säurebeanspruchung liegen jeweils etwas niedriger als die Reißdehnungswerte ohne Säurebeanspruchung. Ab einem Stabilisatorgehalt von 0,6 % verändern sich die Reißdehnungswerte jedoch nur noch geringfügig.

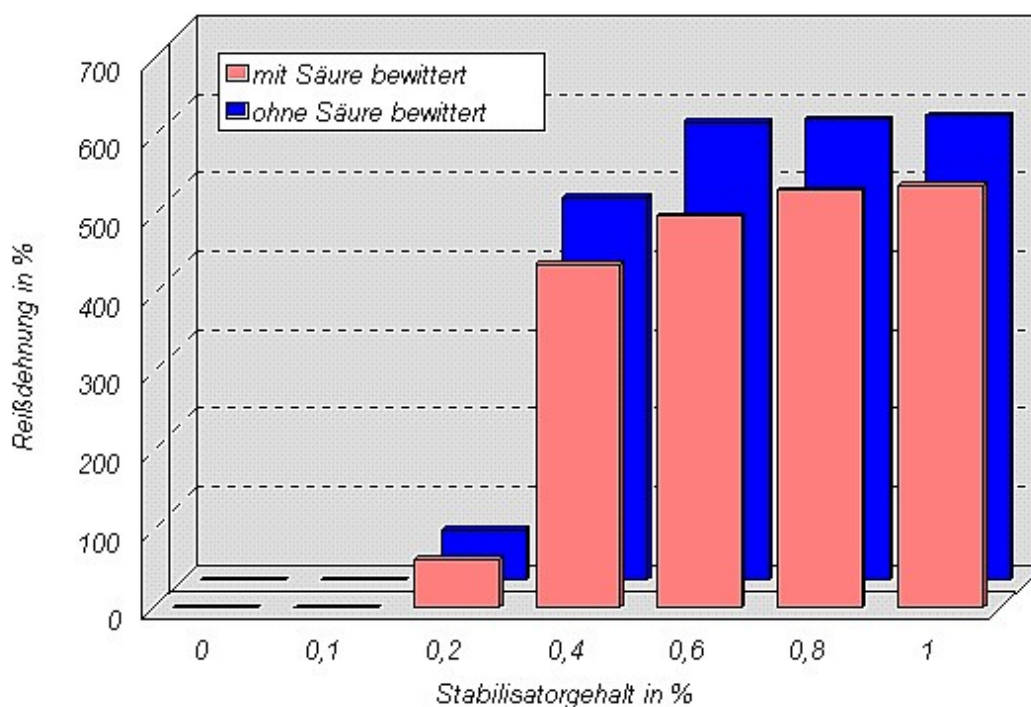


Abbildung 4.25: Reißdehnungsmittelwerte nach 84 Tagen ADF-Test (rote Balken) bzw. 84 Tagen säurefreier Bewitterung (blaue Balken)

Die Zugprüfungen haben gezeigt, dass für eine zuverlässige Bewertung des Säureeinflusses auf die mechanische Festigkeit der Modellfolien mindestens 84 Bewitterungstage erforderlich sind. Bei komplett mit allen Additiven ausgerüsteten Gewächshausfolien (kommerzielle Folien) ist mit noch längeren Bewitterungszeiten zu rechnen.

4.3.3 Zugprüfungen an kommerziellen Folien

In Abbildung 4.26 werden die Reißdehnungswerte der Modellfolie M-10 mit denen der kommerziellen Folie T-2 verglichen. Beide Folien enthalten Hostavin N 30 in unterschiedlicher Konzentration. Die kommerzielle Folie T-2 enthält zudem zusätzlich zwei UV-Absorber auf Benzophenon- und Benzotriazolbasis. Bei der kommerziellen Folie T-2 ist nach 84 Bewitterungstagen noch keine signifikante Abnahme in der Reißdehnung zu verzeichnen, unabhängig davon, ob mit oder ohne Säurebeanspruchung bewittert wurde.

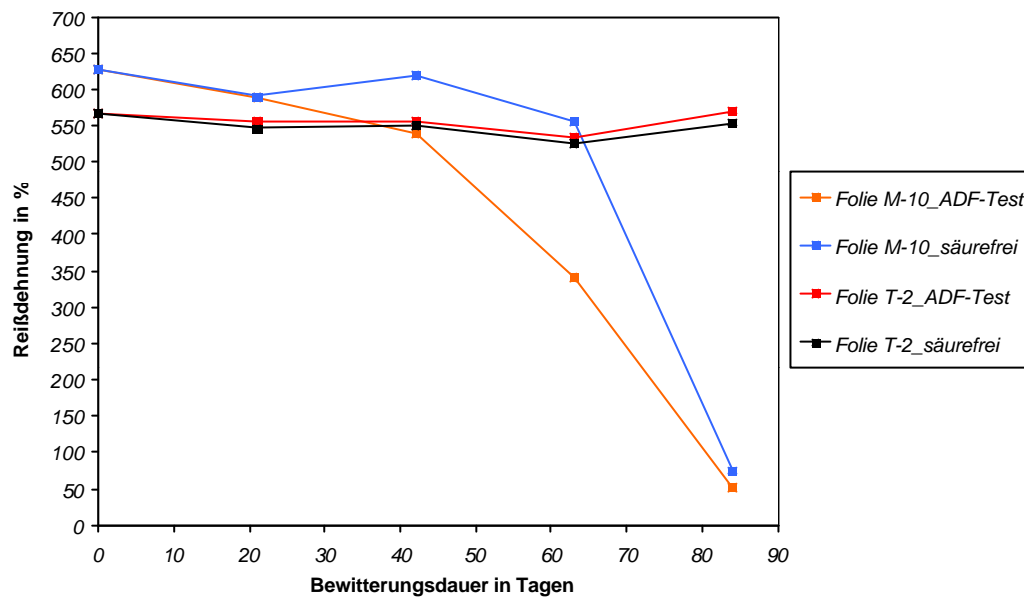


Abbildung 4.26: Reißdehnungswerte der Folien M-10 und T-2 im Verlauf der künstlichen Bewitterung

