

**Veränderung der Barriereeigenschaften von biologisch
abbaubaren Agrarfolien durch Abbau und Alterung im
Kulturverlauf**

Von der Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades

Doktor der Gartenbauwissenschaften

- Dr. rer. hort. -

genehmigte
Dissertation

von

Dipl.-Ing. agr. Jan Peter Michaelis
Geboren am 05.01.1969 in Itzehoe

2010

Referenten: Prof. Dr. rer. hort. habil. H.-J. Tantau
Prof. Dr. sc. agr. H. Stützel

Tag der Promotion: 09.07.2010

KURZFASSUNG

Veränderung der Barriereeigenschaften von biologisch abbaubaren Agrarfolien durch Abbau und Alterung im Kulturverlauf

Jan-Peter Michaelis

Als Alternative zur Ernteverfrühung stehen im Landbau u.a. biologisch abbaubare Folien (Biofolien) aus Mater-Bi zur Verfügung, deren Eignung in ersten Kulturversuchen nachgewiesen wurde. Basierend auf diesen Untersuchungen wurden in dem 2001 gestarteten EU-Projekt QLRT-2000-00044 neu entwickelte biologisch abbaubare Mulch- und Flachfolien in vier Freilandversuchen getestet. Jeweils drei unterschiedliche Biofolienkombinationen wurden dabei mit einer konventionellen Polyethylen-Folienkombination und einer Nullvariante zusammen eingesetzt. Ziel dabei war es, die Foliendicke und -bestandteile so zu verändern, daß die Biofolien einerseits preislich konkurrenzfähiger wurden, andererseits, bezüglich Kultur- und Standortbedingungen, eine ausreichende Funktionalität und Haltbarkeit aufwiesen. Während der Kulturzeit wurden Klimawerte und Frischmasseerträge gemessen und regelmäßig Folienproben entnommen, um diese auf Änderungen der spektralen Durchlässigkeit hin zu untersuchen. Die Wasserdampfdurchlässigkeit unbenutzter Versuchsfolien, sowie die Veränderungen der Folienoberflächen durch Alterung und biologischen Abbau waren Gegenstand weiterer Untersuchungen. In den Freilandversuchen wurden keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Klimawerte und der Frischmasseerträge zwischen den Folienvarianten festgestellt. Problematisch war die zunehmende Elastizität und mechanische Empfindlichkeit der Biofolien bei geringen Materialstärken, sowie die Neigung unter Feuchtigkeitseinwirkung bei direktem Kontakt miteinander zu verkleben. Die Messungen der Barriereeigenschaften der Biofolien ergaben bei der Lichtdurchlässigkeit vor allem im UV-Bereich geringere Werte, bei der Wasserdampfdurchlässigkeit höhere Werte, als bei der konventionellen Variante. Bei der Oberflächenanalyse wurden Änderungen der stofflichen Zusammensetzung beider Materialklassen in Abhängigkeit von der Expositionsart und -dauer festgestellt.

Schlagworte: Biologisch abbaubare Folien, ATR, Transmission

ABSTRACT

Alteration of the barrier properties of biodegradable polymers caused by biodegradation and ageing during use in the field

Jan-Peter Michaelis

In cultivation, as an alternative solution to protected cultivation, biodegradable polymers, made of Mater-Bi, are available. The usability of these materials has already been verified in preceding experiments. Based on these results, the EU-project QLRT-2000-00044 has been established in 2001 to test newly developed biodegradable mulch and direct cover films in four outdoor cultivation tests. In each test three different combinations of biodegradable polymers have been compared with a conventional polyethylene film combination and a zero plot. The aim of this research was to reduce the film thickness and to modify the polymer ingredients in order to get a less cost intensive, more competitive product with more satisfying characteristics and higher durability, regarding cultivation and application conditions. During the cultivation period, climate values and the amount of the harvested fresh mass have been continuously measured and the material has been regularly tested in order to examine changes in its spectral transmissibility. The water vapour permeability of unused experimental films and the changes of the polymer surfaces caused by ageing and biodegradation have been the topic of further research. Regarding climate values and the harvest, no significant differences have been detected between the films, during the field test. The increasing elasticity and mechanical sensitivity of biofilms with lower material thicknesses as well as the biofilms' tendency to stick together when in contact with water, proved problematic. The measurement of the barrier properties resulted in lower UV-transmissivity and higher water vapour permeability of biofilms, compared to conventional films. The molecular analysis of the polymer surfaces revealed an alteration of the material composition according to duration and nature of exposition.

Keywords: biodegradable polymers, ATR, transmission

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGEN	I
ABBILDUNGEN	III
TABELLEN	XVI
1 Einleitung	1
1.1 Einführung.....	1
1.2 Problemstellung und Zielsetzung.....	2
2 Stand des Wissens	3
2.1 Geschützter Anbau.....	3
2.1.1 Mulchfolien.....	3
2.1.2 Flachfolien.....	4
2.2 Kunststoffsorten.....	5
2.2.1 Konventionelle Kunststoffe.....	5
2.2.2 Biologisch abbaubare Kunststoffe.....	6
2.2.3 Folienherstellung.....	9
2.3 Abbau von Kunststoffen.....	11
2.3.1 Abiotischer Abbau.....	11
2.3.2 Biotischer Abbau.....	14
2.4 Literaturübersicht: Freilandversuche mit Mulchfolien.....	15
3 Material und Methoden	18
3.1 Folienarten.....	18
3.1.1 Polyethylen-Folien.....	18
3.1.2 Biologisch abbaubare Folien.....	19
3.2 Meßtechnik.....	21
3.2.1 Daten-Aufzeichnung und Temperaturregelung.....	21
3.2.2 Klimamessungen.....	22
3.2.3 Bodenfeuchtemessung.....	23
3.2.4 Transmission.....	24
3.2.5 Attenuierte Totalreflexion.....	24
3.2.6 Massebestimmung.....	26
3.3 Versuche.....	26
3.3.1 Freilandversuche.....	26

Inhaltsverzeichnis

3.3.2 Laborversuche.....	31
3.3.2.1 Wasserdampfdurchlässigkeit.....	31
3.3.2.2 Transmission.....	38
3.3.2.3 Attenuierte Total Reflexion.....	39
3.4 Statistische Auswertung.....	42
4 Ergebnisse.....	44
4.1 Freilandversuche.....	44
4.1.1 Bodentemperatur und Lufttemperatur.....	44
4.1.2 Bodenfeuchte.....	50
4.1.3 Klima unter Flachfolie.....	53
4.1.3.1 Luftfeuchte.....	53
4.1.3.2 Strahlungsdurchlässigkeit.....	58
4.1.4 Erträge.....	60
4.2 Laborversuche.....	62
4.2.1 Transmission.....	62
4.2.2 Attenuierte Total Reflexion.....	71
4.2.3 Wasserdampfdurchlässigkeit.....	76
5 Diskussion.....	89
5.1 Freilandversuche.....	89
5.1.1 Veränderungen der Wachstumsparameter durch Folien- verwendung.....	89
5.1.2 Veränderungen der Bodenfeuchte durch Folienverwendung.....	95
5.1.3 Veränderungen der Lufttemperatur durch Folienverwendung.....	96
5.1.4 Agronomische Bewertung der bioabbaubaren Folien.....	98
5.2 Laborversuche.....	100
5.2.1 Transmission.....	100
5.2.2 Attenuierte Total Reflexion.....	104
5.2.3 Wasserdampfdurchlässigkeit.....	109
6 Zusammenfassung und Ausblick.....	113
7 Literatur.....	118
8 Anhang.....	129

ABKÜRZUNGEN

Abb.	Abbildung
ATR	Attenuierte Totalreflexion
BGT	Fachgebiet Biosystem- und Gartenbautechnik der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Biofolien	Biologisch abbaubare Folien
EVA	Ethylvinylacetat
FD	Foliendicke
FDR	Frequency Domain Response
GR	Globalstrahlung
HDPE	High Density Polyethylene
IR	Infrarotstrahlung
LLDPE	Linear Low Density Polyethylene
LWIR	Langwellige Infrarotstrahlung
MG	Molekulargewicht
MO	Mikroorganismen
NF01U	Biologisch abbaubarer Kunststoff „Mater-Bi“
NF01U/P	Biologisch abbaubarer Kunststoff „Mater-Bi“
NF803	Biologisch abbaubarer Kunststoff „Mater-Bi“
NF803/P	Biologisch abbaubarer Kunststoff „Mater-Bi“
NIR	Nahe Infrarotstrahlung
PAR	Photosynthetisch aktive Strahlung
PATI	PATI S.p.a. aus San Zenone Degli Ezzelini/Italien
PCL	Polycaprolacton
PE	Polyethylen
PLKR	PLASTIKA KRITIS S.A. aus Heraklion/Griechenland
$P_{WD} (\Delta pD)$	Permeationskoeffizient in Abhängigkeit von der Wasserdampfdruckdifferenz
$P_{WD} (\Delta t)$	Permeationskoeffizient in Abhängigkeit vom Temperaturunterschied
$P_{WD} (\Delta m)$	Permeationskoeffizient in Abhängigkeit von der Materialdicke

P_{WDD}	Wasserdampfdurchlässigkeit
Tab.	Tabelle
UV	Ultraviolette Strahlung
WDD	Wasserdampfdurchlässigkeit
wz	Wellenzahl
X	Beliebiges Atom
ZnSe	Zink-Selenid

ABBILDUNGEN

Abb. 3.2-1: Theta-Probe-Bodensonde zur FDR-Messung	23
Abb. 3.2-2: Zur ATR-Messung eingespannte Mulchfolienprobe	24
Abb. 3.2-3: Geöffnete Messkammer vom Messgerät Spectrum BX: ZnSe-Kristall in der Bodenplatte mit aufgesetztem Spannmechanismus	25
Abb. 3.2-4: Schematische Darstellung des optischen Pfades durch den ATR- Messaufbau und den ZnSe-Kristall	25
Abb. 3.3-1: Schematische Darstellung eines Freilandversuchsaufbaues	29
Abb. 3.3-2: Ansicht vom ersten Freilandversuch im Mai 2002 in Blickrichtung Süden	29
Abb. 3.3-3: Schematische Darstellung vom Versuchsaufbau zur Messung der Wasserdampfdurchlässigkeit im Kühlraum des BGT	32
Abb. 3.3-4: Schematische Darstellung vom Waagenaufbau mit eingespannter Folienprobe zur Messung der Wasserdampfdurchlässigkeit.....	33
Abb. 3.3-5: Schematische Darstellung von einem durch Attenuierte Totalreflexion erzeugten Infrarot-Reflexions-Spektrum (verändert nach GOTTWALD et al., 1997).....	41
Abb. 4.1-1: Differenzen und Standardabweichungen der Bodentemperaturen in 30 cm Tiefe der Folienvarianten mit und ohne Flachfolienbedeckung zur Nullparzelle im Versuchszeitraum Frühjahr 2002	45

- Abb. 4.1-2: Differenzen und Standardabweichungen der Lufttemperaturen in 20 cm Höhe der Folienvarianten mit und ohne Flachfolienbedeckung zur Nullparzelle im Versuchszeitraum Frühjahr 2002 46
- Abb. 4.1-3: Temperaturdifferenzen und Standardabweichungen der Boden- und Lufttemperatur zwischen der Nullvariante und den Mulchfolienvarianten in 30 cm Tiefe bzw. 20 cm Höhe im Versuchszeitraum Sommer 2002..... 46
- Abb. 4.1-4: Differenzen und Standardabweichungen der Bodentemperaturen in 30 cm Tiefe der Folienvarianten mit und ohne Flachfolienbedeckung zur Nullparzelle im Versuchszeitraum 2003 47
- Abb. 4.1-5: Differenzen und Standardabweichungen der Lufttemperaturen in 20 cm Höhe der Folienvarianten mit und ohne Flachfolienbedeckung zur Nullparzelle im Versuchszeitraum 2003 48
- Abb. 4.1-6: Differenzen und Standardabweichungen der Bodentemperaturen in 30 cm Tiefe der Folienvarianten mit und ohne Flachfolienbedeckung zur Nullparzelle im Versuchszeitraum 2004 49
- Abb. 4.1-7: Differenzen und Standardabweichungen der Lufttemperaturen in 20 cm Höhe der Folienvarianten mit und ohne Flachfolienbedeckung zur Nullparzelle im Versuchszeitraum 2004..... 50
- Abb. 4.1-8: Mittelwerte der gemessenen Saugspannungen [hPa] in 30 cm Bodentiefe und zwischen den Messterminen kumulierte Niederschläge [mm] im Versuchszeitraum Frühjahr 2002 51
- Abb. 4.1-9: Mittelwerte der gemessenen Saugspannungen [hPa] in 30 cm Bodentiefe und zwischen den Messterminen kumulierte Niederschläge [mm] im Versuchszeitraum Sommer 2002 51

Abb. 4.1-10: Tagesmittelwerte des Bodenwassergehaltes [Vol.-%] in 30 cm Bodentiefe und die Tagesniederschlagsmengen [mm] während des Freilandversuches 2004.....	53
Abb. 4.1-11: Mittelwerte und Standardabweichungen der Trockentemperaturen unter Flachfolie während des Frühjahrsversuches 2002	54
Abb. 4.1-12: Wassergehalte der feuchten Luft [g/kg] unter Flachfolie vom 05.05.2002 bis 09.05.2002	55
Abb. 4.1-13: Mittelwerte und Standardabweichungen der Trockentemperaturen unter den Flachfolien im Versuchszeitraum 2003.....	56
Abb 4.1-14: Tagesverlauf der Mittelwerte der Trockentemperaturen unter Flachfolie am 01.06.2003	56
Abb. 4.1-15: Mittelwerte und Standardabweichungen der Trockentemperaturen unter den Flachfolien während des Klimaversuches 2004	57
Abb. 4.1-16: Wassergehalte der feuchten Luft [g/kg] während des Klimaversuches 2004	57
Abb. 4.1-17: Strahlungssumme während des Versuches 2003 vom 12.06.2003 16 Uhr bis zum 17.06.2003 10 Uhr	59
Abb. 4.1-18: Strahlungssumme während des Klimaversuches 2004 vom 30.07.2004 17 Uhr bis zum 07.08.2004 14 Uhr.	59
Abb. 4.2.1-1: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M9-NF01U/P-20c-04 im Versuchszeitraum 2004 in den untersuchten Spektralbereichen.....	63

- Abb. 4.2.1-2: Transmission [%] der konventionellen Flachfolie D0-EVA-50s-02 im Versuchszeitraum Frühjahr 2002 in den untersuchten Spektralbereichen 64
- Abb. 4.2.1-3: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D1-NF803-20-02 im Versuchszeitraum Frühjahr 2002 in den untersuchten Spektralbereichen 64
- Abb. 4.2.1-4: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D2-NF803-20s-02 im Versuchszeitraum Frühjahr 2002 in den untersuchten Spektralbereichen 65
- Abb. 4.2.1-5: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D3-NF803-20s-02 im Versuchszeitraum Frühjahr 2002 in den untersuchten Spektralbereichen 65
- Abb. 4.2.1-6: Transmission [%] der konventionellen Flachfolie D0-EVA-50s-03 im Versuchszeitraum 2003 in den untersuchten Spektralbereichen 66
- Abb. 4.2.1-7: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D4-NF803-15-03 im Versuchszeitraum 2003 in den untersuchten Spektralbereichen 67
- Abb. 4.2.1-8: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D5-NF01U-20-03 im Versuchszeitraum 2003 in den untersuchten Spektralbereichen 67
- Abb. 4.2.1-9: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D6-NF803-12-03 im Versuchszeitraum 2003 in den untersuchten Spektralbereichen 67

Abb. 4.2.1-10: Transmission [%] der konventionellen Flachfolie D0-EVA-50s-04 im Versuchszeitraum 2004 in den untersuchten Spektralbereichen.....	69
Abb. 4.2.1-11: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D7-NF803-12-04 im Versuchszeitraum 2004 in den untersuchten Spektralbereichen.....	69
Abb. 4.2.1-12: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D8-NF01U-12-04 im Versuchszeitraum 2004 in den untersuchten Spektralbereichen.....	70
Abb. 4.2.1-13: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D9-NF803-10-04 im Versuchszeitraum 2004 in den untersuchten Spektralbereichen.....	70
Abb. 4.2.2-1: ATR-Spektren von unbenutzten Proben der Folienvarianten D0 und M0, sowie D5 und M5.....	72
Abb. 4.2.2-2: Mittlere Transmission der ATR-Kurven oberhalb und unterhalb von 1500 cm^{-1} aller Untersuchungsmaterialien vom Bewitterungsversuch im Laufe der Expositionszeit	74
Abb. 4.2.2-3: Mittlere Transmission der ATR-Kurven oberhalb und unterhalb von 1500 cm^{-1} aller Untersuchungsmaterialien vom Kompostierungsversuch im Laufe der Expositionszeit.....	75
Abb. 4.2.3-1: Wasserdampfdurchlässigkeit [$\text{g}/(24\text{ h}\cdot\text{m}^2)$] der Mulchfolien in den Tag- und Nachtphasen im Vergleich mit den Kontrollvarianten	77
Abb. 4.2.3-2: Permeationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Materialdicke $P_{\text{WD}}(\mu\text{m})$ [$\text{g}/(24\text{ h}\cdot\text{m}^2\cdot\mu\text{m})$] der Mulchfolien in den Tag- und Nachtphasen im Vergleich mit den Kontrollvarianten.....	78