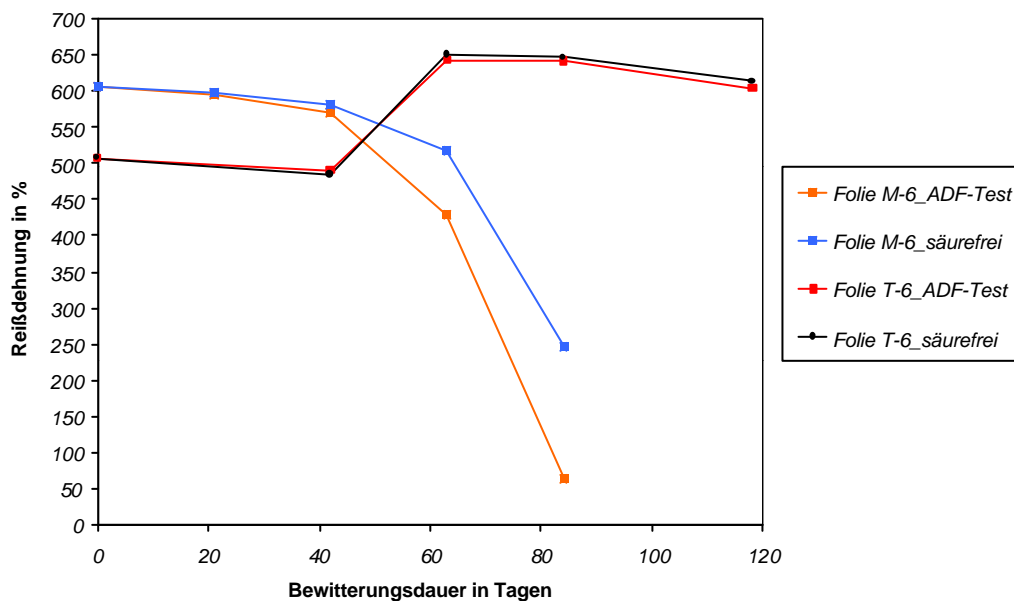


Abbildung 4.27: Reißdehnungswerte der Folien M-6 und T-6 im Verlauf der künstlichen Bewitterung

In Abbildung 4.27 werden die Reißdehnungswerte der Modellfolie M-6 mit denen der kommerziellen Folie T-6 verglichen. Beide Folien sind mit Cyasorb UV 3529 als HALS ausgerüstet. Die kommerzielle Folie T-6 enthält zudem einen UV-Absorber auf Triazinbasis

Bei der kommerziellen Folie T-6 zeigt sich sogar eine Verbesserung der Reißdehnungswerte im Verlauf der künstlichen Bewitterung. Amin et al.^[86] führen die anfängliche Verbesserung der mechanischen Festigkeit auf Vernetzungsreaktionen und Nachkristallisation zurück. Im späteren Verlauf der Bewitterung nimmt die mechanische Festigkeit aufgrund von vermehrt auftretenden Kettenspaltungen jedoch wieder ab. Die künstliche Bewitterung der Folie T-6 wurde nach 118 Tagen abgebrochen, ohne dass ein deutlicher Einbruch in den Reißdehnungswerten zu erkennen war.

4.3.4 Zugprüfungen an freibewitterten Polyethylenfolien

Abbildung 4.28 zeigt die Reißdehnungsmittelwerte der freibewitterten Modellfolien (grüne Balken) im Vergleich zu den Reißdehnungsmittelwerten der unbewitterten Folien (schwarze Balken), nach 21 Tagen ADF-Test (gelbe Balken) sowie nach 42 Tagen ADF-Test (orange Balken).