- Abb. 4.2.3-3: Funktionelle Zusammenhänge der Permeationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Materialdicke $P_{WD} (\mu\text{m})$ [$\text{g}/(24 \text{ h} \cdot \text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$] der Mulchfolien aus dem Granulat NF01U/P in den Tag- und Nachtphasen 78
- Abb. 4.2.3-4: Permeationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz $P_{WD} (\Delta t)$ [$\text{g}/(24 \text{ h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K})$] der Mulchfolien in den Tag- und Nachtphasen im Vergleich mit den Kontrollvarianten 79
- Abb. 4.2.3-5: Funktionelle Zusammenhänge der Permeationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz $P_{WD} (\Delta t)$ [$\text{g}/(24 \text{ h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K})$] der Mulchfolien aus dem Granulat NF01U/P in den Tag- und Nachtphasen 80
- Abb. 4.2.3-6: Permeationskoeffizienten der Mulchfolien in Abhängigkeit von der Wasserdampfdruckdifferenz $P_{WD} (\Delta PD)$ [$\text{g}/(24 \text{ h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hPa})$] in der Tag- und Nachtphase im Vergleich mit den Kontrollvarianten..... 81
- Abb. 4.2.3-7: Funktionelle Zusammenhänge der Permeationskoeffizienten der Mulchfolien aus dem Granulat NF01U/P in Abhängigkeit von der Wasserdampfdruckdifferenz $P_{WD} (\Delta PD)$ [$\text{g}/(24 \text{ h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hPa})$] in der Tag- und Nachtphase 82
- Abb. 4.2.3-8: Wasserdampfdurchlässigkeit [$\text{g}/24 \text{ h} \cdot \text{m}^2$] der Flachfolien in den Tag- und Nachtphasen im Vergleich mit den Kontrollvarianten..... 83
- Abb. 4.2.3-9: Permeationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Materialdicke $P_{WD} (\mu\text{m})$ [$\text{g}/(24 \text{ h} \cdot \text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$] der Flachfolien in den Tag- und Nachtphasen mit den Kontrollvarianten..... 84

- Abb. 4.2.3-10: Funktionelle Zusammenhänge der Permeationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Materialdicke P_{WD} (μm) [$\text{g}/(24 \text{ h} \cdot \text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$] der Flachfolien aus dem Granulat NF803 in den Tag- und Nachtphasen84
- Abb. 4.2.3-11: Permeationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz P_{WD} (Δt) [$\text{g}/(24 \text{ h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K})$] der Flachfolien in den Tag- und Nachtphasen im Vergleich mit den Kontrollvarianten85
- Abb. 4.2.3-12: Funktionelle Zusammenhänge der Permeationskoeffizienten in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz P_{WD} (Δt) [$\text{g}/(24 \text{ h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K})$] der Flachfolien aus dem Granulat NF803 in der Tag- und Nachtphase im Vergleich mit den Kontrollvarianten.....86
- Abb. 4.2.3-13: Permeationskoeffizienten der Flachfolien in Abhängigkeit von der Wasserdampfdruckdifferenz P_{WD} (ΔPD) [$\text{g}/(24 \text{ h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hPa})$] in der Tag- und Nachtphase87
- Abb. 4.2.3-14: Funktionelle Zusammenhänge der Permeationskoeffizienten in Abhängigkeit Wasserdampfdruckdifferenz P_{WD} (ΔPD) [$\text{g}/(24 \text{ h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hPa})$] der Flachfolien aus dem Granulat NF803 in der Tag- und Nachtphase.....87
- Abb. 4.2.3-15: Vergleich der Wasserdampfdurchlässigkeiten [$\text{g}/(24 \text{ h} \cdot \text{m}^2)$] von gelochten und ungelochten Flachfolien in der Tag- und Nachtphase88
- Abb. 5.2.1-1: Beikraut unter Mulchfolie M9 während des Freilandversuches 2004101
- Abb. 5.2.1-2: Inhomogenes Mulchfolienmaterial der Mulchfolie M3 vom Sommersversuch 2002101

Abb. 6-1: Jahresdurchschnittspreise vom OPEC-Rohöl im Zeitraum von 1972 bis 2006 (MINERALÖLWIRTSCHAFTSVERBAND E.V. (2008)	116
Abb. A-1: Schematischer Aufbau des Freilandversuches 2004 mit der Verwendung der Folienkombinationen	129
Abb. A-2: Schematischer Aufbau des Klimaversuches 2004	129
Abb. A-3: Lineare FDR-Eichfunktion für den Boden der Versuchsfläche zur Umrechnung der Meßwerte von [mV] in [Vol.-%] nach ANONYMUS (A) (1999)	130
Abb. A-4: Transmission [%] der konventionellen Mulchfolie M0-LLDPE-50b-02 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum Frühjahr 2002	130
Abb. A-5: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M1-NF803/P-20b-02 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum Frühjahr 2002.....	131
Abb. A-6: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M2-NF01U/P-20b-02 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum Frühjahr 2002	131
Abb. A-7: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M3-NF01U/P-25b-02 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum Frühjahr 2002	132
Abb. A-8: Transmission [%] der konventionellen Mulchfolie M0-LLDPE-50b-02 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum Sommer 2002.....	132

Abb. A-9: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M1-NF803/P-20b-02 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum Sommer 2002.....	133
Abb. A-10: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M2-NF01U/P-20b-02 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum Sommer 2002.....	133
Abb. A-11: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M3-NF01U/P-25b-02 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum Sommer 2002.....	134
Abb. A-12: Transmission [%] der konventionellen Mulchfolie M0-LLDPE-20b-03 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2003	134
Abb. A-13: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M4-NF803/P-15b-03 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2003	135
Abb. A-14: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M5-NF01U/P-15b-03 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2003.....	135
Abb. A-15: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M6-NF01U/P-20b-03 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2003.....	136
Abb. A-16: Transmission [%] der konventionellen Mulchfolie M0-LLDPE-20b-04 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2004	136
Abb. A-17: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M4-NF803/P-15b-03 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2004.....	137

- Abb. A-18: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M8-NF01U/P-12b-04 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2004 137
- Abb. A-19: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M9-NF01U/P-20c-04 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2004 138
- Abb. A-20: Transmission [%] der konventionellen Flachfolie D0-EVA-50s-02 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2002 138
- Abb. A-21: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D1-NF803-20-02 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2002..... 139
- Abb. A-22: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D2-NF803-20s-02 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2002..... 139
- Abb. A-23: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D3-NF803-20s-02 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2002..... 140
- Abb. A-24: Transmission [%] der konventionellen Flachfolie D0-EVA-50s-03 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2003 140
- Abb. A-25: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D4-NF803-15-03 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2003..... 141

Abb. A-26: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D5-NF01U-20-03 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2003	141
Abb. A-27: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D6-NF803-12-03 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2003	142
Abb. A-28: Transmission [%] der konventionellen Flachfolie D0-EVA-50s-04 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2004	142
Abb. A-29: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D7-NF803-12-04 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2004	143
Abb. A-30: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D8-NF01U-12-04 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2004	143
Abb. A-31: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D9-NF803-10-04 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2004	144
Abb. A-32: Durchschnittliche Lufttemperatur, Niederschlagsmenge und Einstrahlung im Jahr 2002 in Hannover	144
Abb. A-33: Durchschnittliche Lufttemperatur, Niederschlagsmenge und Einstrahlung im Jahr 2003 in Hannover	145
Abb. A-34: Durchschnittliche Lufttemperatur, Niederschlagsmenge und Einstrahlung im Jahr 2004 in Hannover	145
Abb. A-35: Stundenmittelwerte der Bodenfeuchte im Freilandversuch 2004	146

Abb. A-36: ATR-Spektren vom Kompostierungsversuch der konventionellen Flachfolie D0-EVA-50s-03	147
Abb. A-37: ATR-Spektren vom Bewitterungsversuch der konventionellen Flachfolie D0-EVA-50s-03	147
Abb. A-38: ATR-Spektren vom Kompostierungsversuch der konventionellen Mulchfolie M0-LLDPE-20b-03	148
Abb. A-39: ATR-Spektren vom Bewitterungsversuch der konventionellen Mulchfolie M0-LLDPE-20b-03	148
Abb. A-40: ATR-Spektren vom Kompostierungsversuch der biologisch abbaubaren Flachfolie D4-NF803-15-03	149
Abb. A-41: ATR-Spektren vom Bewitterungsversuch der biologisch abbaubaren Flachfolie D4-NF803-15-03	149
Abb. A-42: ATR-Spektren vom Kompostierungsversuch der biologisch abbaubaren Flachfolie D5-NF01U-20-03.....	150
Abb. A-43: ATR-Spektren vom Bewitterungsversuch der biologisch abbaubaren Flachfolie D5-NF01U-20-03.....	150
Abb. A-44: ATR-Spektren vom Kompostierungsversuch der biologisch abbaubaren Mulchfolie M4-NF803/P-15b-03	151
Abb. A-45: ATR-Spektren vom Bewitterungsversuch der biologisch abbaubaren Mulchfolie M4-NF803/P-15b-03	151
Abb. A-46: ATR-Spektren vom Kompostierungsversuch der biologisch abbaubaren Mulchfolie M5-NF01U/P-15b-03.....	152

Abb. A-47: ATR-Spektren vom Bewitterungsversuch der biologisch abbaubaren Mulchfolie M5-NF01U/P-15b-03	152
Abb. A-48: ATR-Spektren nach Ende des Freilandversuches 2003 der biologisch abbaubaren Mulchfolie M4-NF803/P-15b-03	153
Abb. A-49: ATR-Spektren nach Ende des Freilandversuches 2003 der biologisch abbaubaren Mulchfolie M5-NF01U/P-15b-03.....	153

TABELLEN

Tab. 2.3-1: Oberirdische Umweltfaktoren und deren mögliche Auswirkungen auf den Abbau von Kunststoffen (verändert nach DEGLI-INNOCENTI, 2005)	12
Tab. 2.3-2: Umweltfaktoren im Boden und deren mögliche Auswirkungen auf den Abbau von Kunststoffen (verändert nach DEGLI-INNOCENTI, 2005)	12
Tab. 2.3-3: Wirkungen von Kulturmaßnahmen auf Bodenfaktoren	13
Tab. 2.3-4: Schlüsselvoraussetzungen für den biologischen Abbau nach GRIMA et al. (2000)	14
Tab. 2.4-1: Anbauversuche unter Verwendung von bioabbaubaren Mulchfolien	15
Tab. 2.4-2: Anbauversuche unter Verwendung von konventionellen Mulchmaterialien	17
Tab. 3.1-1: In den Freilandversuchen verwendete PE-Folien.....	19
Tab. 3.1-2: Für die Versuchsfolien verwendete Additive und Pigmente (BRIASSOULIS, 2006a)	20
Tab. 3.1-3: In den Freilandversuchen verwendete biologisch abbaubare Folien.....	20
Tab. 3.3-1: Übersicht über die durchgeführten Freilandversuche 2002-2004	28
Tab. 3.3-2: Die pflanzenbaulichen Angaben der vier Freilandversuche.....	28

Tab. 3.3-3: Untersuchte Folienvarianten der fünf Versuche zur Messung der Wasserdampfdurchlässigkeit	34
Tab. 3.3-4: Daten der Probennahmen zur Messung der Transmission im Rahmen der Freilandversuche	38
Tab. 3.3-5: Pflanzenbaulich relevante Wellenlängenbereiche für die Auswertung der Transmissionsmessungen, verändert nach VON ELSNER (2004a)	39
Tab. 3.3-6: Herstellung der Proben für die Untersuchungen der Folienoberflächen durch Attenuierte Totalreflexion	40
Tab. 3.3-7: Absorptionsbereiche der Infrarotspektroskopie und deren Interpretation nach STUART et al. (1996)	42
Tab. 4.1.4-1: Mittlere Frischmasse-Erträge der Freilandversuche Frühjahr 2002 und Versuchsjahr 2004	60
Tab. 6-1: Ernteverfrühung bei Gemüse, Spargel und Erdbeeren (Angaben in ha) in Deutschland von 2000 bis 2004 (KTBL E.V., 2007)	115
Tab. A-1: Technische Angaben zu den Herstellungsverfahren der Produktion der biologisch abbaubaren Versuchsfolien (verkürzt nach BRIASSOULIS (2006a))	146
Tab. A-2: Wasserdampfdurchlässigkeiten von verschiedenen Kunststoffen aus der Literatur	154

1 EINLEITUNG

1.1 Einführung

Ende der 1990er Jahre wurden am Institut für biologische Produktionssysteme, Fachgebiet Biosystem- und Gartenbautechnik (BGT) der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover erstmals Versuche mit Mulchfolien aus biologisch abbaubaren Werkstoffen (BAW) durchgeführt (WEBER, 2000 und 2003). Die Folien bestanden aus nach DIN 54900 zertifizierten vollständig biologisch abbaubaren Materialien auf Basis petrochemischer Rohstoffe, z.T. mit Anteilen aus nachwachsenden Rohstoffen. Diese neue Materialklasse stellte eine Alternative zu den bisher verwendeten konventionellen Agrarfolien aus Polyethylen (PE) dar, und versprach Kosteneinsparungen durch geringere Arbeits- und Transportkosten, sowie wegfallende Entsorgungskosten durch Kompostierung der Folienreste auf den Kulturflächen (SCHÜSSELER, 2000). In diesen Untersuchungen wurde die Eignung der biologisch abbaubaren Kunststoffe zur Verwendung im Freilandgemüsebau grundsätzlich nachgewiesen und in Versuchen mit Anbauern bestätigt (WALTER, 2001). Angesichts der positiven Versuchsergebnisse wurde im Jahre 2001 mit der Bearbeitung eines vierjährigen EU-Projektes mit dem Titel „New biodegradable polymers for mulching and low-tunnel cultivation“ (QLRT-2000-00044) begonnen. Bis zum Jahre 2005 waren neun europäische Projektpartner aus den Bereichen Agrarforschung, Kunststoffherstellung und -forschung, sowie Umweltanalytik an dem Forschungsvorhaben beteiligt.

Ziel des Projektes war es, verschiedene Agrarfolien aus einem Copolymer von thermoplastischer Stärke und biologisch abbaubaren Polyestern (Mater-Bi[®]) zu testen und in ihren Eigenschaften hinsichtlich Handhabung, Haltbarkeit und Kulturbedürfnissen für den Praxiseinsatz zu optimieren. Dazu wurden drei Freilandversuchszyklen mit regional typischen Gemüsekulturen in unterschiedlichen Klimaten und auf verschiedenen Böden in Mitteleuropa (Deutschland) und der Mittelmeerregion (Italien, Frankreich und Griechenland) durchgeführt und bewertet. In Hannover-Herrenhausen wurden schwarze und grüne Mulchfolien, sowie erstmals transparente Flachfolien aus Mater-Bi, für die gemüsebaulichen Versuche eingesetzt und mit einer konventionellen

PE-Variante, sowie einer Nullparzelle, verglichen. Zusätzlich wurde die biologische Abbaubarkeit der Folienreste in der Kulturfäche und die ökotoxikologischen Auswirkungen der Folienabbauprodukte auf den Boden untersucht.

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Bei einem Preisvergleich von konventionellen PE-Folien und Mater-Bi-Folien wird deutlich, dass zwischen beiden Materialarten ein erheblicher Preisunterschied besteht. Im Januar 2004 kostete LLDPE 0,67 – 0,74 €/kg (BVSE, 2007), während der Marktpreis für Mater-Bi 2003 im Mittel zwischen 2,50 - 3,00 €/kg (WOLF, 2005) lag. Die in der gartenbaulichen Verwendung von bioabbaubaren Folien zu erwartenden Einsparungen der Entsorgungskosten (Arbeits- und Transportkosten, Deponie-Gebühren) sind geringer, als die entstehenden Materialmehrkosten. Diese Tatsache ist für die Verwendung der bioabbaubaren Folien in der gartenbaulichen Produktion ein großes Hindernis. Eine produktionstechnische Möglichkeit zur Preisminimierung ist die Reduktion des Materialeinsatzes durch Verwendung dünnerer Folien. Dabei gilt es, dem Abbauverhalten der bioabbaubaren Folien die Standorteigenschaften der Verwendung im Freiland gegenüberzustellen. Dazu gehören die Bodenfaktoren und die klimatischen Verhältnisse ebenso wie die Kulturdauer und die Ansprüche der Kulturpflanzen bezüglich Düngung und Bewässerung.

Ziel dieser Arbeit war es, in vier Freilandversuchen biologisch abbaubare Mulch- und Flachfolienkombinationen mit konventionellen PE-Folienvarianten und einer Nullparzelle zu vergleichen. Dabei wurde die Foliendicke der bioabbaubaren Folien von Versuch zu Versuch reduziert, um die dünnstmögliche Folie mit akzeptablen Eigenschaften herauszufinden. Zur Beurteilung wurden die Messparameter Bodentemperatur und -feuchte, sowie die Luftzustände und die Einstrahlung unter den Flachfolien und der jeweilige Frischmasseertrag herangezogen. In zusätzlich durchgeführten Laborversuchen sollte die Auswirkung von Alterung auf die spektrale Durchlässigkeit im Verlauf der Freilandverwendung ermittelt werden. Messungen zur Wasserdampfdurchlässigkeit dienten der Ermittlung der Barriereigenschaften. Als dritter Untersuchungsschwerpunkt wurde überprüft, inwieweit eine infrarot-spektroskopische Analyse zur Bewertung des biologischen Abbaues an den Folienoberflächen herangezogen werden kann.

2 STAND DES WISSENS

2.1 Geschützter Anbau

Der geschützte Anbau dient dem Zweck der Kulturverfrühung, bzw. –verlängerung oder auch dem Schutz der Kulturpflanzen vor negativen Umwelteinflüssen. Eine kostengünstige Methode für die Kultur im Freiland ist die Verwendung von Folien zur Abdeckung des Bodens (Mulchfolien) und zum Schutz der Kulturpflanzen (Flachfolien/Folientunnel). Für die Freilandversuche der vorliegenden Arbeit wurden ausschließlich Mulch- und Flachfolien verwendet, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

2.1.1 Mulchfolien

Mulchen definiert SEITZ (1985) als Bodenabdeckung mit organischen Materialien, Papier, Bitumen oder Folie. Als Mulchfolien kommen schwarze oder transparente Kunststofffolien zum Einsatz, bei denen die Kulturpflanzen durch eingestanzte Löcher in die Kulturfläche gepflanzt oder direkt gesät werden.

Durch die Folienverwendung werden eine Vielzahl von Faktoren, die das Wachstum der Kulturpflanze bestimmen, positiv beeinflusst. Dazu gehören je nach Folienfärbung eine mehr oder weniger starke Erhöhung der Bodentemperatur und die Verhinderung von Beikrautwuchs. Übermäßige Sonneneinstrahlung auf die Bodenoberfläche und damit verbundene Austrocknung wird ebenso verhindert, wie Nährstoffauswaschung und Verschlämmung durch Niederschlagseinwirkung. Dadurch wird das Bodenleben gefördert und eine höhere Nährstoffverfügbarkeit gewährleistet. Die Kulturpflanze wird vor bodenbürtigen Schaderregern geschützt und ist weniger durch Bodenanhäufungen verschmutzt, was den Nachernteaufwand reduziert (GROOT et al., 2000).

Neuere Erkenntnisse zeigen, dass mit speziell gefärbten oder aluminisierten Folien der Anflug von Schadinsekten auf die Kulturpflanzen eingeschränkt werden kann (PIEPENBROCK et al., 2003a und 2003b).

Ein Nachteil dieser arbeitsintensiven Anbaumethode im Vergleich zur Kultur im unbedeckten Boden ist, dass neben den Kosten für Folienanschaffung und -entsorgung auch Arbeitskosten für Verlegung und Bergung, sowie Transportkosten anfallen. Bei Verwendung biologisch abbaubarer Folien würde die Folienbergung nach Kulturende, sowie die Entsorgung entfallen (siehe Kap. 1.2). Ein Einsatz von Folien mit Anteilen von nachwachsenden Rohstoffen wäre ein Beitrag zur Ressourcenschonung und Nachhaltigkeit.

2.1.2 Flachfolien

SEITZ (1985) definiert das direkte Abdecken von Kulturpflanzen im Freiland mit dünnen transparenten Folien als Flachfolienmethode. Diese werden zu Kulturbeginn locker über den Pflanzenbestand gelegt und sollen eine Verfrühung oder Verlängerung der Anbauzeit ermöglichen. Durch den Gewächshauseffekt findet eine Temperatur- und Luftfeuchterhöhung unterhalb der Flachfolie, bei ca. 10-20 % geringerer Einstrahlung (KRUG et al., 1991), statt. An Tagen mit geringer Einstrahlung ist mit einem Anstieg der mittleren Tagestemperatur um 2-3 °C, an hellen Tagen mit 5-7 °C zu rechnen.

Die Folien sollten perforiert sein, um einen Austausch mit der Umgebungsluft zu gewährleisten. Dabei werden für eine Abdeckungszeit von bis zu 4 Wochen 100 bis 250 Löcher/m² (Ø 10 mm) angegeben und für Zeiten von 7 bis 10 Wochen 500 bis 1000 Löcher/m² (SCHÜSSELER et al., 2004). KRUG et al. (1991) differenzieren die Lochdichte nach den klimatischen Gegebenheiten des Pflanzenstandortes: In kühlen Klimaten werden 200 – 400 Löcher/m² empfohlen und in wärmeren Regionen 400 – 1000 Löcher/m².

Die Flachfolie ist nicht nur ein Schutz für die Kulturpflanze vor Windkräften, starken Niederschlägen, Schadinsekten und Wildverbiss (SCHÜSSELER et al., 2004), sie fördert das Wachstum und mindert die Schosserbildung bei vernalisationsempfindlichen Pflanzen (KRUG et al., 1991). Die Flachfolie wird nach Erreichen ausreichend hoher Außentemperaturen oder Entwicklungsphase (2-3 Wochen vor Ernte) von der Kultur abgedeckt, aufgerollt und von der Fläche entfernt, um wiederverwendet oder entsorgt zu werden.

Bei Verwendung einer biologisch abbaubaren Flachfolie würden Bergung und Entsorgung entfallen und die Flachfolie auf der Kulturfäche verbleiben, um mit den Ernteabfällen zusammen in die Fläche eingearbeitet zu werden (GROOT et al., 2000).

2.2 Kunststoffsorten

2.2.1 Konventionelle Kunststoffe

Es gibt eine Vielzahl von konventionellen Kunststoffen, von denen das Polyethylen (PE) in der Landwirtschaft am häufigsten eingesetzt wird (NENTWIG, 2006). Auch in der vorliegenden Arbeit wurde PE als konventionelle Kunststoffvariante verwendet. PE entsteht durch Polymerisation aus dem Monomer Ethylen, indem die C-C-Doppelbindung mittels Katalysatoren aufgespalten und zu langkettigen Makromolekülen, dem Polymer, verbunden werden (NENTWIG, 2006). Die Zahl der Monomere in einer solchen Kette bezeichnet man als Polymerisationsgrad, welcher von den Reaktionsbedingungen abhängt und große Unterschiede aufweisen kann. Auch Anzahl und Länge der Querverbindungen (Vernetzung) von Polymerketten beeinflussen die Folieneigenschaften. Je weniger stark vernetzte Querverbindungen vorhanden sind, desto elastischer ist das Polymer (KAUFMANN, 1991).

Aus Polyethylen werden folgende drei Haupttypen hergestellt, die sich nach NENTWIG (2006) in ihren Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten voneinander unterscheiden:

1. Das Low Density-PE (LDPE) wird unter hohem Druck und hohen Temperaturen hergestellt und ist durch starke Vernetzung der Polymerkette charakterisiert.
2. Das High-Density-PE (HDPE) wird unter leicht erhöhten Druck- und Temperaturverhältnissen hergestellt, was zu einer geringen Anzahl von kurzen Querverbindungen der Polymerkette führt.
3. Das Linear-Low-Density PE (LLDPE) wird unter hohem Druck und leicht erhöhten Temperaturen hergestellt und besitzt eine große Anzahl kurzer Querverbindungen.

Das für die Mulchfolien verwendete Linear-Low-Density Polyethylen (LLDPE) kann zu wesentlich dünneren Folien verarbeitet werden, als andere Polyethylene. LLDPE hat weniger Stippen, was in einem homogeneren Produkt und einer größeren Betriebssicherheit resultiert. Zudem ist es zugfester als LDPE.

Bei den in den vorliegenden Versuchen verwendeten konventionellen Flachfolien handelt es sich um das Copolymer Ethylvinylacetat (EVA) aus den beiden Monomeren Ethylen und Vinylacetat. Copolymere sind Kunststoffe, bei denen zwei verschiedene Monomere zur Polymerherstellung verwendet werden. Je nach Herstellungsmethode und Mischungsverhältnis können die Eigenschaften der resultierenden Kunststoffe stark variieren. Für EVA gilt, dass mit steigendem Anteil von Vinylacetat die Elastizität, die mechanische Stabilität und die UV-Stabilität zunehmen und die Thermoplastizität abnimmt. Normalerweise sind 4-10 % EVA in diesen Folien enthalten. (DILARA et al., 2000; NENTWIG, 2006).

Das Verhältnis zwischen amorphen und kristallinen Bereichen in einem Kunststoff ist von entscheidender Bedeutung für die physikalischen Eigenschaften (DILARA et al., 2000). Kristalline Bereiche besitzen eine höhere Dichte, als amorphe Regionen, weswegen eine geringere Dichte bei Polyethylen ein Hinweis auf eine geringe Kristallinität des Materials ist (NENTWIG, 2006). Die Prozesse der Degradation laufen zumeist in der amorphen Phase des Materials ab. Für PE gilt, dass mit ansteigender Materialdichte und Kristallinität auch die Steifigkeit, das Schrumpfvermögen, die Temperaturbeständigkeit und die chemische Stabilität zunehmen. Allerdings nehmen die Permeabilität, die Transmission und die Durchstossfestigkeit ab.

2.2.2 Biologisch abbaubare Kunststoffe

Es sind eine Vielzahl von biologisch abbaubaren Kunststoffen auf dem Markt verfügbar. Einige werden aus fossilen Rohstoffen, wie z.B. Erdöl, hergestellt, andere aus nachwachsenden Rohstoffen, wie z.B. Stärke, Cellulose oder Milchsäure. Diese Kunststoffe haben eine große Variabilität in Bezug auf ihre physikalischen Eigenschaften, Stabilität und Abbaugeschwindigkeit.

Stärke ist ein preisgünstiger nachwachsender Rohstoff, der in ausreichender Menge zur Verfügung steht und landwirtschaftlich produziert wird. Die Stärke ist in einer Vielzahl

von Umgebungen vollständig biologisch abbaubar und verhält sich bei Verbrennung CO₂-neutral (BASTIOLI, 1998).

Nach RICHTER (1988) ist die Stärke das wichtigste Reservopolysaccharid von Pflanzen. Es ist ein Polykondensat aus α -D-Glucose mit der Summenformel $[C_6H_{10}O_5]_n$, von dem zwei Molekülformen in pflanzenspezifischen Anteilen in der nativen Stärke vorkommen: Die Amylose und das Amylopektin. Normalerweise liegt der Anteil von Amylopektin zwischen 70 und 90 % je nach Kulturpflanze. Spezielle Züchtungen von Mais (Amylomais) enthalten allerdings 65 – 85 % Amylose (TÄNZER, 2000).

Der Unterschied zwischen Amylopektin und Amylose liegt in der molekularen Struktur und der Molekülmasse. Während bei der Amylose 200 - 1000 Glucose-Einheiten ein Makromolekül mit wenig seitlichen Verzweigungen bilden, so sind es beim Amylopektin 2000 bis 22 000 Glucose-Einheiten, die eine stark verzweigte Struktur aufweisen (RICHTER, 1988). Die Quellbarkeit von Stärke ist höher, wenn mehr Amylopektin vorhanden ist. Stärken mit hohem Amylosegehalt quellen nur sehr wenig (EBERT, 1993). Aufgrund ihrer einfacheren chemischen Struktur ist die Amylose zur Weiterverarbeitung besser geeignet, als Amylopektin (GROOT et al., 2000). Für eine plastische Extrusion (Plastifizierung) von Stärke muss die Kornstruktur zerstört werden. Dies geschieht bei einer Temperatur von 200 °C, hohem Druck, durch mechanische Kräfte und die Verwendung von Plastifizierungshilfen (Wasser (5 –30 %), Glycerin und andere Polyole) (TÄNZER, 2000; BASTIOLI 2005). Die Auswirkungen unterschiedlicher Glycerin-Gehalte auf Amylose und Amylopektin-Folien sind bei MYLLÄRINEN et al. (2002) beschrieben.

Reine thermoplastische Stärke kann zwar zu Kunststoff verarbeitet werden, ist aber aufgrund ihrer Hydrophilie nur für wenige Anwendungen geeignet (Verpackungschips, etc.). Wird thermoplastische Stärke mit anderen synthetischen Kunststoffen zusammen verarbeitet, ändern sich deren Eigenschaften und der entstehende Kunststoff ist für eine breite Verwendung geeignet. Dabei kann der Anteil der thermoplastischen Stärke über 50 % liegen. Die biologische Abbaubarkeit wird dabei hauptsächlich von der synthetischen Komponente beeinflusst (BASTIOLI, 1998). Die hierbei eingesetzten synthetischen Blendkomponenten müssen einerseits Molekülgruppen enthalten, die einen hydrolytischen und mikrobiellen Abbau zulassen, andererseits müssen aber auch molekulare Strukturen vorhanden sein, die über Wasserstoffbrücken und Dipolkräfte Verbindungen zu Amylose und Amylopektin möglich machen (FRITZ et al., 1994). Hierfür kommen z.B. aliphatische Polyester (wie Polycaprolacton (PCL)) oder auch

Polyesterurethane und Ethylen-Acrylsäure-Copolymere in Frage. Hydrophobe Polymere (wie z.B. PCL) sind aufgrund ihrer unterschiedlichen Polarität mit Stärke nicht mischbar. Die durch einfaches Mischen entstehenden Kunststoffblends besitzen verhältnismäßig schlechte physikalische Eigenschaften, da sie aus getrennten Phasen bestehen (AVELLA et al., 2000).

Bei dem in der vorliegenden Arbeit verwendeten Biokunststoff handelt es sich um „Mater Bi[®]“, hergestellt von der Firma Novamont S.p.a. (Italien). Mater-Bi wurde in den neunziger Jahren von Novamont entwickelt. Nach BASTIOLI (2005) wird bei der Herstellung von Mater-Bi zunächst die Kristallinität von Amylopektin und Amylose zerstört. Dies geschieht in der Gegenwart von Makromolekülen, wie z.B. Polyester, die in der Lage sind, mit Amylose einen Komplex zu bilden. Dieser Komplex ist normalerweise kristallin und besteht aus einer Helix von Amylose, die sich um ein Makromolekül legt. Das Amylopektin bildet keinen Komplex mit dem Polyester und bleibt in amorphem Zustand. Im weiteren Herstellungsprozess des Polymers können sich zwei unterschiedliche Strukturen ausbilden:

1. Die tropfenförmige Struktur besteht aus einem Kern von amorphem Amylopektin, das vom o.g. kristallinen Amylose-Polyester-Komplex umgeben ist.
2. Die Schicht-Struktur hingegen besteht aus einer Schicht Amylopektin, die von zwei Schichten Amylose-Polyester-Komplex eingefasst wird.

Daraus lässt sich eine semikristalline Struktur des Mater-Bi-Kunststoffes ableiten, was für den Abbau dieser Kunststoffe eine wichtige Rolle spielt.

Dabei spielt das Amylose/Amylopektin Verhältnis, die Eigenschaften der Additive, die Prozessbedingungen und die Eigenschaften der Komplexbildner für den entstehenden Kunststoff eine entscheidende Rolle. Dementsprechend hoch ist die Zahl der verschiedenen Polymere, die durch Variation der o.g. Faktoren gezielt produziert werden können.

Auf diese Weise sind viele Verbesserungen und Modifikationen von Mater-Bi entwickelt worden, die in mehrere Klassen eingeteilt werden können. Diese unterscheiden sich in ihren Eigenschaften voneinander und werden für die unterschiedlichsten Anforderungen an Kunststoffprodukte verwendet. Die Klassen sind bei BASTIOLI (1998) beschrieben.

Die im vorliegenden Projekt verwendete Materialklasse „N“ ist ein Copolymer aus Maisstärke und biologisch abbaubaren Polyestern und nach den gültigen Europäischen Standards CEN EN13432 (ebenso DIN 54900 und UNI 10785) als biologisch abbaubar und kompostierbar klassifiziert (BRIASSOULIS, 2006a). Bei dem Polyester handelt es sich nach BRIASSOULIS (2004) um Poly- ϵ -Caprolacton, der zusammen mit geringen Anteilen natürlicher Plastifizierer in den Kunststoff eingebracht wurde. Eine Übersicht über die Eigenschaften und das Abbauverhalten von Polycaprolacton ist bei GOLDBERG (1995) zu finden.

Semikristalline Blends von Stärke und u.a. Polycaprolacton, bei denen eine Komponente empfindlicher auf Hydrolyse reagiert, können in ihrer Abbaugeschwindigkeit gebremst werden, da sich der biologische Abbau (siehe Kapitel 2.2.3, Abschnitt Biotischer Abbau) zunächst auf die amorphen Bereiche im Kunststoff beschränkt (VAN DER ZEE, 2005).

2.2.3 Folienherstellung

Nach NENTWIG (2006) sind Folien in den meisten Fällen sog. Thermoplaste, deren Ausgangsstoffe in Blasfolienextrudern eingeschmolzen, vermischt und anschließend zu Folienschläuchen aufgeblasen werden. Hierbei müssen im Extruder die Prozessparameter Temperatur, Drehzahl und Strömungswiderstand aufeinander abgestimmt sein, um ein optimales Produktionsergebnis zu erzielen. Die Schmelze wird in einer Ringdüse in eine runde Form gebracht, aufgeblasen und dabei von einem Luftstrom innen und außen gekühlt und zu einem Schlauch geformt, der nach oben hin aufgerollt wird. Dieses Verfahren kann sowohl für konventionelle, als auch für biologisch abbaubare Kunststoffe angewendet werden.

Während diese Art der Herstellung von PE-Folien mittlerweile ein kaum noch verbesserungsfähiges Standard-Verfahren ist, besteht bei der Produktion von biologisch abbaubaren Folien noch Forschungsbedarf über die Auswirkungen unterschiedlicher Prozessparameter bei der Extrusion (BRIASSOULIS, 2006a).

Bei der Folienherstellung werden sog. Masterbatches verwendet. Dabei handelt es sich um granuliertes thermoplastisches Material, in dem Konzentrate von Pigmenten oder Additiven enthalten sind. Das Masterbatch wird bei der Herstellung der Folien dem Folienrohstoff zugesetzt, um dem fertigen Produkt bestimmte Ausrüstungen mit

Additiven oder auch Einfärbungen durch Pigmente mitzugeben. Diese sollen die Folieneigenschaften verbessern oder die Verarbeitung der Polymere erleichtern. Die Dosierung mit einem Masterbatch ist einfacher und staubfrei. Man erreicht damit eine genauere Verteilung der Zusätze im Kunststoff (NENTWIG, 2006).

Als Pigment für schwarze Mulchfolien wird u.a. Ruß verwendet. Dieser besteht aus fein verteiltem Kohlenstoff und besitzt eine hohe Farbtiefe und Farbstärke. Auch die Lichtstabilität der Folien wird durch den Zusatz von Ruß verbessert (NENTWIG, 2006; BRIASSOULIS, 2006a). Er absorbiert UV-Strahlung ebenso, wie die meisten anorganischen Pigmente (HUMMEL et al., 1991). Aufgrund seiner schwierigen Dispergierung im Substrat werden aus Ruß Masterbatches (Carbon Black) zur Produktion hergestellt. Die Auswirkungen von Ruß auf die UV-Stabilisierung biologisch abbaubarer Mulchfolien ist bisher noch nicht bekannt (BRIASSOULIS, 2006a).