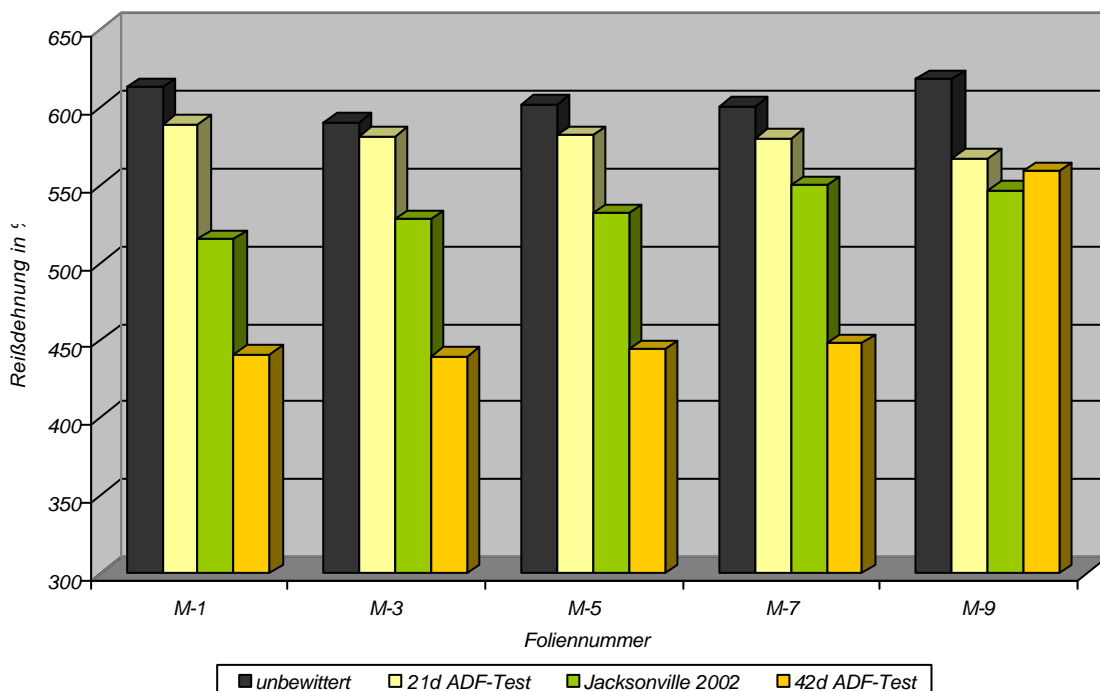


Abbildung 4.28: Reißdehnungsmittelwerte der Modellfolien M-1 bis M-9 nach verschiedenen Bewitterungsverfahren

Die Reißdehnungsmittelwerte und damit die mechanische Festigkeit der freibewitterten Modellfolien hat im Vergleich zu den unbewitterten Folien jeweils deutlich abgenommen. Vergleicht man die Reißdehnungsmittelwerte der freibewitterten Folien mit denen der künstlich bewitterten Folien, fällt auf, dass die mechanische Festigkeit der in Jacksonville bewitterten Folien jeweils zwischen den Werten für 21 Tage und 42 Tage ADF-Test liegt. Einzig Folie M-9 bildet eine Ausnahme, wobei die Festigkeitsänderungen jedoch sehr gering sind. Bei den Modellfolien reichen somit 42 Tage künstliche Bewitterung aus, um die gleichen bzw. etwas größere Verluste an mechanischer Festigkeit zu erzielen wie nach 14 Wochen (98 Tage) Freibewitterung. Damit ergibt sich für den ADF-Test in Bezug auf die mechanischen Eigenschaften der Modellfolien ein Beschleunigungsfaktor von mindestens „2“ gegenüber der Freilandalterung.

In Abbildung 4.29 werden die Reißdehnungsmittelwerte der unbewitterten Folien T-2 und T-3 (graue Balken) mit den Reißdehnungswerten der freibewitterten Folien (orange Balken) verglichen.

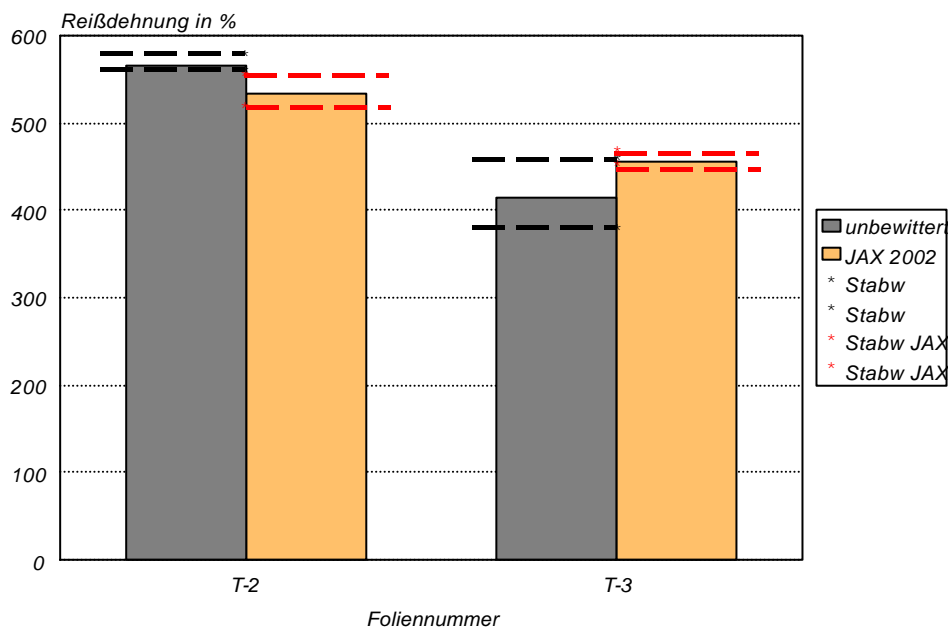


Abb. 4.29: Reißdehnungsmittelwerte der kommerziellen Folien T-2 und T-3 in verschiedenen Bewitterungsstadien; die gestrichelten Linien geben die jeweilige Standardabweichung um den Mittelwert an

Im Rahmen ihrer Standardabweichungen liegen die Reißdehnungsmittelwerte der unbewitterten Folien und der in Jacksonville freibewitterten Folien T-2 und T-3 im selben Wertebereich. 14 Wochen Freibewitterung in Jacksonville reichen somit nicht aus, um Verluste in der mechanischen Festigkeit der kommerziellen Folien zu erzielen. Eine Korrelation zu den Ergebnissen des ADF-Tests war deshalb nicht möglich.