Der photochemische Abbau von Polymeren in bestimmten Wellenlängenbereichen ist bei der Verwendung von Kunststoffen ein Problem. Nach HUMMEL et al. (1991) liegt die im UV-Bereich der Globalstrahlung (249 - 400 nm) enthaltene Photonenenergie bei 419-293 kJ/mol und damit oberhalb der Bindungsenergie einiger typischer Bindungen in Kunststoffen. Dieses führt zu photochemischen Aufspaltung der Polymerketten und letztlich zur Alterung der Folien in Form von Veränderungen der mechanischen und optischen Eigenschaften. VON ELSNER (2005) nennt drei Möglichkeiten PE-Folien gegen strahlungs- und thermische Belastungen zu schützen. Zum einen geschieht dieses durch Reduzierung der UV-Absorption mittels UV-undurchlässiger Pigmente oder spezielle UV-Absorber. Als zweite Möglichkeit wird die Verringerung der o.g. Photoenergie durch Nickelkomplexe von Phenolen und Thiophenolen (sog. „Quencher“) aufgeführt. Die dritte Möglichkeit sind Antioxidantien, die die im Polymer entstehenden freien Radikale abfangen und neutralisieren. Bei LLDPE werden hierfür u.a. sterisch gehinderte Amine (HALS) eingesetzt, die auch die bei den in der vorliegenden Arbeit verwendeten Folien Anwendung fanden (BRIASSOULIS, 2006a).

Zugesetzte Antioxidantien schützen die Kunststoffe bereits bei der Herstellung, wo durch die Prozesswärme eine Einwirkung des Luftsauerstoffes auf den Kunststoff das Risiko eines oxidativen Abbaues besteht. Hierfür finden sterisch gehinderte Amine oder Phenole in Kombination mit Phosphoniten oder Phosphiten Verwendung. Des Weiteren können noch Weichmacher, Gleitmittel oder Antiblockmittel, bzw. Antistatika in Polymeren enthalten sein (HUMMEL et al., 1991).

2.3 Abbau von Kunststoffen

Agrarkunststoffe unterliegen im Rahmen ihrer Nutzung diversen Umwelteinflüssen, die zum Abbau (Alterung) der Stoffe führen. Der Verlust an Material und somit der Verlust an Festigkeit und Elastizität, die Reduktion der Barriere-Eigenschaften oder auch der Transparenz sind eine Reaktion auf diese Einflüsse. Im folgenden Text sind die Faktoren, unterteilt nach abiotischen und biotischen Ursachen, aufgelistet. Nach VAN DER ZEE (2005) wirken diese beiden Abbaumechanismen gleichzeitig auf den Kunststoff ein oder der biotische Abbau wird durch den abiotischen Abbau initiiert.

Nach DILARA et al. (2000) ist Alterung ein komplizierter nicht-linear verlaufender zeitabhängiger Prozess, der direkt oder indirekt verschiedene Bereiche des Polymers betrifft. Als sensibler Index für den Abbaugrad eines Polymers kann nach DILARA et al. (2000) die Reißfestigkeit in Längsrichtung [%] herangezogen werden. Mit zunehmender Alterung wird das Material spröde und weist einen messbaren Verlust dieser Eigenschaft auf.

2.3.1 Abiotischer Abbau

DEGLI-INNOCENTI (2005) unterteilte die den Abbau betreffenden Umweltfaktoren bezüglich der Agrarkunststoffe in einen oberirdischen und einen unterirdischen Bereich, da bei der Anwendung als Mulchfolie oder Flachfolie die Polymere immer gleichzeitig beiden Einflussbereichen unterliegen. In den folgenden Tabellen sind diese Faktoren aufgezählt und näher beschrieben.

Tab. 2.3-1: Oberirdische Umweltfaktoren und deren mögliche Auswirkungen auf den Abbau von Kunststoffen (verändert nach DEGLI-INNOCENTI, 2005)

Umweltfaktor	Effekt	Auswirkung auf den Kunststoff	Biotische Effekte
Globalstrahlung	Induktion von Fotochemischen Effekten	Reduktion vom Molekulargewicht (MG), Sprödigkeit nimmt zu, Vernetzungszunahme, kann Bioabbau verschlechtern	Keimtötender Effekt, Reduktion der Mikroorganismen (MO)-Population auf bestrahlter Oberfläche,
Wärmestrahlung	Anstieg der Materialtemperatur, Induktion chemischer Reaktionen	Schmelzen, Läsionen, Reduktion vom MG, Sprödigkeit	Höhere Wachstumsraten, Aktivierung von thermophilen MO
Niederschläge und Bewässerung	Anstieg der Wasseraktivität	Hydrolyse, Reduktion des MG, Auswaschung von Plastikbestandteilen	Beginn von MO-Wachstum und biologischem Abbau
Makro-Organismen	Kauen, Verdauung	Physische Materialzerkleinerung, Sprödigkeit, chemischer / enzymatischer Abbau	Erhöhung der Polymeroberfläche kann die Abbauraten steigern

Tab. 2.3-2: Umweltfaktoren im Boden und deren mögliche Auswirkungen auf den Abbau von Kunststoffen (verändert nach DEGLI-INNOCENTI, 2005)

Bodenfaktor	Effekt	Auswirkung auf den Kunststoff	Biotische Effekte
Textur und Bodenstruktur	Porosität	Erhöhte mechanische Abrasion	Beeinflussung von Wasser- und Luftzirkulation
Hitze	Temperaturänderung	Steuerung der Rate des abiotischen Abbaues (z.B. Hydrolyse), die Beweglichkeit der Polymerketten (Bioverfügbarkeit)	Einfluß auf die mikrobiologische Population, Wachstumsraten, Enzymaktivität
Mineralische Bodenzusammensetzung	Kationenaustausch Kapazität (KAK)	Ton kann bei der Biodegradation katalytische Eigenschaften haben	Hohe KAK stellt die Nährstoffe für den biotischen Abbau bereit
Organische Substanz	Nährstoffquelle KAK Bodenstruktur	Kontaktfläche zum Polymer, Regulation des Gasaustausches	Förderung des allg. Bodenlebens
Wasser	Wasseraktivität	Hydrolyse, Auswaschung von Folienbestandteilen (MG-Reduktion)	Notwendig fürs Bodenleben, zuviel bewirkt anaerobe Bedingungen
Saure oder alkalische Bodenbestandteile	pH-Wert	Induktion von Hydrolyse (Reduktion vom MG)	Einfluß auf die mikrobiologische Population, Wachstumsraten, Enzymaktivität
Luft	O ₂ und CO ₂ - Gehalt des Bodens	O ₂ ist für die abiotische Oxidation nötig (Reduktion vom MG)	Individueller Einfluß auf die mikrobiologische Populationen

Nach VAN DER ZEE (2005) kann eine Vielzahl von Polymeren durch Hydrolyse beeinflusst werden, z.B. Polyester, Polyamide oder Polycarbonate. Diese Hydrophilie bildet zusammen mit der Temperatur, dem pH-Wert, der Polymerzusammensetzung und dem Typ der chemischen Bindung die wichtigsten Ursachen für die chemische (abiotische) Alterung. Während der enzymatische Abbau an der Materialoberfläche ansetzt (siehe Abschnitt „Biotischer Abbau“), kann chemische Hydrolyse oder photochemischer Abbau im gesamten Material stattfinden.

Zusätzlich zu den in den Tabellen 2.3-1 und 2.3-2 beschriebenen Faktoren sollten noch die Kulturmaßnahmen erwähnt werden. Diese dienen der Optimierung der Wachstumsbedingungen der Kulturpflanzen und können ebenfalls die Polymere und den biologischen Abbau beeinflussen (siehe Tab. 2.3-3).

Tab. 2.3-3: Wirkungen von Kulturmaßnahmen auf Bodenfaktoren

Kulturmaßnahmen	Beeinflusste Bodenfaktoren
Bodenbearbeitung	Bodenstruktur und -textur, Porenvolumen
Düngung	Organische Substanz, Mineralische Bodenzusammensetzung, Nährstoffgehalt, pH-Wert, MO-Population
Bewässerung	O ₂ und CO ₂ -Gehalt, Nährstoffverfügbarkeit, Wachstumsfaktor für Pflanzen und MO
Chemischer Pflanzenschutz	MO-Population, Änderung von pH-Wert, Oberflächenreaktion auf Polymeren
Pflegearbeiten	Bodenstruktur, Organische Substanz, Mechanische Belastung der Polymere
Kulturpflanzen	Bodenklima durch Beschattung, MO-Population, Bodenstruktur, Wassergehalt

2.3.2 Biotischer Abbau

Tab. 2.3-4: Schlüsselvoraussetzungen für den biologischen Abbau nach GRIMA et al. (2000)

Faktoren	Wirkungen/Eigenschaften
Mikroorganismen	Produktion von für den Polymerabbau notwendigen Enzymen
Umweltfaktoren	Temperatur, Salze, Sauerstoff und besonders Feuchtigkeit
Polymermorphologie	Art der chemischen Bindung, Grad der Polymerisation, Kristallinität, Verteilung des Molekulargewichtes und Grad der Hydrophobie

Damit ein biotischer Abbau stattfinden kann, müssen die in Tabelle 2.3-4 aufgezeigten Schlüsselvoraussetzungen erfüllt sein (GRIMA et al., 2000). Es gibt nach VAN DER ZEE (2005) viele verschiedene Abbaumechanismen beim biotischen Abbau von Polymeren, die meistens synergetisch in belebten Umgebungen auftreten. Dabei spielen von Mikroorganismen (Bakterien, Pilze, Hefen, etc.) ausgeschiedene Enzyme oder Sekrete (Säuren oder Peroxide) eine entscheidende Rolle. Nach GRIMA et al. (2000) sind dieses beim Polymerabbau hauptsächlich Enzyme, die biologische Hydrolyse und biologische Oxidation bewirken.

Der mikrobielle Abbau wird, vereinfacht dargestellt, in zwei Schritten vollzogen: Zuerst findet eine Depolymerisation oder Aufbrechen der Polymerketten statt. Hierfür sind die o.g. extrazellulären Enzyme, in Abhängigkeit von der Größe der Polymerkette und ihrer chemischen Löslichkeit, verantwortlich. Ansatzpunkte sind hier die verschiedenen Bindungsarten der Polymerketten, bzw. deren Seitenketten oder funktionelle Gruppen. Im zweiten Schritt werden Polymerbruchstücke in die Zellen der Mikroorganismen transportiert und zur Energiegewinnung mineralisiert. Reaktionsprodukte dieser Vorgänge sind Gase (CO₂, CH₄, N₂, etc.), Wasser, Salze und mikrobielle Biomasse. Genauere Informationen zum mikrobiellen Abbau sind u. a. bei VAN DER ZEE (2005) zu finden.

2.4 Literaturübersicht: Freilandversuche mit Mulchfolien

In der Literatur sind Versuche mit Verwendung von biologisch abbaubaren Kunststoffen im Gartenbau beschrieben. In den folgenden Tabellen 2.4-1 und 2.4-2 sind diese aufgeführt.

Tab. 2.4-1: Anbauversuche unter Verwendung von bioabbaubaren Mulchfolien

Zeitraum/Kultur	Prüfvarianten	Ergebnisse	Literatur
2004/2005/2006, USA Kopfsalat, Brokkoli, Paprika, Wassermelonen	- PE-Folie, schwarz, 100 µm - Mater-Bi NF01U/P, schwarz, 15 µm - Mater-Bi NF803/P, schwarz, 12 und 15 µm - bioabbaubare Mulchfolie „Garden Bio Film“ - 2 Abbaubare PE-Folien - verschiedene Mulchpapiere	- 2005: keine signifikanten Unterschiede in der Erntemenge zwischen Garden Bio Film und den PE- Folien - 2006: keine signifikanten Unterschiede der Erntemen- gen zwischen den bioabbaub- baren und den PE-Folien	MILES et al. (2004) MILES et al. (2006)
2004/2005, Deutschland Blumenkohl	- Mater-Bi, schwarz, 15 µm - Nullparzelle	Geringere Erträge bei Verwendung der Mulchfolie	POSTWEILER et al. (2004a)
2002, 2003, 2004, Deutschland Einlegegurken	- Mater-Bi, schwarz, 15 µm - Ecoflex, 12 µm - PE-Folie, schwarz, 30 µm	Keine signifikanten Unter- schiede zwischen den Folien, Leicht höhere Erträge auf PE, geringste auf Mater-Bi	AROLD (2003), AROLD (2004) AROLD (2005)
2001, Deutschland Fenchel	- PE, schwarz, 20 µm - Nullparzelle - Mater-Bi, schwarz, 18 µm - Ecoflex, schwarz, 20 µm - Bioflex, schwarz, 50 µm	Keine statistisch absicherbaren Unterschiede zwischen den Varianten	WEBER (2003)
2003, Deutschland Fenchel	- Mater-Bi, schwarz, 18 µm - Nullparzelle	Durchweg höhere Erträge unter Mulchfolie Mulchfolie wirksame Maß- nahme zur Sicherung der N- Versorgung/ Minderung der Auswaschung	KELL et al. (2003)
2004/2005, Deutschland Knollenfenchel	- Mater-Bi, schwarz, 15 µm - Nullparzelle	Durchschnittlich höhere Erträge und bessere Qualitäten durch die Mulchfolien	POSTWEILER et al. (2005b)
2003/2004/2005, Deutschland Kohlrabi	- Mater-Bi, schwarz, 15 µm - Nullparzelle	Höhere Erträge bei Mulchfolie (2003), Geringere Erträge bei Mulchfolie (2005), geringerer Schad- erregerbefall, Probleme mit Ausfällen bei Hitze/Frost	POSTWEILER et al. (2003) POSTWEILER et al. (2004c) POSTWEILER et al. (2005a)
2006, Deutschland Kopfsalat im Gewächshaus	- Mater-Bi, schwarz, 15 µm - Nullparzelle	Höhere Erträge bei Mulch- folie, Einsatz im Folienhaus problemlos möglich	LAUN et al. (2006)
2004/2005, Deutschland Kopf- und Eissalat	- Mater-Bi, schwarz, 15 µm - Nullparzelle	Höhere Erträge bei der Mulchfolie	POSTWEILER et al. (2004b) POSTWEILER et al. (2005c)

Tab. 2.4-1: Fortsetzung

Zeitraum/Kultur	Prüfvarianten	Ergebnisse	Literatur
2001, Deutschland Kopfsalat	- Mater-Bi, schwarz, 20 µm - PE-Folie, schwarz, 20 µm - Nullparzelle	Signifikant höhere Erträge durch die Mulchfolien, keine Unterschiede zwischen den Folien	KELL (2001)
2003, Deutschland Kopfsalat	- Mater-Bi, schwarz, 20 µm - PE-Folie, schwarz, 20 µm - Nullparzelle	Marktgewicht wurde auf Mulchfolien eine Woche früher erreicht, keine Unterschiede zwischen den Folien	SPORY et al. (2003)
2003, Deutschland Kopfsalat	- Ecoflex, schwarz, 20 µm - Mater-Bi, 15 µm - schwarze Mulchfolie - Kontrolle	Weniger Ertrag auf der Nullparzelle, keine Unterschiede zwischen den Folien Weniger Folienstücke an der Fräse nach Einarbeitung bei Mater-Bi	SCHREYER (2003)
2005, Deutschland Kopfsalat	- Mater-Bi, braun, 15 µm - Mater-Bi, grün, 15 µm - Mater-Bi, schwarz, 15 µm - Mater-Bi, schwarz, 18 µm - Biofol KS 30, 18 µm - Nullparzelle	Höhere Erträge durch die Mulchfolien im Vergleich zur Nullparzelle, keine Unterschiede zwischen den Folien, höhere Bodentemperaturen unter der grünen Mulchfolie	KELL et al. (2005)
2001 – 2003, Deutschland, Steckhölzer	- Mater-Bi, schwarz, 20 µm - Mater-Bi, schwarz, 15 µm - Mater-Bi, schwarz, 18 µm - RKW Agrarfolie, schwarz, 15 µm - PE-Folie, schwarz, 40 µm - Nullparzelle	Folienvarianten zeigten besseres Wachstum, als Nullparzelle. Erträge der Folienvarianten ohne signifikante Unterschiede.	BRAUN (2007)
2001, Spanien 2 Melonensorten unter Flachfolien / Flachtunnel	- Mater-Bi, 18 µm, transparent - Mater-Bi, 18 µm, schwarz - Mater-Bi, 15 µm, schwarz - LDPE-Folie, 25 µm, transparent	Signifikant geringere Erntemenge der 15 µm Folie, Sortenspezifische geringe Unterschiede aller anderen Varianten	GONZALES et al. (2003)
2001, Spanien Tomaten, biologischer Anbau	- Mulchpapier, 287µm, - LLDPE, 15 µm - Mater-Bi, 18 µm - Nullparzelle	Signifikant höhere Ernteergebnisse bei Mater-Bi und LLDPE	MARTIN-CLOSAS et al. (2003)
2000, Tomaten 2001, Rosenkohl 2001, Basilikum 2002, Tomaten, Spanien	- PE, schwarz, 50 µm - Nullparzelle - Mater-Bi, schwarz, 18 µm - Mater-Bi, schwarz, 15 µm - Mater-Bi, schwarz, 15 µm - Mater-Bi, schwarz, 12 µm	Insgesamt geringe Ertragsunterschiede, z.T. signifikante Unterschiede zur Nullparzelle	MINUTO et al. (2003)
2001, Frankreich Melonen, Kopfsalat, Mais	- Bioabbaubare Mulchfolien - Mulchfolien mit abbaubaren Additiven - PE-Folie, 20-25 µm	Keine signifikanten Unterschiede zur PE-Folie	BEAUREPAIRE et al. (2003)

Zusammenfassend lässt sich eine kulturabhängige Reaktion auf den Einsatz von Mulchfolien im Allgemeinen und bioabbaubaren Mulchfolien im Speziellen feststellen. Mit Ausnahme der Kulturpflanze Blumenkohl war eine signifikante Erhöhung der Erträge

durch die Folienverwendung festzustellen. Die bioabbaubaren Folien zeigten im Vergleich zu den konventionellen Mulchfolien keine signifikanten Unterschiede.