4.3.5 Bestimmung der Kristallinität

Wie bereits diskutiert wurde, wird das mechanische Verhalten eines Polymers grundlegend von der Kristallinität des Polymers beeinflusst. Anhand des Kristallisationsgrades α kann die Kristallinität eines Kunststoffes durch verschiedene Analyseverfahren charakterisiert werden.

Der Kristallisationsgrad α eines Polymers wird durch das prozentuale Verhältnis von kristallinen zu amorphen Regionen im Polymer bestimmt (siehe Abb. 4.30). Die kristallinen Regionen bestehen aus parallel geordneten Ketten, die Lamellen bilden. In diesen kristallinen Bereichen bildet sich beim Polyethylen ein stabiles, orthorhombisches Kristallgitter aus. Die kristallinen Bereiche werden durch amorphe Regionen unterbrochen, in denen sich die ungeordneten Moleküle sowie die aus den Kristalllamellen herausragenden Moleküle befinden ^[87].

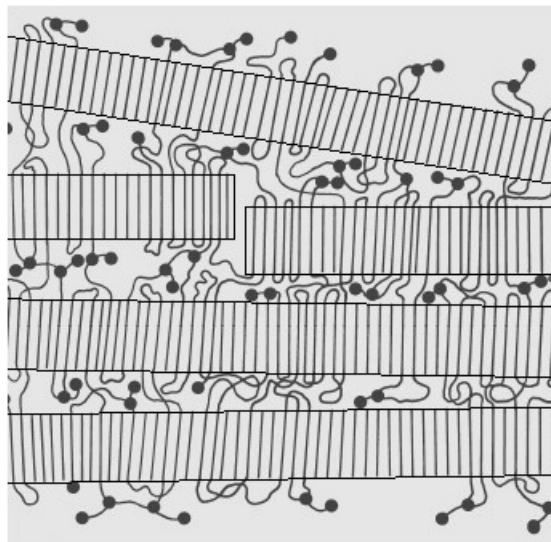


Abbildung 4.30: Schema der Kristallstruktur von Polyethylen ^[88]

Eine Möglichkeit zur Bestimmung des Kristallisationsgrades α sind Schmelzenthalpiemessungen mittels dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC). Teilkristalline Polymere bleiben beim Erwärmen bis zum Schmelzen ihrer kristallinen Bereiche fest. Der Schmelzprozess äußert sich als endothermer Peak in der DSC-Kurve (siehe Abb. 4.31). Als Schmelzpunkt wird die Temperatur beim Schmelzen der letzten Kristallite bezeichnet, das ist die Temperatur T_m am Minimum des Peaks. Die Fläche darüber entspricht der Schmelzenthalpie der Probe. Die Ermittlung des Kristallisationsgrades α beruht auf der Proportionalität der gemessenen spezifischen Schmelzenthalpie ΔH_s und der Menge der vorhandenen Kristallite

(siehe Gleichung 2). Die spezifische Schmelzenthalpie ΔH_k von vollständig kristallinem Polyethylen beträgt 290 J/g ^[89]

$$\alpha = \frac{\Delta H_s}{\Delta H_k} 100 \% \quad (2)$$

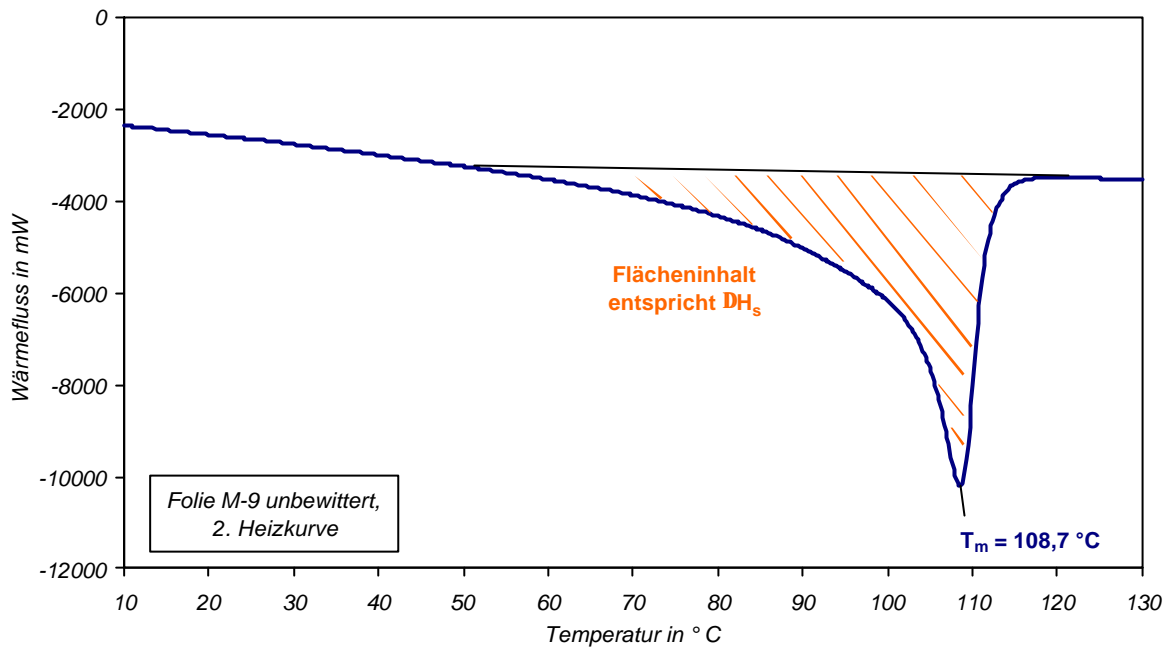


Abbildung 4.31: Auswertung einer DSC-Schmelzkurve

Der erste Aufheizvorgang einer DSC-Messung liefert Informationen über die thermische Vorgeschichte einer Probe. In Abbildung 4.32 sind die ersten Aufheizkurven der Folie M-9 (0,2 % Hostavin N 30) in verschiedenen Bewitterungsstadien dargestellt.

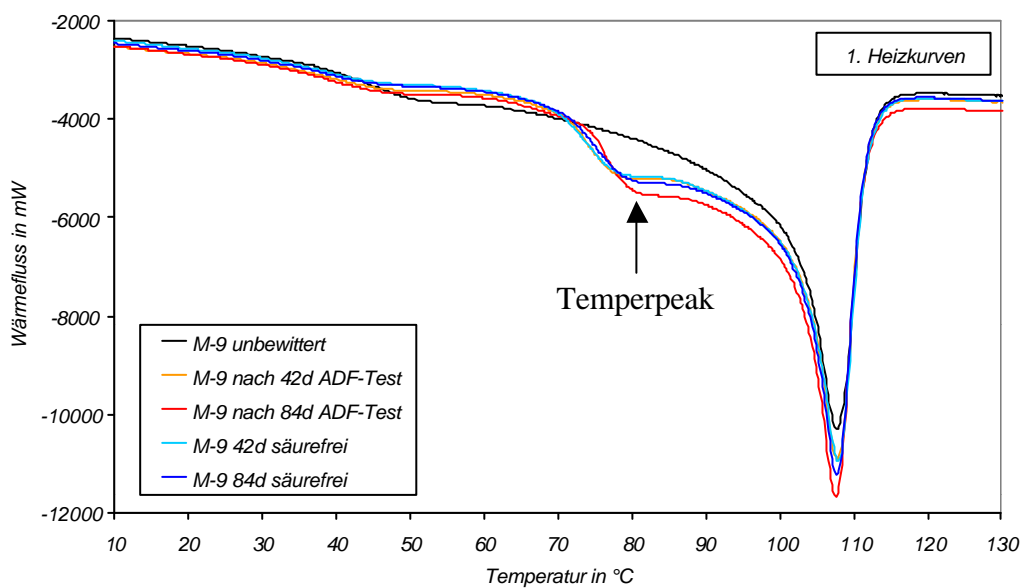


Abbildung 4.32: Erste Aufheizkurven der Folie M-9 in verschiedenen Bewitterungsstadien

Neben dem Schmelzpeak bei 107 °C findet man einen zweiten endothermen Peak bei 78-81 °C. Dieser zusätzlich auftretende Temperpeak ist auf die Entstehung von Kristalliten anderer Größe durch Lagern bzw. Tempern der Probe bei entsprechender Temperatur zurückzuführen. Die Schmelzwärme des Temperpeaks nimmt mit zunehmender Bewitterungsdauer zu. Man bezeichnet diesen Effekt auch als Memory-Effekt des Polyethylens⁽⁹⁰⁾. Ein Säureeinfluss auf die Größe des Temperpeaks wird nicht beobachtet.

Um Unterschiede durch ungleiche thermische Vorgeschichte auszuschließen, wurden die Polyethylenproben einmal vollständig aufgeschmolzen, anschließend mit konstanter Kühlrate auf -50 °C abgekühlt und ein zweites Mal vermessen. Der zweite Aufheizvorgang liefert dann miteinander vergleichbare werkstoffspezifische Kennwerte, wie z.B. die Schmelztemperatur T_m und die Schmelzenthalpie ΔH_s . Zur Bestimmung der jeweiligen Kristallisationsgrade wurden jeweils die zweiten Heizkurven einer DSC-Messung ausgewertet.

Für die Polyethylenfolien M-9 (0,2 % Hostavin N 30) und T-3 (1,2 % Hostavin N 30) wurden in verschiedenen Bewitterungsstadien DSC-Messungen durchgeführt. Tabelle 4-3 fasst die ermittelten Schmelzenthalpien sowie die daraus berechneten Kristallisationsgrade zusammen.

Folie/Bewitterungsstadium	Schmelzenthalpie in [J/g]	Kristallisationsgrad a
M-9 unbewittert	220,6	76
M-9 nach 42 d ADF-Test	219,4	76
M-9 nach 84 d ADF-Test	228,8	79
M-9 nach 42 d Bewitterung	224,0	79
M-9 nach 84 d Bewitterung	223,3	77
M-9 JAX 2002	226,4	78
T-3 unbewittert	198,9	69
T-3 nach 42 d ADF-Test	202,2	70
T-3 nach 84 d ADF-Test	198,1	68
T-3 nach 42 d Bewitterung	203,8	70
T-3 nach 84 d Bewitterung	202,3	70
T-3 JAX 2002	197,9	68

Tabelle 4-3: aus DSC-Messungen berechnete Kristallisationsgrade der Folien M-9 und T-3 in verschiedenen Bewitterungsstadien

Für die Modellfolie M-9 wurden mit 76-79 % deutlich höhere Kristallisationsgrade gefunden als für die kommerzielle Folie T-3 mit Kristallisationsgraden zwischen 68-70 %. Ein

systematischer Zusammenhang zwischen der Art der Bewitterung und dem Kristallisationsgrad α konnte bei beiden Folien nicht detektiert werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung des Kristallisationsgrades der Folien sind IR-Messungen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die verschiedenen Analysemethoden zur Bestimmung des Kristallisationsgrades nur bedingt die gleichen Resultate liefern, da sie verschiedene Eigenschaften des Polymers messen.