Tab. 2.4-2: Anbauversuche unter Verwendung von konventionellen Mulchmaterialien

Zeitraum/Kultur	Prüfvarianten	Ergebnisse	Literatur
2002-2003, Ungarn Gemüsepaprika,	- PE, Schwarz, 120 µm - PE, Violett, 20 - PE, Hellgrün, 20 µm - PE, Dunkelgrün, 40 µm - PE, Rot, 80 µm - PE, Transparent, 40 µm - Nullparzelle	Signifikant höhere Erträge auf den Mulchparzellen, Ertragshöhe bei den transparenteren Folien bei hoher Einstrahlung geringer	LOCHER, et al. (2005)
2003, Deutschland Kopfsalat	- Polypropylen-Vliese in schwarz, rot, blau, dunkelblau, grün, weiß, silber -unbedeckter Boden	Weniger Blattläuse auf silberner und weißer Folie im Vergleich zur Kontrolle Signifikante Unterschiede vor Bestandesschluss	PIEPENBROCK et al. (2003a)
2003, Deutschland Brokkoli	- Polypropylen-Vliese in schwarz, rot, blau, dunkelblau, grün, weiß, silber -unbedeckter Boden	Keine signifikanten Unterschiede beim Ertrag zwischen allen Varianten, geringster Ertrag bei rot, höchster bei silber	PIEPENBROCK et al. (2003b)

3 MATERIAL UND METHODEN

3.1 Folienarten

Die in den Freiland- und Laborversuchen verwendeten und in den Tabellen 3.1-1 und 3.1-3 näher beschriebenen biologisch abbaubaren und konventionellen Folien wurden von den Projektpartnern PATI S.p.a. aus San Zenone Degli Ezzelini/Italien (PATI) und PLASTIKA KRITIS S.A. aus Heraklion/Griechenland (PLKR) im Rahmen des EU-Projektes QLRT-2000-00044 hergestellt. Zur eindeutigen Bezeichnung jeder Versuchsfolie wurde ein Foliencode verwendet, der folgendermaßen zu lesen ist:

Beispiel: **M1-NF 803/P-20b-02-(020419)**

M1 = Bezeichnung der Folie (M = Mulchfolie, D = Flachfolie)

NF 803/P = Bezeichnung des verarbeiteten Granulates

20 = Foliendicke von 20 µm

b = Farbe der Folie, hier schwarz/black, s = UV-stabilisiert, c = grün/coloured

02 = Herstellungsjahr, hier 2002

(020419) = Datum der Probennahme (JJMMTT) für die chronologischen Messungen der Transmission (Abschnitt 3.3.2.2)

Für die Beschriftung von Diagrammen wurde der Einfachheit halber lediglich die jeweilige Bezeichnung der Folien verwendet.

3.1.1 Polyethylen-Folien

Die Polyethylen(PE)-Folien waren Standard-Erzeugnisse aus dem aktuellen Produktionsprogramm der beiden Folienhersteller. Dabei bestanden die Mulchfolien aus linearem Polyethylen mit niedriger Dichte (LLDPE) und die Flachfolien aus Ethylvinylacetat (EVA). Als weitere Bestandteile waren Farbpigmente und UV-Stabilisatoren enthalten. Bei den Mulchfolien wurden die Foliendicken in den Versuchsjahren 2003 und 2004 von 50 µm auf 20 µm reduziert.

Tab.3.1-1: In den Freilandversuchen verwendete PE-Folien

Mulchfolien- Bezeichnung	Hersteller	Flachfolien- Bezeichnung	Hersteller
M0-LLDPE-50b-02	PATI	D0-EVA-50s-02	PATI
M0-LLDPE-20b-03	PLKR	D0-EVA-50s-03	PATI
M0-LLDPE-20b-04	PLKR	D0-EVA-50s-04	PATI

3.1.2 Biologisch abbaubare Folien

Die Ausgangsgranulate für die biologisch abbaubaren Folien wurden unter dem Markennamen Mater-Bi[®] von der Firma Novamont S.p.A. aus Novara/Italien hergestellt. Über die genaue Zusammensetzung dieser Granulate wurden keine Angaben gemacht, um den Produktschutz zu gewährleisten (GUERRINI, 2004). Für Hannover wurden die Granulate NF803 (/P) und NF01U (/P) ausgewählt. Während NF803 (/P) bei allen anderen Versuchsstandorten eingesetzt wurde, war NF01U (/P) aufgrund der höheren Abbaugeschwindigkeit speziell für den Einsatz in Mitteleuropa konzipiert.

Den Folienherstellern zufolge bestanden die Folien aus folgenden Bestandteilen:

Eine für Hannover produzierte schwarze biologisch abbaubare Mulchfolie enthielt 91 % NF01U/P und 9 % Carbon Black Master Batch (high). Eine Flachfolie enthielt entweder 100 % NF803 oder 99 % NF803 und 1 % Master Batch mit UV-Stabilisator (ZANON, 2004).

BRIASSOULIS (2006a) nennt folgende weitere Bestandteile der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Biokunststoffe:

Tab.3.1-2: Für die Versuchsfolien verwendete Additive und Pigmente (BRIASSOULIS, 2006a)

Name	Farbe	Erläuterungen	Hersteller
VIBA Carbon Black 99545	schwarz	auf Mater-Bi [®] -Basis, Carbon black-Gehalt 40%	PATI
KRITILEN BLACK 438	schwarz	Auf LDPE oder LLDPE-Basis	Plastika Kritis
KRITILEN GREEN 51670	grün	Auf LLDPE-Basis	Plastika Kritis
KRITILEN UV 20H	transparent	Auf LDPE-Basis, UV-Stabilisator: HALS	Plastika Kritis
KRITILEN UV 22H	transparent	Auf LLDPE-Basis, UV-Stabilisator: HALS	Plastika Kritis
Cyatec UV1164	transparent	UV-Absorber mit geringer Migrationsrate, geeignet für dünne Folien	PATI

Die beiden Folienhersteller Plastika Kritis und PATI benutzten verschiedene Herstellungsparameter für die Produktion der Versuchsfolien. Dieses war auf die unterschiedliche Größe der Extruder und damit auch die Betriebsbedingungen zurückzuführen (BRIASSOULIS, 2006a). Die Herstellungsparameter sind im Anhang (Tabelle A-1) näher erläutert.

Tab. 3.1-3: In den Freilandversuchen verwendete biologisch abbaubare Folien

Mulchfolien-Bezeichnung	Hersteller	Flachfolien-Bezeichnung	Hersteller
M1-NF 803/P-20b-02	PATI	D1-NF 803-20-02	PLKR
M2-NF 01U/P-20b-02	PLKR	D2-NF 803-20s-02	PLKR
M3-NF 01U/P-25b-02	PLKR	D3-NF 803-20s-02	PATI
M4-NF 803/P-15b-03	PLKR	D4-NF 803-15-03	PATI
M5-NF 01U/P-15b-03	PLKR	D5- NF 01U-20-03	PATI
M6-NF 01U/P-20b-03	PLKR	D6-NF 803-12-03	PATI

Tab. 3.1-3 Fortsetzung:

M7-NF 803/P-10b-04	Nur Probe geliefert PLKR	D7-NF 803-12-04	PATI
M8-NF 01U/P-12b-04	PLKR	D8- NF 01U-12-04	PATI
M9-NF 01U/P-20c-04	PLKR	D9-NF 803-10-04	PATI
M10-NF803/P-15b-04	PATI	D10-NF 803-30-04	PATI

Die in der Tabelle grau markierten Folien wurden nur für den in Abschnitt 3.3.2.1 beschriebenen Wasserdampfdurchlässigkeits-Versuch verwendet.

Die Materialdicke der biologisch abbaubaren Mulch- und Flachfolien wurde im Laufe der Freilandversuche von 25 µm, bzw. 20 µm auf bis zu 10 µm reduziert, um den Punkt zu ermitteln, bei dem eine Funktionalität der Agrarfolien noch gewährleistet ist und die Materialkosten weitestgehend reduziert sind.

3.2 Messtechnik

3.2.1 Daten-Aufzeichnung und Temperaturregelung

Für die Aufzeichnung der Messdaten und zur Temperaturregelung wurde der vom BGT entwickelte Datenlogger ITG 10 verwendet. Dieses Gerät konnte bis zu 70 Messstellen in frei wählbaren Zeitintervallen von 10 bis 60 Sekunden abfragen, Mittelwerte berechnen und im 512-KB-Speicher ablegen. Zusätzlich war es möglich, auf 14 Messstellen Regelungsfunktionen auszuführen. Diese Funktion wurde bei den unter Punkt 3.3.2.1 beschriebenen Versuchen zur Wasserdampfdurchlässigkeit verwendet, wobei eine 2-Punkt-Regelung mit einem oberen und unteren Schwellenwert eingestellt wurde.

Für die Freilandversuche wurden die Meßwerte alle 30 Sekunden ermittelt und alle 15 Minuten als Mittelwert abgespeichert. In den Laborversuchen wurden die Meßwerte ebenfalls alle 30 Sekunden abgefragt, aber alle 5 Minuten gemittelt. Die gespeicherten Messwerte konnten mit dem Terminalprogramm Procomm Plus in ein durch Microsoft Excel lesbares Dateiformat umgewandelt werden. Die Spannungsversorgung erfolgte

mit einem 6 V Netzgerät und zur Überbrückung von Stromausfällen war zusätzlich ein Satz Batterien am Gerät angeschlossen.

3.2.2 Klimamessungen

Thermoelemente

Zur Temperaturmessung wurden NiCrNi-Thermoelemente mit einem Drahtdurchmesser von 0,5 mm verwendet. Die verschweißten Messpunkte waren mit Epoxydharz sowohl in Kunststoff-, als auch in Edelstahlhülsen eingegossen. Dadurch konnten die Messfühler an ihre vorgesehene Verwendung speziell angepasst werden. Für Bodentemperaturmessungen wurden verlängerte und mit einem ETFE-Kabelschutz versehene Temperaturfühler verwendet und für die Mini-Psychrometer standen in dünnen Edelstahlhülsen versiegelte Thermoelemente zur Verfügung.

Psychrometer

Zur Messung der feuchten und trockenen Lufttemperatur wurden zwei selbstgebaute Arten von Psychrometern verwendet. Mini-Psychrometer wurden zur Klimawertebestimmung unterhalb der Flachfolien im Freiland installiert und Standard-Psychrometer wurden in den Laborexperimenten und zur atmosphärischen Messung im Freiland benutzt.

Die gemessenen Trocken- und Feuchtekugeltemperaturen wurden zur Bestimmung der erforderlichen Klimawerte (Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Wassergehalt der Luft, etc.) herangezogen.

Solarimeter

Die Einstrahlung wurde mit Solarimetern Typ CM6 (Kipp&Zonen, Niederlande) gemessen. Diese Geräte erfassen die im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 3000 nm eingestrahelte Energie unbewertet in einem Messbereich von 0 bis 2000 W/m². Die

Messwerte in der Einheit [mV] mussten anschliessend mit einem vorher bestimmten gerätespezifischen Faktor in [W/m^2] umgerechnet werden.

3.2.3 Bodenfeuchtemessung

Zur Bestimmung der Bodenfeuchte wurden in den Versuchsjahren 2002 und 2003 Tensiometer der Firma Ecotech, Bonn verwendet. Diese bestanden aus einem 40 cm langen wassergefüllten



Abb.3.2-1: Theta-Probe-Bodensonde zur FDR-Messung

Plexiglasschaft von 20 mm Durchmesser, der am oberen Ende mit einem Silikonstopfen und am unteren Ende mit einer keramischen Kerze verschlossen war.

Zur Installation der Tensiometer wurde an jeweils einem Messpunkt pro Parzelle ein 30 cm tiefes Loch gebohrt und mit einem Wasser-Lehm-Gemisch für besseren Bodenschluss angefüllt. Die mit destilliertem Wasser befüllten Tensiometer wurden anschließend in diese Löcher eingesteckt und festgedrückt. Die Messung der anliegenden Saugspannung des Bodens erfolgte manuell einmal wöchentlich mit einem Digital-Feinmanometer (Typ GDH-12A, Fa. Greisinger, Regenstauf).

Im Versuchsjahr 2004 wurden die Tensiometer durch Frequency Domain Response (FDR)-Sonden (Abb.3.2-1), Typ ML2x (Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK) ersetzt. Die volumetrische Bodenfeuchte wurde hierbei über die relative Dielektrizitäts-Konstante des Bodens bestimmt. Dazu wurden bei einem Versuchsblock pro Parzelle jeweils eine Sonde in 30 cm Bodentiefe horizontal und eine weitere vertikal in den möglichst ungestörten Boden unter dem Wurzelbereich der Kulturpflanzen eingegraben. Die Meßwerte konnten über den Datenlogger ITG 10 ausgelesen und gespeichert werden. Zur Umrechnung der Meßwerte von [mV] in [Vol.-%] wurde eine lineare Eichfunktion für den Boden der Versuchsfläche ermittelt (ANONYMUS (A), 1999). Dazu wurden von ungestörten Bodenproben im wassergesättigten und im getrockneten Zustand mit einer tragbaren FDR-Sonde das Potential und durch Wägung der Wassergehalt des Bodens gemessen und in Beziehung gesetzt (siehe Tab. A-1 im Anhang).

3.2.4 Transmission

Die Untersuchungen der Strahlungsdurchlässigkeit wurden mit dem Spektralphotometer Lambda 900 (Perkin Elmer, USA) durchgeführt. Das Gerät verwendete für Messungen im UV-Bereich eine Deuterium-Lampe und für Messungen im Bereich VIS/NIR eine Halogen-Lampe. Dadurch konnte ein Messbereich von 185 nm bis 3000 nm erfasst werden.

Durch optische Spiegel, holographische Gitter und Filter wurde ein monochromatischer Strahl erzeugt, der auf die vertikal eingespannte Probe traf, diese unter Absorption durchdrang und anschließend in einer Ulbricht-Kugel analysiert wurde. Das Ergebnis wurde vom Analyseprogramm Uvwinlab (Perkin Elmer, USA) mit einer vorab ohne Probeexemplar durchgeführten Referenzmessung verrechnet und in einem durch Microsoft Excel lesbaren Dateiformat abgespeichert.

3.2.5 Attenuierte Totalreflexion

Die Untersuchungen der molekularen Eigenschaften der Folienoberflächen wurden mit dem Spektralphotometer Spectrum BX (Perkin Elmer, USA) vorgenommen. Das Gerät führte die Messungen mittels der attenuierten Totalreflexion (ATR) durch. Diese Methode arbeitete nach dem Prinzip der Infrarot-Spektroskopie, bei dem man sich zu Nutze macht, dass Strahlungsenergie aus IR-Strahlung Bindungen zwischen Atomen oder Atomgruppen in

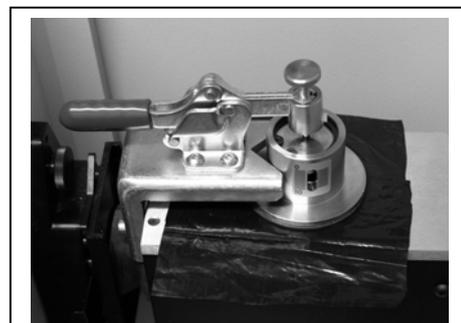


Abb. 3.2-2: Zur ATR-Messung eingespannte Mulchfolienprobe

Molekülen zum Schwingen anregt. Je nach Atommasse, Elektronegativität und anderen Faktoren ist dieses bei charakteristischen Wellenzahlen der Fall, so daß durch einen Vergleich von gemessenen IR-Spektren mit denen von Vergleichssubstanzen aus der Literatur oder Datenbanken auf die Anwesenheit bestimmter Moleküle geschlossen werden kann (GOTTWALD et al., 1997). Zur Messung wurde die Probe in der Messkammer des Gerätes horizontal auf einen in einer Platte eingelassenen Zink-Selenid (ZnSe)-Kristall gelegt und durch einen mechanischen Spannmechanismus und

einen Andruckstempel zur Verbesserung des Probenkontaktes fixiert (Abbildungen 3.2-2 und 3.2-3). Die Sauberkeit des Kristalles und der enge Kontakt zu der Probe waren hierbei besonders zu beachten (HUMMEL et al., 1991). Die Analyse erfolgte mittels eines IR-Lichtstrahles, der über Spiegel seitlich in den Kristall gelenkt wurde. Durch den im Vergleich zur Folienprobe höheren Brechungsindex des ZnSe-Kristalles von $n=2,41$ bei 1000 cm^{-1} (ANONYMUS (B), 1998) wurde dieser durch Totalreflexion an seinen Grenzflächen zickzackförmig durchwandert (Abbildung 3.2-4). Dabei drang der IR-Strahl wenige Wellenlängen tief in das Material der Folienprobe ein und wurde teilweise absorbiert. Diese Minderung der Reflexion wurde vom Messgerät mit einer vorab ohne Probe durchgeführten Referenzmessung verrechnet und als IR-Absorptions-Spektrum ausgegeben (GOTTWALD et al., 1997) (HUMMEL et al., 1991).



Abb. 3.2-3: Geöffnete Messkammer vom Messgerät Spectrum BX: ZnSe-Kristall in der Bodenplatte mit aufgesetztem Spannmechanismus

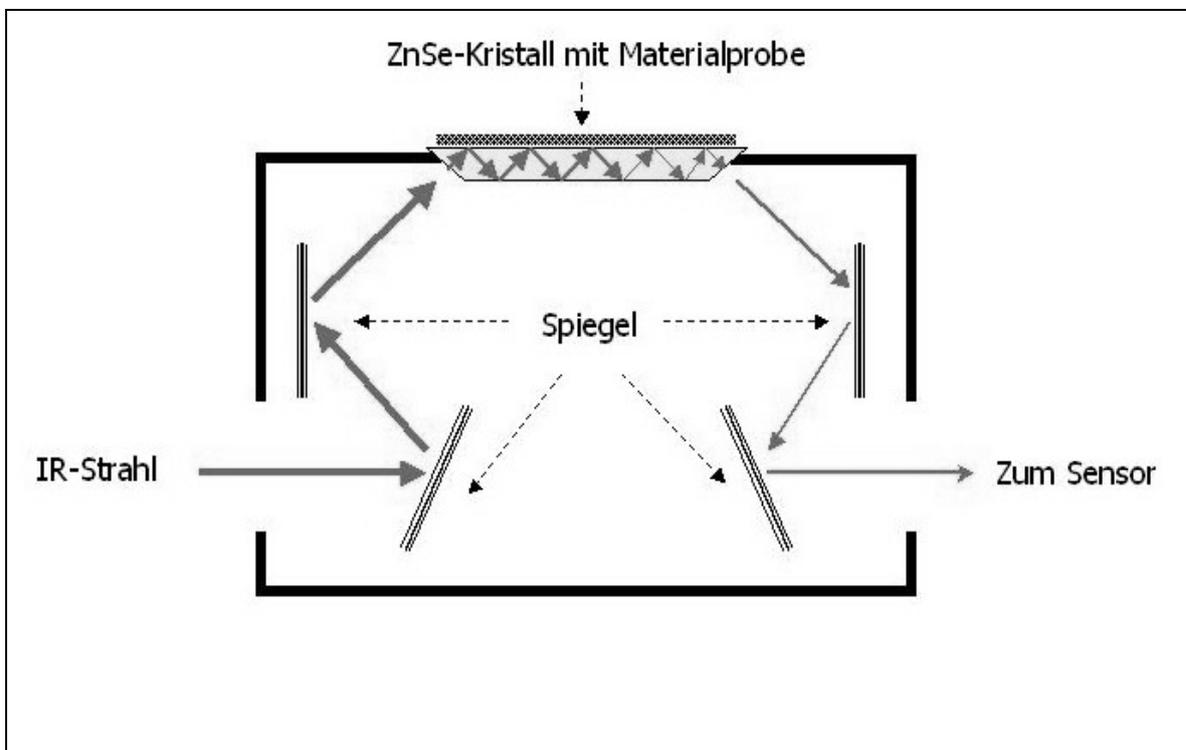


Abb.3.2-4: Schematische Darstellung des optischen Pfades durch den ATR-Messaufbau und den ZnSe-Kristall

3.2.6 Massebestimmung

Zur Bestimmung der Frischmassen in den Freilandversuchen (Kapitel 3.3.1) und des Masseverlustes bei den Untersuchungen zur Wasserdampfdurchlässigkeit (Kapitel 3.3.2.1) wurden elektronische Waagen des Types LC 6201 (Sartorius AG, Göttingen) verwendet. Diese Waagen besaßen einen Messbereich bis 6200 g mit einer Ablesegenauigkeit von 0,1 g, bei einer Messzeit von 1 s. Reproduzierbarkeit und Linearitätsabweichung waren mit einem Wert von jeweils $\leq 0,1$ g angegeben. Der Temperaturbereich der Waagen lag zwischen 0 °C und 40 °C (ANONYMUS (E), 2006).

Die Waagen konnten zur kontinuierlichen Speicherung der Messergebnisse über eine integrierte Daten-Schnittstelle an den Datenlogger ITG 10 angeschlossen werden.

3.3 Versuche

3.3.1 Freilandversuche

Die Freilandversuche wurden anhand vorab projektintern festgelegter Richtlinien für Installation, Messwerterfassung und Probenentnahme durchgeführt. Alle vom BGT durchgeführten Freilandversuche fanden auf derselben Fläche in Hannover-Herrenhausen statt. Dabei wurde die gesamt zur Verfügung stehende Versuchsfläche bei jedem Freilandversuch nur zur Hälfte genutzt. Auf der ungenutzten Fläche wurde ein Gründünger (*Phacelia*) zur Unkrautunterdrückung kultiviert. Der Folgeversuch wurde dann auf der Brachfläche des Vorjahres angelegt.

Bei dem Boden handelte es sich um einen aus fluvi-glazialen Sand entstandenen Gartenboden. Die Bodenart wurde als lehmiger Sand beschrieben, mit einer Korngrößenverteilung von 78 % Sand, 16 % Schluff und 6 % Ton. Als Feldkapazität wurde ein Wassergehalt von 20 Vol.-% angegeben (WIEBE, 1971). In den regelmäßigen Kontrollmessungen der Freilandversuche wurde ein pH-Wert von ca. 6,7 und ein Gehalt an organischer Substanz von 4 bis 5 % festgestellt.

Aufbau

In den Abbildungen 3.3-1 und 3.3-2 ist der bei allen vier Versuchen einheitliche Versuchsaufbau dargestellt. Pro Versuch wurden drei biologisch abbaubare Mulch- und Flachfolien-Kombinationen mit einer konventionellen Polyethylen-Variante und einer Nullparzelle ohne Folienabdeckung verglichen. Zur statistischen Absicherung wurde eine einfaktorielle vollständig randomisierte Blockanlage mit drei Wiederholungen angelegt. Es wurden die in Tabelle 3.1-3 aufgeführten Folien in den Paarungen der Tabellenzeilen verwendet. Der gesamte Versuch umfasste demnach 15 Parzellen. In Tabelle 3.3-1 sind die durchgeführten Freilandversuche zusammenfassend dargestellt.

Für den Versuch des Jahres 2004 mussten andere Folienkombinationen verwendet werden als ursprünglich geplant. Die Gründe hierfür lagen darin, dass die Mulchfolie M7 nur als Materialprobe geliefert wurde und die biologisch abbaubaren Flachfolien aufgrund mangelnder Reißfestigkeit nicht verwendet werden konnten. Aus diesen Änderungen ergab sich auch eine ungleichmäßige Zahl an Wiederholungen für die einzelnen Folienkombinationen. Der Versuchsaufbau 2004 ist im Anhang (Abb. A-1) schematisch dargestellt.

Aufgrund der Materialeigenschaften der Flachfolien wurde 2004 die Messung der Klimawerte in einem eigenen Versuch vorgenommen. Um die ursprünglich für den Kulturversuch vorgesehenen Flachfolien mechanisch nicht zu überlasten, wurde die Beetlänge auf 5 m festgelegt. Die Versuchsanlage bestand aus 4 Parzellen ohne Wiederholungen. Der Versuch fand in der Zeit vom 01.08.2004 bis 05.08.2004 statt und ist im Anhang (Abb. A-2) schematisch dargestellt.

Die Beete wurden, wie in Abbildung 3.3-1 ersichtlich, in zwei Abschnitte geteilt. Der vordere Bereich hatte eine Länge von 15 m und war zur Produktion der Kulturpflanzen mit perforierter Flachfolie (200 Löcher mit 12 mm \varnothing pro m²) abgedeckt. Im hinteren Abschnitt von 5 m Länge war eine nicht-perforierte Flachfolie installiert, um das Schneiden von Folienproben zu ermöglichen. Hier wurde der Pflanzabstand abweichend auf 50 cm erhöht (siehe Tabelle 3.3-2) und keine Erntebonitur durchgeführt.

Tab. 3.3-1: Übersicht über die durchgeführten Freilandversuche 2002-2004

Versuchs- zeitraum	Beginn	Ende	Dauer in Wochen	Verwendung von Mulchfolien/Flachfolien
Frühjahr 2002	März 2002	Juni 2002	8	Ja/ Ja, für 4 Wochen
Sommer 2002	August 2002	Oktober 2002	8	Ja/ Nein
2003	Mai 2003	Juni 2003	8	Ja/ Ja, für 4 Wochen
2004	April 2004	Juni 2004	8	Ja/ Ja, für 4 Wochen
Klima- versuch 2004	August 2004		1	Ja/ Ja

Tab. 3.3-2: Die pflanzenbaulichen Angaben der vier Freilandversuche

	Frühjahr 2002	Sommer 2002	Frühjahr 2003	Frühjahr 2004
Kultur	Kopfsalat <i>Lactuca sativa</i> "Nadine RZ"	Kopfsalat <i>Lactuca sativa</i> "Nadine RZ"	Einlegegurke <i>Cucumis sativus</i> "Melody RZ"	Kopfsalat <i>Lactuca sativa</i> "Nadine RZ"
Ausbringung	Jungpflanzen	Jungpflanzen	Direktsaat	Jungpflanzen
Beetlänge und -breite [m]	20/1	20/1	20/1	20/1
Abstand zwischen den Beeten [cm]	40	40	40	50
Reihen / Beet	3	3	1	3
Pflanzabstand [cm]	30	30	30	30
Pflanzen/Beet	ca. 165	ca. 165	ca. 60	ca. 165

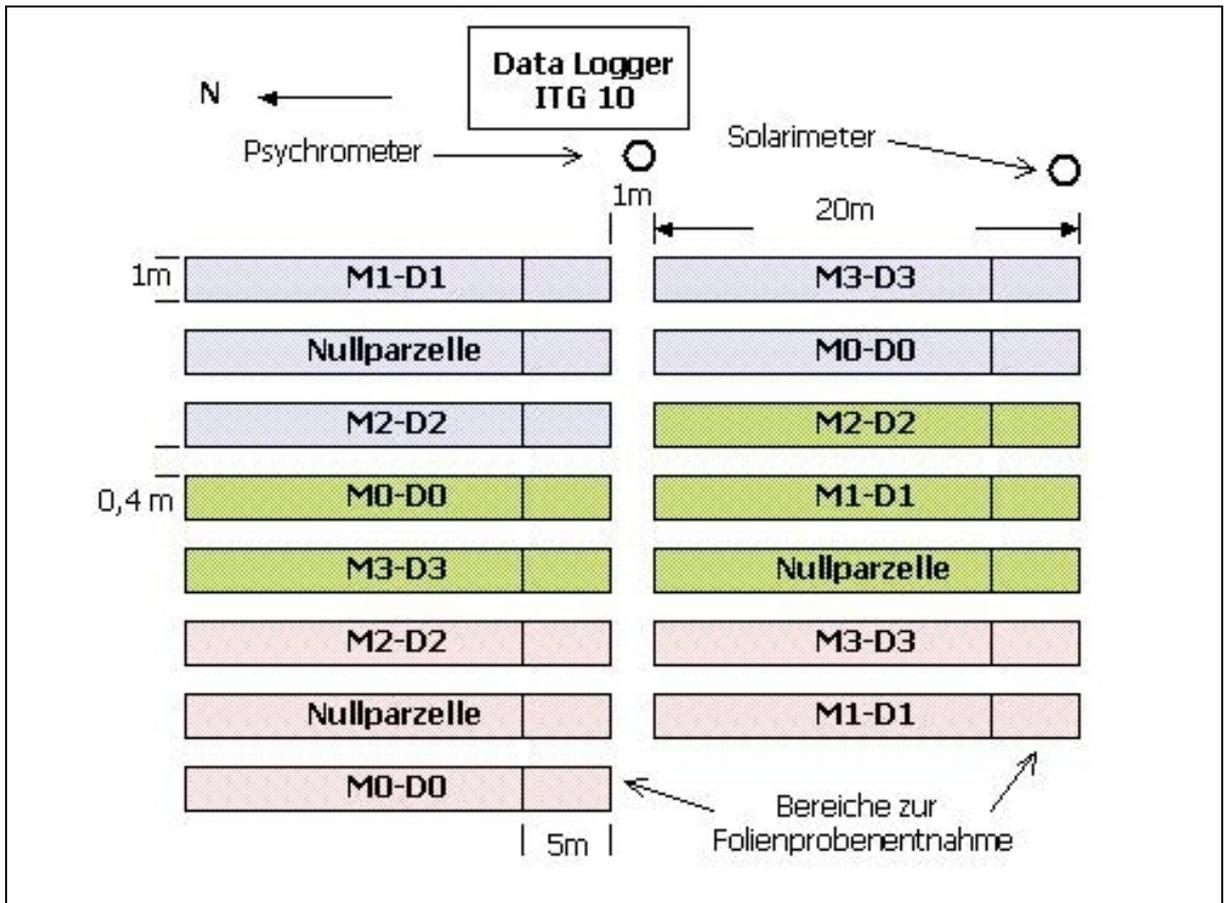


Abb. 3.3-1: Schematische Darstellung eines Freilandversuchsaufbaues



Abb. 3.3-2: Ansicht vom ersten Freilandversuch im Mai 2002 in Blickrichtung Süden

Versuchsdurchführung

Vor Versuchsbeginn wurde der N_{\min} -Gehalt des Bodens bis in 60 cm Tiefe bestimmt und der Boden nachfolgend kulturspezifisch mit Kalkammonsalpeter (NPK: 27,5+0+0) aufgedüngt. Die Fläche wurde vorbereitend gepflügt und gestriegelt, kurz vor Versuchsaufbau wurde zur Pflanzbeetbereitung gefräst.

Die Mulchfolien wurden per Hand verlegt und zur Pflanzung oder Aussaat der Kultur gelocht. Nach der Pflanzung und der Installation der Messfühler wurden die Beete mit den dazugehörigen Flachfolien abgedeckt.

Zur Bewässerung wurden je zwei T-Tape TSX 30-Tropf-Schläuche (T-Systems, USA), mit einem Tropferabstand von 30 cm unter den Mulchfolien verlegt und am Kopfende der Versuchsfläche an ein Verteilerrohr angeschlossen. Die Bewässerung wurde manuell gestartet, sobald auf einer Parzelle der gemessene Saugspannungswert unter -250 hPa lag (entsprechend KRUG et al., 1991). Im Versuchsjahr 2004 wurde die Bewässerung bei einem durch die FDR-Sonden ermittelten Messwert von ~ 20 Vol.-% manuell aktiviert.

Etwa nach der Hälfte der Versuchsdauer wurden die Flachfolien in Abhängigkeit von der Witterung von den Parzellen entfernt und auf den Zwischenwegen gelagert (siehe Tabelle 3.3-1).

Zu Versuchsende wurden bei den Kopfsalatkulturen randomisiert 25 Pflanzen (Frühjahr 2002), bzw. 20 Pflanzen (2004) pro Parzelle ausgewählt, am Wurzelhals abgeschnitten und die Frischmasse durch Wägung bestimmt. Bei der zweiten Kopfsalatkultur 2002 wurde aufgrund von Pflanzenkrankheiten keine Ernte durchgeführt, ebenso wie bei der Einlegegurkenkultur 2003, wo übermäßige Pflanzenausfälle aufgetreten waren.

Messtechnik

Für jedes Beet wurde ein Bodentemperaturfühler in 30 cm Bodentiefe und ein Lufttemperaturfühler 20 cm oberhalb der Mulchfolie installiert.

Zur Ermittlung der Klimawerte zwischen Mulchfolie und Flachfolie wurde in einem Block pro Versuch ein Mini-Psychrometer auf jeder Parzelle aufgestellt. Ab 2003 wurde unter jede Flachfolienvariante zusätzlich ein Solarimeter installiert, um die Einstrahlung unter den verschiedenen Flachfolien zu dokumentieren. Zum Vergleich waren auf der Versuchsfläche ein Solarimeter 1 m über dem Boden und ein Psychrometer am Rand

der Versuchsfläche in 50 cm Höhe aufgestellt worden. Die Niederschlagsmenge im Versuchszeitraum wurde von der Wetterstation des Institutes für Gemüsebau am nördlichen Rand der Versuchsfläche gemessen. Die Saugspannung, bzw. die Bodenfeuchte wurde durch Tensiometer oder ab 2004 mittels FDR-Sonden ermittelt. Die für die Datenaufzeichnung verwendeten Datenlogger ITG 10 befanden sich in einem Bauwagen mit Stromanschluss am östlichen Rand der Versuchsfläche (siehe Abb. 3.3-1 und 3.3-2).

3.3.2 Laborversuche

3.3.2.1 Wasserdampfdurchlässigkeit

Aufbau

Zur Untersuchung der Wasserdampfdurchlässigkeit (WDD) wurde ein Versuchskonzept zur Simulation von freilandähnlichen Bedingungen entwickelt. Dazu wurden in einem Kühlraum des BGT auf einem Tisch (1,4 m x 1,4 m) in der Raummitte acht digitale Waagen der Typenbezeichnung Sartorius LC 6201 (Sartorius AG Göttingen) aufgestellt und mit dem Datenerfassungssystem ITG 10 verbunden. Der Tisch wurde von vier 500 W Halogen-Scheinwerfern ausgeleuchtet, die in einer Höhe von 1,10 m oberhalb der Tischkante aufgehängt waren (siehe Abbildung 3.3-3).

Kernstück der Versuche war eine rechteckige Kunststoffschale (32,5 cm * 25,5 cm * 6 cm). Ihre Seitenwände wurden mit einem Rahmen aus 4 cm Styrodur[®] isoliert, mit dem die zu untersuchende Folienprobe gleichzeitig über die Schalenränder gespannt und so luftdicht verschlossen werden konnte.

Der Innenraum der Schale wurde mittels Peltier-Elementen auf konstant 14 °C gehalten. Diese waren unter einer Kupferplatte befestigt und mit vier CPU-Kühlern verbunden. Die Kunststoffschalen wurden auf die mit Wärmeleitpaste bestrichene Oberseite der Kupferplatte gestellt, um so eine gute Wärmeübertragung zu gewährleisten. Je ein Thermoelement wurde am unteren Rand jeder Kunststoffschale zur Temperaturkontrolle und -regelung mit Wärmeleitpaste befestigt und mit dem Datalogger verbunden.

Im Versuchsraum wurden zwei Psychrometer zur Messung der Luftzustände und ein Solarimeter zur Kontrolle der Lampenfunktion installiert.

Für die Datenerfassung wurden zwei Datalogger eingesetzt. Einer speicherte die von den Waagen ermittelten Ergebnisse, ein weiterer übernahm die Temperaturregelung der Peltier-Elemente und sicherte die Psychrometerwerte. Die Datalogger speicherten alle 5 Minuten die Mittelwerte der alle 30 Sekunden durchgeführten Messungen ab.