So wird durch IR-Messungen nicht direkt das Verhältnis kristallin/amorph bestimmt, sondern das Verhältnis der trans/gauche-Konformation, aber beide Verhältnisse verhalten sich meist proportional zueinander. Zur Bestimmung des kristallinen Anteils wird der Quotient der Extinktionen einer kristallinen Bande zu einer kristallinitätsunabhängigen bzw. amorphen Bande gebildet^[91].

Abbildung 4.33 zeigt einen Ausschnitt aus dem IR-Spektrum von Polyethylen, in dem eine kristalline Bande bei 1894 cm^{-1} , und eine amorphe Bande bei 1303 cm^{-1} gekennzeichnet sind. Die Bande bei 1894 cm^{-1} ist dabei charakteristisch für die trans-Konfiguration der Kohlenstoffkette, während die Bande bei 1303 cm^{-1} absorbierenden Methylengruppen, die wenigstens eine benachbarte gauche-Bindung aufweisen, zugeordnet wird.

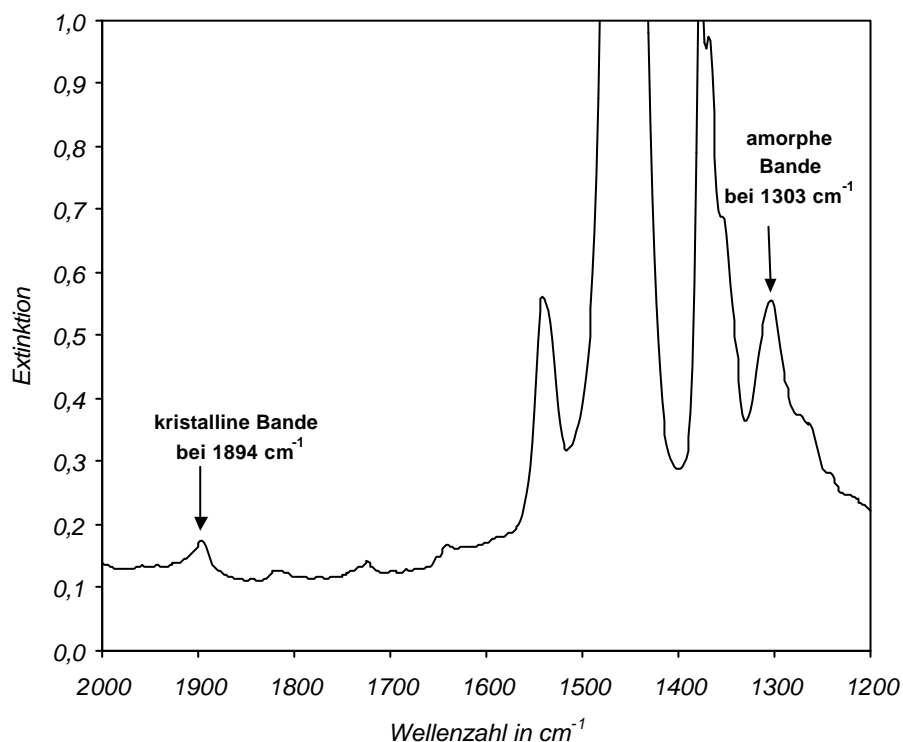


Abbildung 4.33: IR-Spektrum von Polyethylen mit amorpher und kristalliner Bande

Um die Änderung des Kristallisationsgrades α im Verlauf der Bewitterung verfolgen zu können, wurden die Extinktionsintensitäten der beiden Banden nach folgender Formel ausgewertet ^[92]:

$$x = \frac{\left[1 - \frac{E_k}{E_a}\right]}{\left[1 + \frac{E_k}{E_a}\right]} \cdot 100 \quad \text{mit}$$

x = amorpher Anteil in %

E_k = Extinktionsintensität bei 1894 cm^{-1}

E_a = Extinktionsintensität bei 1303 cm^{-1}

Der Kristallisationsgrad α ergibt sich dann zu $\alpha = 100 \% - x$, wobei zu berücksichtigen ist, dass eventuell vorhandene zwischenkristalline Schichten zum kristallinen Anteil hinzugezählt werden.

Abbildung 4.34 und Abbildung 4.35 geben einen Überblick über die aus IR-Messungen berechneten Kristallisationsgrade der Modellfolien M-1 bis M-9 (jeweils 0,2 % Stabilisatorgehalt) in verschiedenen Bewitterungsstadien.