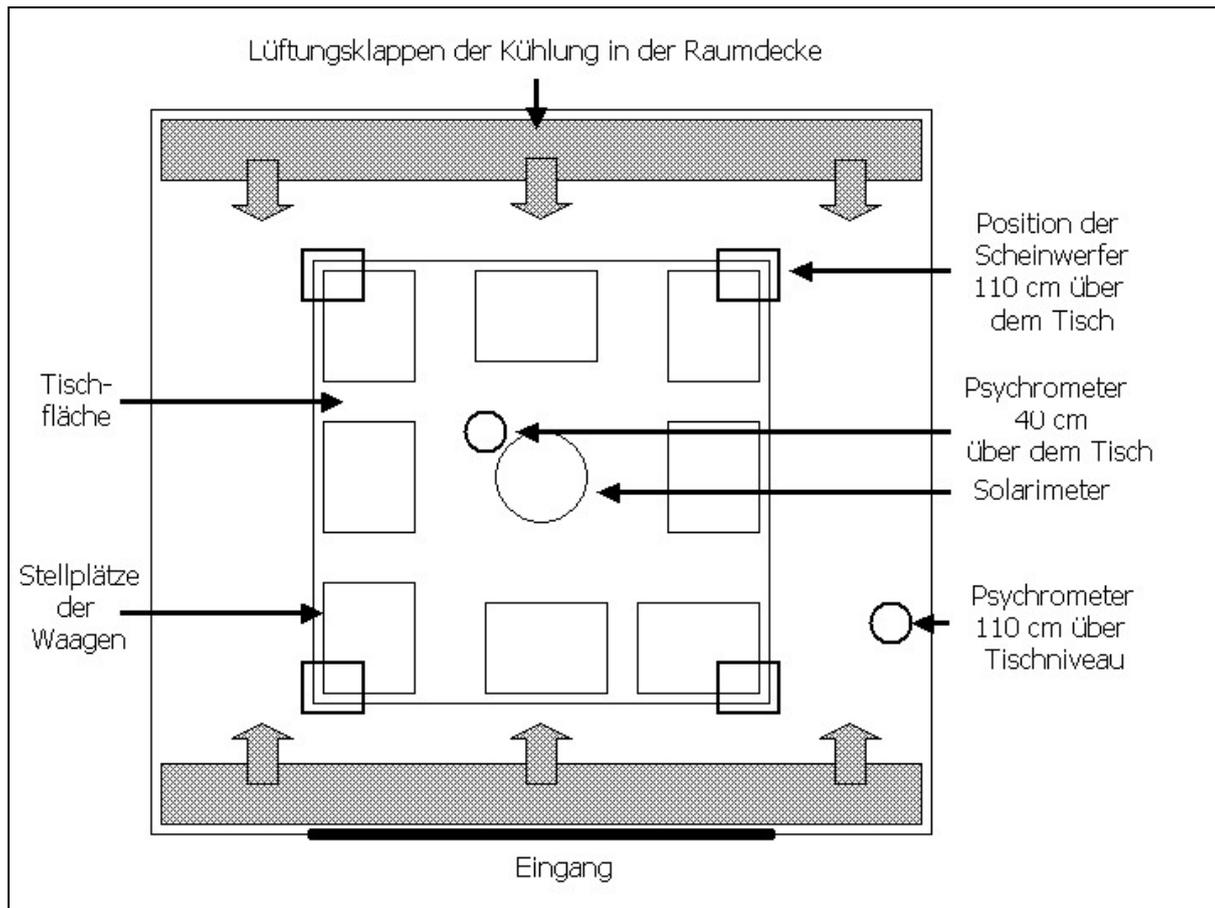


Abb.3.3-3: Schematische Darstellung vom Versuchsaufbau zur Messung der Wasserdampfdurchlässigkeit im Kühlraum des BGT

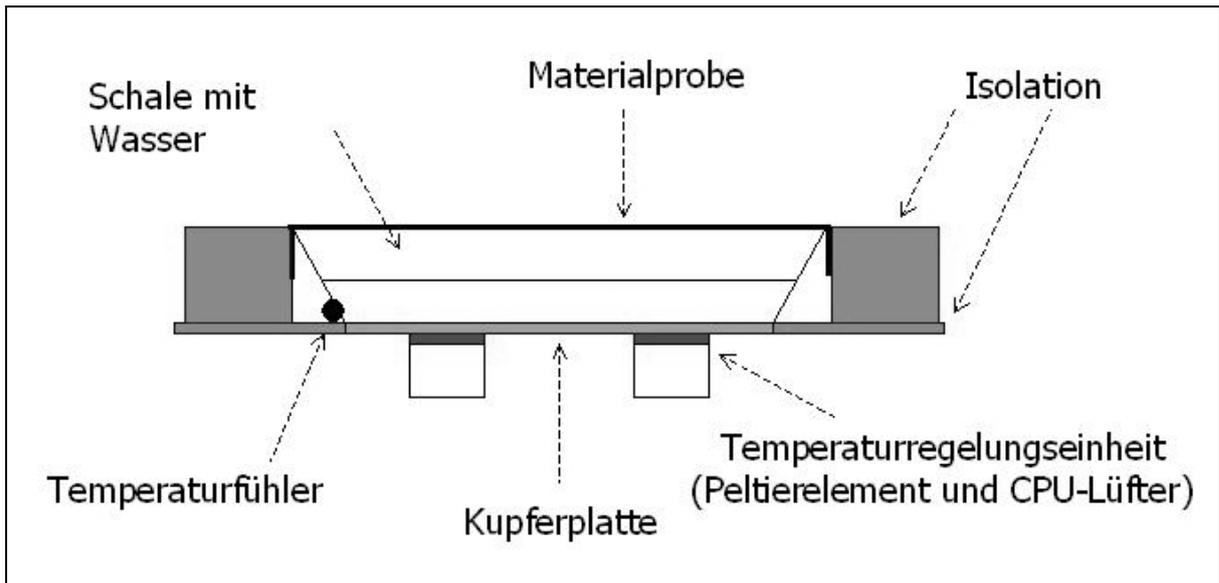


Abb.3.3-4: Schematische Darstellung vom Waagenaufbau mit eingespannter Folienprobe zur Messung der Wasserdampfdurchlässigkeit

Durchführung

Das Ein- und Ausschalten der Lampen wurde mittels Zeitschaltuhren realisiert. Um 8 Uhr wurden die Lampen für 8 Stunden aktiviert und um 16 Uhr wieder ausgeschaltet. Die Kühlung der Raumtemperatur erfolgte über eine Kühlanlage und wurde entsprechend der Lampenschaltung manuell auf eine Tageshöchsttemperatur von 30 °C und eine Nachttemperatur von 10 °C eingestellt. Jeder Versuch dauerte 7 Tage, wovon jeweils 5 Tage im o.g. Tag und Nacht-Rhythmus geschaltet wurden und die verbleibenden Tage ohne Beleuchtung mit 10 °C gefahren wurden.

Welche Folienvarianten in den Versuchen untersucht wurden, kann aus der Tabelle 3.3-3 entnommen werden. In jedem Versuch wurden 7 Folienvarianten, davon eine Polyethylenvariante und eine Nullvariante ohne Folienabdeckung, miteinander verglichen.

Eine weitere Waage war mit dem Aufbau zur Temperaturregelung und mit einer Masse von 1000 g beladen. Hiermit sollte der Einfluß von Luftzirkulation durch die Kühlung, bzw. der Temperatureinfluss auf die Waagen dokumentiert werden. Die Peltier-Elemente und die CPU-Lüfter waren in diesem Fall nicht in Betrieb.

Vor Versuchsbeginn wurde der Aufbau inklusive Folienvariante auf die jeweilige Waage gestellt und tariert. Anschliessend wurden ca. 1000 ml destilliertes Wasser in die Schale

gefüllt, diese mit der Folie bedeckt und durch den isolierenden Styrodur[®]-Rahmen verschlossen.

Tab. 3.3-3: Untersuchte Folienvarianten der fünf Versuche zur Messung der Wasserdampfdurchlässigkeit

	Waage 1	Waage 2	Waage 3	Waage 4	Waage 5	Waage 6	Waage 7	Waage 8
25.07.05 Versuch 1	M4-NF803/P-15b-03	M5-NF01U/P-15b-03	M2-NF01U/P-20b-02	M3-NF01U/P-H-25b-02	Masse 1000 g	M1-NF803/P-20-02	M0-LLDPE-20b-03	Ohne Folie
01.08.05 Versuch 2	M4-NF803/P-15b-03	M9-NF803/P-20c-04	M8-NF01U/P-12b-04	M6-NF01U/P-20b-03	Masse 1000 g	M10-NF803/P-15b-04	M0-LLDPE-20b-03	Ohne Folie
09.08.05 Versuch 3	D1-NF803-20-02	D4-NF803-15-03	D7-NF803-12-04	D9-NF803-10-04	Masse 1000 g	D10-NF803-30-04	D0-EVA-50s-03	Ohne Folie
16.08.05 Versuch 4	D1-NF803-20-02	D6-NF803-12-03 Gelocht 12 mm Ø, 8 Löcher	D8-NF01U-12-04, Gelocht 12 mm Ø, 8 Löcher	D5-NF01U-20-03	Masse 1000 g	D8-NF01U-12-04	D0-EVA-50s-03	Ohne Folie
25.08.05 Versuch 5	D0-EVA-50s-03 Gelocht, 12 mm Ø, 8 Löcher	D6-NF 803-12-03 Gelocht, 12 mm Ø, 8 Löcher			Masse 1000 g	D8-NF 01U-12-04	D0-EVA-50s-03	Ohne Folie

Auswertung

Zuerst wurde die Wasserdampfdurchlässigkeit P_{WDD} nach Gleichung 1 berechnet. Dazu wurden für die Zeiteinheit T zwei Zeitpunkte (8 Uhr und 18 Uhr) eines Messtages zur Definition von Tag- und Nachtphase festgelegt. Aufgrund von temperatur- und luftzirkulationsabhängigen Messungengenauigkeiten war es notwendig, das Ende der Tagphase zwei Stunden nach Abschalten der Beleuchtung und Aktivierung der Kühlung zu legen. Der Masseverlust Δm [g] für die Tagphase (Δm_D) und Nachtphase (Δm_N) wurde nach den Gleichungen 2 und 3 aus den Werten errechnet, die zu diesen Zeitpunkten durch Wägung bestimmt worden waren.

Die Wasserdampfdurchlässigkeit P_{WDD} berechnet sich mittels folgender allgemeiner Gleichung nach DIN 53122 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2001):

$$P_{WDD} = \frac{24}{T} * \frac{\Delta m}{A} * 10^4 \quad [g*(m^2*24 h)^{-1}] \quad (1)$$

P_{WDD} = Wasserdampfdurchlässigkeit $[g*(m^2*24 h)^{-1}]$

Δm = Massendifferenz zweier aufeinander folgenden Wägungen $[g]$

A = Fläche der Probe $[cm^2]$

T = Zeitspanne zwischen den Wägungen $[24 h]$

Der Masseverlust $\Delta mD [g*(10 h * 828,75 cm^2)^{-1}]$ für die Tagphase berechnet sich folgendermaßen:

$$\Delta mD = m_{8 Uhr} - m_{18 Uhr} \quad [g*(10 h * 828,75 cm^2)^{-1}] \quad (2)$$

ΔmD = Masseverlust während der Tagphase $[g*(10 h * 828,75 cm^2)^{-1}]$

$m_{8 Uhr}$ = Masse um 8 Uhr des Messtages $[g]$

$m_{18 Uhr}$ = Masse um 18 Uhr des Messtages $[g]$

Der Masseverlust $\Delta mN [g*(14 h * 828,75 cm^2)^{-1}]$ für die Nachtphase berechnet sich folgendermaßen:

$$\Delta mN = m_{18 Uhr} - m_{8 UhrFT} \quad [g*(14 h * 828,75 cm^2)^{-1}] \quad (3)$$

ΔmN = Masseverlust in der Nachtphase $[g*(14 h * 828,75 cm^2)^{-1}]$

$m_{18 Uhr}$ = Masse um 18 Uhr des Messtages $[g]$

$m_{8 UhrFT}$ = Masse um 8 Uhr des folgenden Messtages $[g]$

Anschließend erfolgte für die Tag und Nachtphasen über die Berechnung der Verluste pro Stunde die Bestimmung der Verluste pro 24 h. Im letzten Schritt wurden die Ergebnisse, die sich auf die Fläche der Versuchsschale ($828,75 cm^2$) bezogen, auf die Fläche von $1 m^2$ hochgerechnet.

Die Ergebnisse der Wasserdampfdurchlässigkeit P_{WDD} waren die Grundlage zur Berechnung von Permeationskoeffizienten derjenigen Faktoren, die den Durchtritt von Wasserdampf durch die Versuchsfolien beeinflussen könnten. Dazu wurde angenommen, dass sich in der Schale unterhalb der Folie, entsprechend der

Schaleninnentemperatur, ein mit Wasserdampf gesättigter Luftzustand einstellt. Weiterhin wurde angenommen, dass die Permeation von Wasserdampf durch trennende Membranen von Gradienten der Temperatur (Δt) und des Wasserdampfdruckes (ΔPD) zwischen zwei Luftzuständen abhängt.

Die Werte der Messvarianten und der Raumluft (t [$^{\circ}\text{C}$] und PD [hPa]) wurden für die Tag- und Nachtphasen aus dem Durchschnitt der jeweiligen Stundenmittelwerte bestimmt und dann miteinander verrechnet (siehe Gleichungen 4 und 5). Für die Berechnung der Permeationskoeffizienten für beide Luftzustände wurden die Gleichungen 6 und 7 herangezogen. Für die Berechnung der Temperaturdifferenz Δt [K] galt es zu berücksichtigen, dass durch die Temperaturregelungseinheit in der Schale geringere Temperaturen zu verzeichnen waren, als in der umgebenden Raumluft. Um negative Werte zu vermeiden, wurden bei den Berechnungen der Temperaturdifferenzen die absoluten Werte benutzt.

Die Berechnung der Temperaturdifferenz Δt [K] zwischen dem Waagenaufbau und der Umgebungsluft wurde folgendermaßen durchgeführt:

$$\Delta t = \left| t_{\text{Variante}} - t_{\text{Umgebung}} \right| \quad [\text{K}] \quad (4)$$

Δt = Temperaturdifferenz zwischen Waagenaufbau und Umgebungsluft [K]

t_{Variante} = Schaleninnentemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

t_{Umgebung} = Temperatur der Umgebungsluft [$^{\circ}\text{C}$]

Die Wasserdampfdruckdifferenz zwischen dem Waagenaufbau und der Umgebungsluft ΔPD [hPa] berechnet sich folgendermaßen:

$$\Delta PD = PD_{\text{Variante}} - PD_{\text{Umgebung}} \quad [\text{hPa}] \quad (5)$$

ΔPD = Wasserdampfdruckdifferenz zwischen Schale und Umgebung [hPa]

PD_{Variante} = Wasserdampfdruck in der Schale [hPa]

PD_{Umgebung} = Wasserdampfdruck der Raumluft [hPa]

Der Permeationskoeffizient in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz $P_{WD}(\Delta t)$ [$\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot \text{K})^{-1}$] berechnet sich folgendermaßen:

$$P_{WD}(\Delta t) = \frac{P_{WDD \text{ Tag / Nacht}}}{\Delta t} \quad [\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot \text{K})^{-1}] \quad (6)$$

Der Permeationskoeffizient in Abhängigkeit vom Wasserdampfdruckdifferenz $P_{WD}(\Delta PD)$ [$\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot \text{hPa})^{-1}$] berechnet sich folgendermaßen:

$$P_{WD}(\Delta PD) = \frac{P_{WDD \text{ Tag / Nacht}}}{\Delta PD} \quad [\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot \text{hPa})^{-1}] \quad (7)$$

Zusätzlich kann die Materialdicke und auch die Materialart die WDD von Folien beeinflussen. Der Permeationskoeffizient in Abhängigkeit von der Materialdicke $P_{WD}(\mu\text{m})$ [$\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot \mu\text{m})^{-1}$] wurde für jede verwendete Folie nach folgender Gleichung berechnet:

$$P_{WD}(\mu\text{m}) = \frac{P_{WDD \text{ Tag / Nacht}}}{FD} \quad [\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot \mu\text{m})^{-1}] \quad (8)$$

FD = Foliendicke [μm]

Die errechneten Ergebnisse jeder Versuchsvariante für die WDD und die Permeationskoeffizienten wurden als Mittelwert jeweils für die Tag- und Nachtphase dargestellt. Zusätzlich wurden die Permeationskoeffizienten mit der jeweiligen Materialdicke in Beziehung gesetzt und mittels einer Trendlinie auf funktionellen Zusammenhang überprüft.

3.3.2.2 Transmission

Bei den Untersuchungen zur Transmission von biologisch abbaubaren Folien sollte festgestellt werden, inwieweit sich durch den Gebrauch Veränderungen in der spektralen Durchlässigkeit ergaben.

Dazu wurden im Rahmen der unter Punkt 3.3.1 beschriebenen Freilandversuche nach einem festgelegten Zeitplan von den Versuchsfolien Proben entnommen. Die Entnahme begann direkt vor der Nutzung der Folien im jeweiligen Freilandversuch. In Tabelle 3.3-4 sind die Daten der Probenentnahmen während der Versuchszeiträume aufgelistet.

Tab. 3.3-4: Daten der Probenentnahmen zur Messung der Transmission im Rahmen der Freilandversuche

Probenentnahmen 2002	Probenentnahmen 2003	Probenentnahmen 2004
<u>Erster Versuch</u> 28.03.02; 19.04.02; 02.05.02; 10.05.02; 29.05.02; 05.06.02; 19.06.02	01.04.03; 27.05.03; 30.05.03; 03.06.03; 06.06.03; 13.06.03; 17.06.03; 24.06.03; 01.07.03	25.03.04; 05.04.04; 08.04.04; 13.04.04; 16.04.04; 23.04.04; 30.04.04; 29.05.04
<u>Zweiter Versuch:</u> 02.06.02; 06.09.02; 18.09.02; 02.10.02; 16.10.02; 01.11.02		

Die Folienproben wurden nach ihrer Entnahme auf der Freilandversuchsfläche mit Wasser gereinigt, getrocknet und bis zur Messung trocken gelagert. Unmittelbar vor der Messung wurde ein 5 x 5 cm großes Stück aus der Gesamtprobe geschnitten und ein weiteres Mal von beiden Seiten mit Ethanol und Aceton gesäubert. Die Messungen wurden mittels des unter Punkt 3.2.4 beschriebenen Spektralphotometers Lambda 900 (Perkin Elmer, USA) durchgeführt.