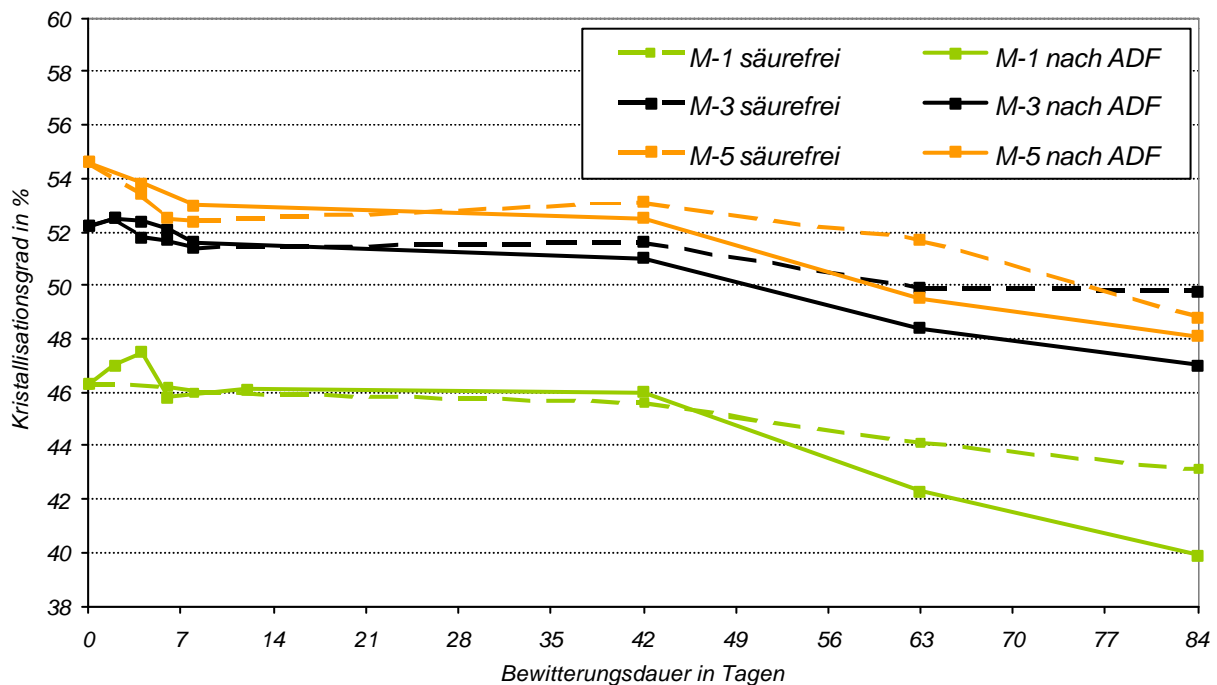


Abbildung 4.34: aus IR-Messungen berechnete Kristallisationsgrade der Modellfolien M-1 bis M-5 im Verlauf des ADF-Tests bzw. der säurefreien Bewitterung

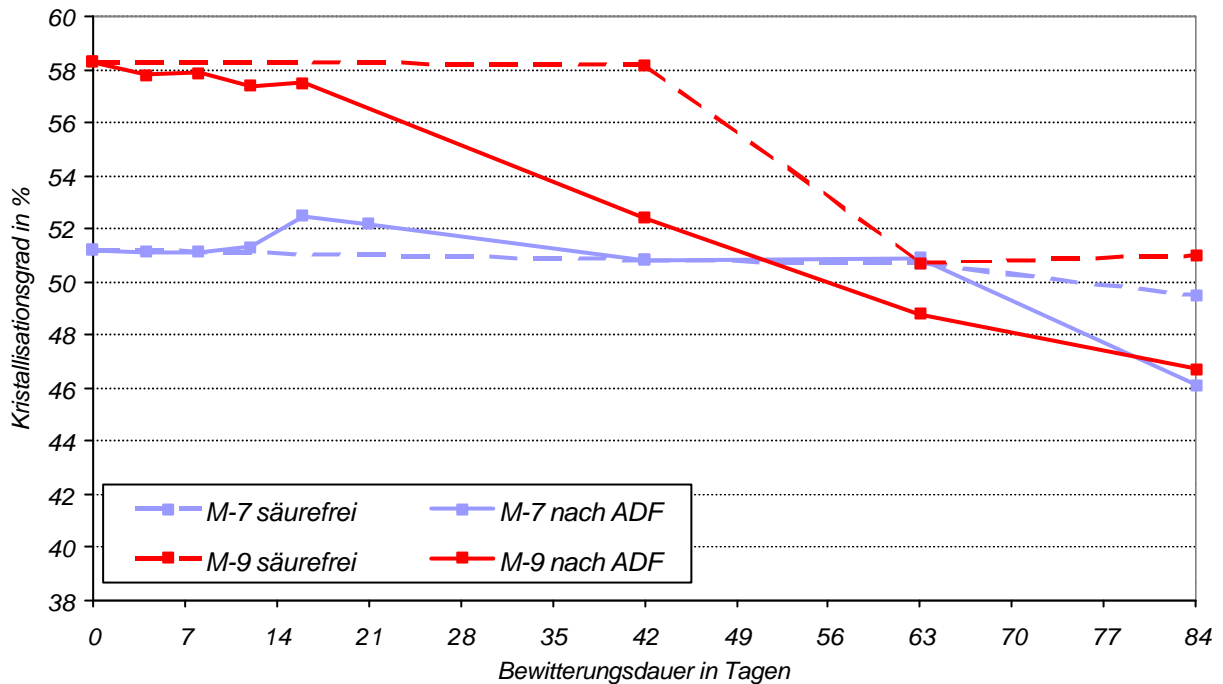


Abbildung 4.35: aus IR-Messungen berechnete Kristallisationsgrade der Modellfolien M-7 und M-9 im Verlauf des ADF-Tests bzw. der säurefreien Bewitterung

Der Kristallisationsgrad der untersuchten Modellfolien nimmt im Verlauf des ADF-Tests stärker ab als im Verlauf der säurefreien Bewitterung, d.h. die Säurebeanspruchung während der künstlichen Bewitterung hat einen zusätzlichen negativen Effekt auf die Kristallinität des Folienmaterials. Am deutlichsten tritt dieser Effekt bei der mit Hostavin N30 stabilisierten Folie M-9 auf (vgl. Abb. 4.35).

Die anfängliche Zunahme des Kristallisationsgrades in den ersten 6-8 Tagen des ADF-Tests bei den Folien M-1 und M-3 sowie nach ca. 14 Tagen bei Folie M-7 ist vermutlich auf eine Nachkristallisation zurückzuführen. Durch die Bildung von sauerstoffhaltigen Gruppen wie z.B. Carbonyl- und Hydroxylgruppen in den amorphen Regionen des Polymers kommt es zunächst zur Bildung neuer intermolekularer polarer Bindungen, die den Ordnungszustand des Polymers erhöhen^{[93], [94]} (siehe Abb. 4.36).

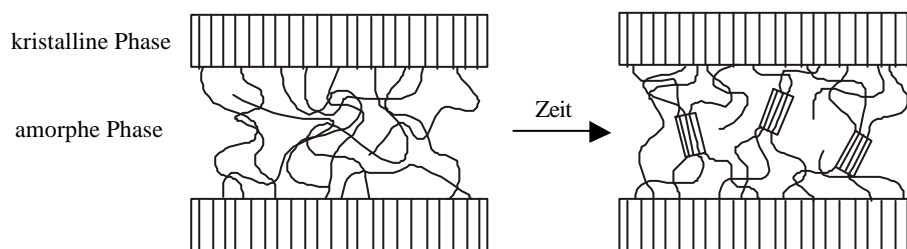


Abbildung 4.36: schematische Darstellung der Nachkristallisation

Bei fortschreitender Bewitterung gewinnen jedoch die Kettenspaltungsreaktionen (Norrish I-Reaktion) immer mehr an Bedeutung und der Kristallisationsgrad der Polyethylenfolien nimmt allmählich ab.

Abbildung 4.37 zeigt die Änderung des Kristallisationsgrades der kommerziellen Folien T-2, T-3 und T-6 im Verlauf der künstlichen Bewitterung.

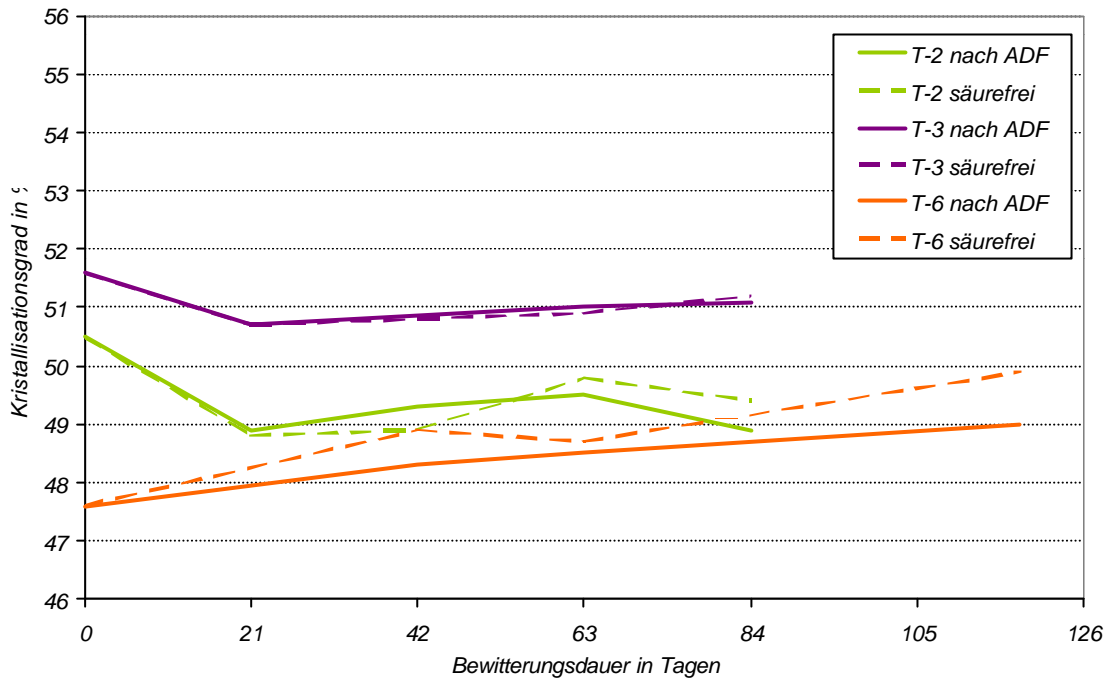


Abbildung 4.37: aus IR-Messungen berechnete Kristallisationsgrade der kommerziellen Folien T-2, T-3 und T-6 im Verlauf des ADF-Tests bzw. der säurefreien Bewitterung

Während bei den Folien T-2 und T-3 kein systematischer Zusammenhang zwischen Art und Dauer der Bewitterung und dem Kristallisationsgrad zu erkennen ist, beobachtet man bei der Folie T-6 eine kontinuierliche Zunahme des Kristallisationsgrades mit der Bewitterungsdauer. Dieser Befund steht im Einklang mit der bei Folie T-6 beobachteten Verbesserung der Reißdehnungswerte und damit der mechanischen Festigkeit.