Als Messbereich wurde der Wellenlängenbereich von 250 nm bis 2500 nm eingestellt, der im Abstand von 10 nm gemessen wurde. Die so ermittelten Meßwerte wurden in den pflanzenbaulich relevanten Wellenlängenbereichen (siehe Tabelle 3.3-5) aufsummiert und mit der energetischen Spektralverteilung der Globalstrahlung bewertet (VON ELSNER, 2004a).

Tab. 3.3-5: Pflanzenbaulich relevante Wellenlängenbereiche für die Auswertung der Transmissionsmessungen, verändert nach VON ELSNER (2004a)

Ultraviolette Strahlung (UV)	300 nm - 400 nm
Photosynthetisch aktive Strahlung (PAR)	400 nm - 700 nm
Nahe Infrarot Strahlung (NIR)	700 nm - 2300 nm
Global Strahlung (GR)	300 nm - 2300 nm

3.3.2.3 Attenuierte Totalreflexion

Durchführung

Bei der Analyse der Folienoberflächen mittels ATR sollte festgestellt werden, inwieweit sich deren molekulare Zusammensetzung durch Bewitterung oder Kompostierung im Laufe der Expositionszeit verändert und ob diese Messmethode zur Bewertung des Abbaugrades der Versuchsfolien herangezogen werden kann. Dazu wurden zwei Versuche mit unbenutzten Folien des Freilandversuches 2003 angesetzt. Folienstücke von jeder Variante wurden sowohl im Freiland in Bewitterungsrahmen gespannt, als auch in Substratkisten mit Boden von der Freilandversuchsfläche unter kontrollierten Bedingungen kompostiert. Die Probenentnahme mit zwei Wiederholungen pro Entnahmetermin begann eine Woche nach Versuchsbeginn und ist in Tabelle 3.3-6 näher erläutert.

Eine weitere Untersuchung sollte den Einfluß einer Bedeckung durch Kulturpflanzen auf die Folienoberfläche klären. Dazu wurden nach Beendigung des Freilandversuches 2003 von den Mulchfolien M4 und M5 auf dem Versuchsfeld Proben entnommen, die entweder von einer Kulturpflanze bedeckt oder der Globalstrahlung ausgesetzt waren. Zusätzlich wurde die Folienunterseite untersucht. Als Referenz wurden Messungen an unbenutzten Folienstücken aller Varianten vorgenommen.

Bei jeder Probeentnahme wurden die exponierten Seiten mit Aufklebern markiert. Die Folienproben wurden nach der Probenentnahme mit destilliertem Wasser gereinigt und anschliessend getrocknet. Vor den Messungen wurde eine erneute Reinigung mit Alkohol und Aceton vorgenommen, um eine weitgehende Schmutzfreiheit der Folienoberflächen zu erreichen.

Tab. 3.3-6: Herstellung der Proben für die Untersuchungen der Folienoberflächen durch Attenuierte Totalreflexion

	Folienbezeichnung	Entnahmedatum	Bedingungen
Unbenutzte Folienstücke	M4-NF803/P-15b-03 M5-NF01U/P-15b-03 D4-NF803-15-03 D5-NF01U-20-03 M0-LLDPE-20b-03	nach Anlieferung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entnahme direkt von der Folienrolle ▪ 2 Wiederholungen
Bewitterung	D0-EVA-50s-03	09.09.03, 16.09.03, 23.09.03, 30.09.03, 07.10.03, 05.11.03, 21.11.03	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bewitterungsrahmen im Freiland ▪ 2 Wiederholungen
Kompostierung		05.09.03, 12.09.03, 19.09.03, 26.09.03 anschließend keine verwendbaren Proben mehr vorhanden	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lagerung in Kompostkisten ▪ Temperatur: 18 °C ▪ konstante Bodenfeuchte ▪ 2 Wiederholungen
Feldversuch	M4-NF803/P-15b-03 M5-NF01U/P-15b-03	Einmalige Entnahme nach Versuchsende am 29.07.2003	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2 Wiederholungen ▪ Folienoberseite von Kulturpflanze bedeckt ▪ unbedeckte Folienoberseite ▪ Folienunterseite

Auswertung

Die vom Messgerät ausgegebenen Ergebnisse wurden, wie in Abbildung 3.3-5 dargestellt, in Transmission [%] pro Wellenzahl [cm^{-1}] dargestellt. Die Wellenzahl (wz) gibt per Definition an, wieviele Wellen (jeweils Wellenberg und Wellental) auf einer Strecke von einem Zentimeter gezählt werden können. Die Einheiten von Wellenlänge λ und Wellenzahl wz lassen sich wie folgt umrechnen (GOTTWALD et al., 1997):

$$wz = 10000 / \lambda \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (9)$$

$$wz = \text{Wellenzahl} \quad [\text{cm}^{-1}]$$

$$\lambda = \text{Wellenlänge} \quad [\mu\text{m}]$$

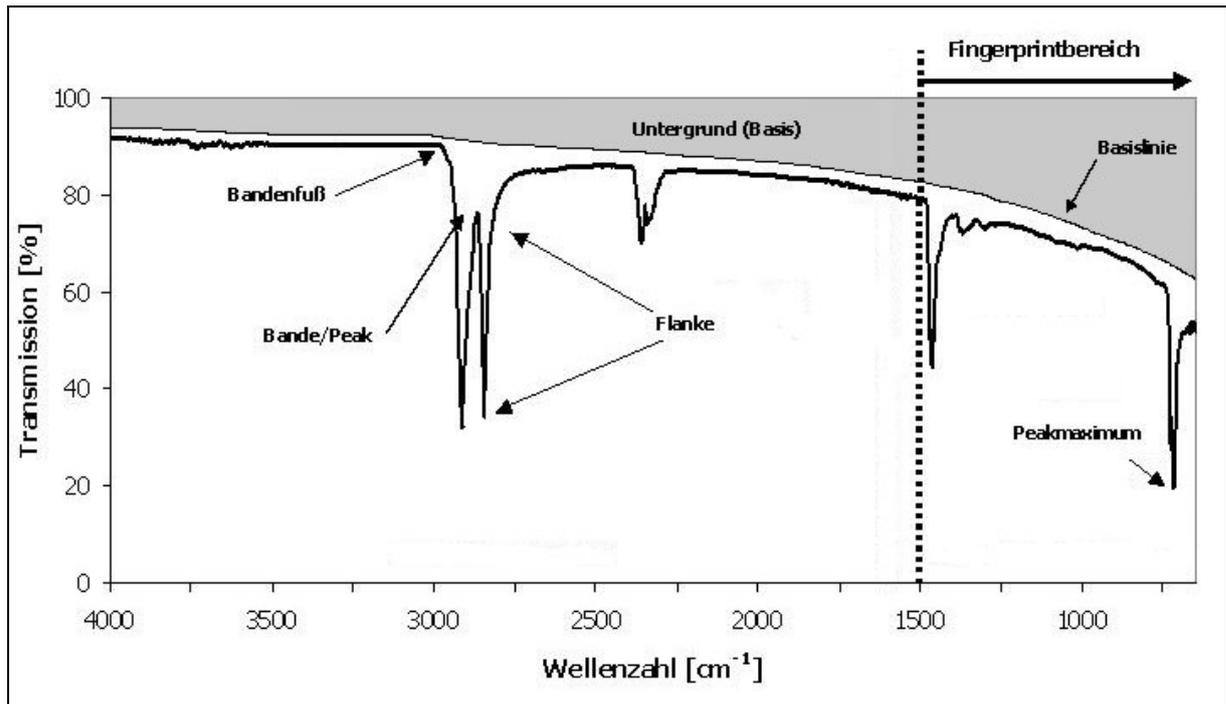


Abb. 3.3-5: Schematische Darstellung von einem durch Attenuierte Totalreflexion erzeugten Infrarot-Reflexions-Spektrum (verändert nach GOTTWALD et al., 1997)

In der Regel kann in einem IR-Spektrum eine Basislinie erkannt werden, die etwa waagrecht im Bereich zwischen ca. 80 % - 100 % verläuft. Je weiter die Kurve des IR-Spektrums in Richtung 0 % Transmission verläuft, je größer also die Ausschläge nach unten sind, desto stärker wurde die IR-Strahlung von den Molekülen absorbiert. So entstehen im Verlauf der Wellenzahlen unterschiedlich starke und breite Kurven, die man Banden oder Peaks nennt.

Je größer die Bindungsstärke zwischen zwei Atomen ist, um so höher liegt deren Schwingungsfrequenz. Am Beispiel von zweiatomigen Kohlenstoffmolekülen bedeutet das, dass eine C-Dreifachbindung im Wellenzahlenbereich von $wz=2200\text{ cm}^{-1}$, eine C-Doppelbindung bei $wz=1640\text{ cm}^{-1}$ und eine C-Einfachbindung bei $wz=1000\text{ cm}^{-1}$ zum Schwingen angeregt wird, also IR-Strahlung absorbiert (GOTTWALD et al., 1997). Einige weitere Absorptionsbereiche sind in Tabelle 3.3-7 zusammenfassend dargestellt.

Für die Auswertung eines Spektrums sind besonders die Lage der Banden, ihre Intensitäten und Formen von Bedeutung. Wie in Abbildung 3.3-5 dargestellt, liegen im Bereich von Wellenzahlen zwischen 1500 cm^{-1} und 600 cm^{-1} die Banden, die das Molekül als Ganzes charakterisieren, weshalb dieser Bereich auch „Fingerprint-Bereich“ genannt wird. Hier ist eine Stoffidentifikation mittels Vergleichsspektren möglich. Die

dort vorkommenden Banden basieren auf sogenannten Deformationsschwingungen. Oberhalb vom $\nu=1500\text{ cm}^{-1}$ befinden sich Absorptionsbanden, die auf funktionelle Gruppen zurückzuführen sind. Im Bereich zwischen $1500\text{ cm}^{-1} - 4000\text{ cm}^{-1}$ bezeichnet man den Schwingungstyp als Valenzschwingungen eines Moleküls. In Tabelle 3.3-7 sind einige Beispiele für Absorptionsbereiche aufgeführt.

Tab. 3.3-7: Absorptionsbereiche der Infrarotspektroskopie und deren Interpretation nach STUART et al. (1996)

Absorptionsbereiche	X-H-Stretching Region	Dreifachbindungen	Doppelbindungen	Fingerprint-Bereich
Wellenzahl-Bereiche [cm^{-1}]	4000 - 2500	2500 – 2000	2000 - 1500	1500 – 600
Typische Schwingungsform	Valenzschwingungen			Deformationsschwingungen Kombinationsschwingungen
Beispiele [cm^{-1}]	3700 - 3600 O-H 3400 - 3300 N-H 3000 - 2850 C-H 2965 - 2880 CH ₃ -Gruppe 2930 – 2860 CH ₂ -Gruppe	2300 – 2050 C≡C 2300 – 2200 C≡N	Um 1650 C=C 1830 – 1650 C=O	

Die Lagen der einzelnen Banden im Spektrum ist stark von den gegenseitigen Wechselwirkungen der Moleküle des jeweiligen Materials untereinander abhängig, weswegen eine stoffliche Auswertung der Folienproben in dieser Arbeit nicht ausführlich vorgenommen werden soll.

3.4 Statistische Auswertung

Die statistische Datenverarbeitung wurde mit der freien Statistik-Software „R“ durchgeführt (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2007). Bei der Auswertung der Ergebnisse der Freilandversuche wurden die Temperaturkurven jedes einzelnen Messfühlers über den jeweiligen Median zusammengefasst. Anschliessend wurde ein ANOVA-F-Test, sowie ein

multipler Mittelwertsvergleich nach Tukey durchgeführt. Die Auswertung der Pflanzengewichte erfolgte mit Hilfe eines linearen gemischten Modells (BATES et al., 2007). Die Irrtumswahrscheinlichkeit betrug dabei 5 %. Die Messergebnisse der Transmission wurden arcus-sinus transformiert und anschließend mit einem auf die Daten angepassten gemischten Modell und einer ANOVA untersucht.

In den Untersuchungen zur Wasserdampfdurchlässigkeit und ATR war eine biometrische Auswertung mangels Wiederholungen nicht möglich. Die Berechnung der deskriptiven Statistik wurde mit Microsoft Excel durchgeführt. Für die erhobenen Versuchsdaten wurden Mittelwerte und Standardabweichungen berechnet.

4 ERGEBNISSE

4.1 Freilandversuche

Zur Beurteilung der Praxistauglichkeit der biologisch abbaubaren Mulch- und Flachfolien wurden im Frühjahr 2002, im Sommer 2002 und in den Jahren 2003 und 2004 in Hannover-Herrenhausen Freilandversuche mit gemüsebaulichen Kulturen durchgeführt. Im Folgenden sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen dargestellt.

4.1.1 Bodentemperatur und Lufttemperatur

Um die Einflüsse der Mulch- und Flachfolien auf die Boden- und Lufttemperaturen zu untersuchen, wurden in den Freilandversuchen 30 cm unterhalb und 20 cm oberhalb der Mulchfolien Thermoelemente zur Temperaturmessung installiert. Dabei sollten vorhandene Unterschiede zwischen den Versuchsvarianten aufgezeigt werden.

Zur Feststellung, inwieweit eine Verwendung von Flachfolien Boden- und Lufttemperaturen beeinflussen kann, wurde zunächst für jede Variante die jeweilige Temperaturdifferenz zur Nullparzelle berechnet. Anschließend wurden für jeden Freilandversuch die Gesamtdatensätze in die Zeiträume mit und ohne Flachfolienabdeckung aufgeteilt, miteinander verglichen und statistisch ausgewertet. Die Ergebnisse sind in den folgenden Abschnitten dargestellt.

In Abbildung 4.1-1 sind die Differenzen der Bodentemperaturen zur Nullparzelle vom Messzeitraum Frühjahr 2002 dargestellt. In der Zeit der Flachfolienverwendung lagen die Bodentemperaturen um 1 K bis 1,5 K signifikant höher, als im Zeitraum ohne Flachfolienverwendung, wo eine Differenz zur Bodentemperatur der Nullparzelle zwischen 0,6 K und 0,9 K gemessen wurde.

Freilandversuch Frühjahr 2002

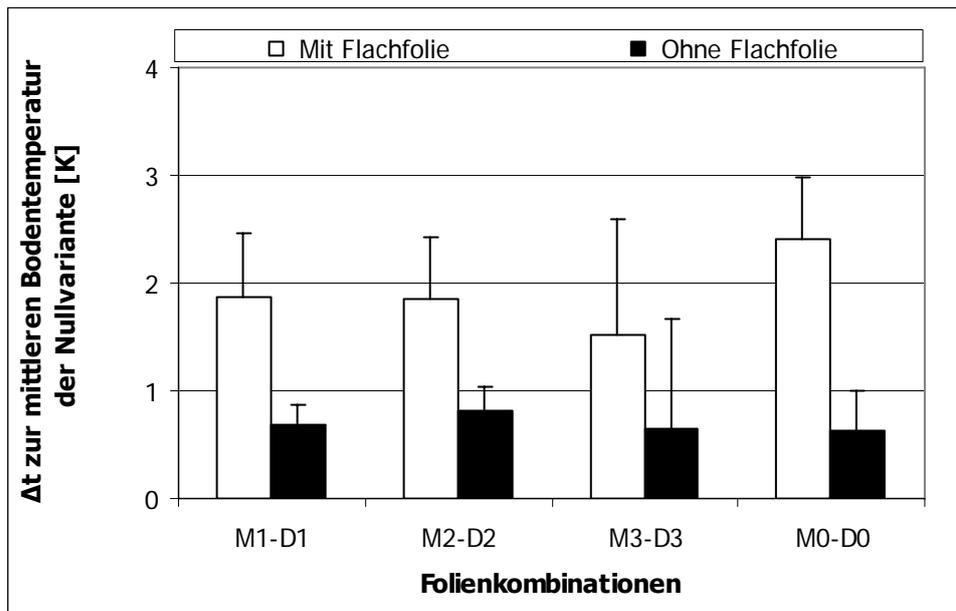


Abb.4.1-1: Differenzen und Standardabweichungen der Bodentemperaturen in 30 cm Tiefe der Folienvarianten mit und ohne Flachfolienbedeckung zur Nullparzelle im Versuchszeitraum Frühjahr 2002

Unter Flachfolie wies die Bodentemperatur bei der Folienkombination M0-D0 die höchsten Werte auf, dabei war der Unterschied zu M3-D3 auch signifikant. In der Zeit ohne Flachfolienbedeckung war eine weitgehende Temperaturgleichheit der Mulchfolienvarianten zu erkennen.

Bei der Messung der Lufttemperaturen (dargestellt in Abb. 4.1-2) wurde im selben Versuchszeitraum ebenfalls ein signifikanter Unterschied zwischen den Phasen mit und ohne Flachfolienanwendung festgestellt.

Die Differenzen zur Nullparzelle lagen unter Flachfolie zwischen 2 K (M2-D2) und knapp unter 1 K (M1-D1). Beide verbleibenden Varianten lagen bei Differenzen von 1,4 K im Mittelfeld. Ohne Flachfolienverwendung wurde bei Mulchfolie M3 eine geringere Lufttemperatur als die der Nullparzelle festgestellt. Die Folienkombinationen M0-D0 und M1-D1 zeigten um ca. 0,2 K höhere Werte als die Nullparzelle. Die höchsten Lufttemperaturdifferenzen lagen bei M2-D2 vor, die sich auch signifikant von M3-D3 unterschied. Auffällig war die hohe Streuung der Messwerte von bis zu 4,5 K, besonders in der Zeit ohne Flachfolienverwendung.

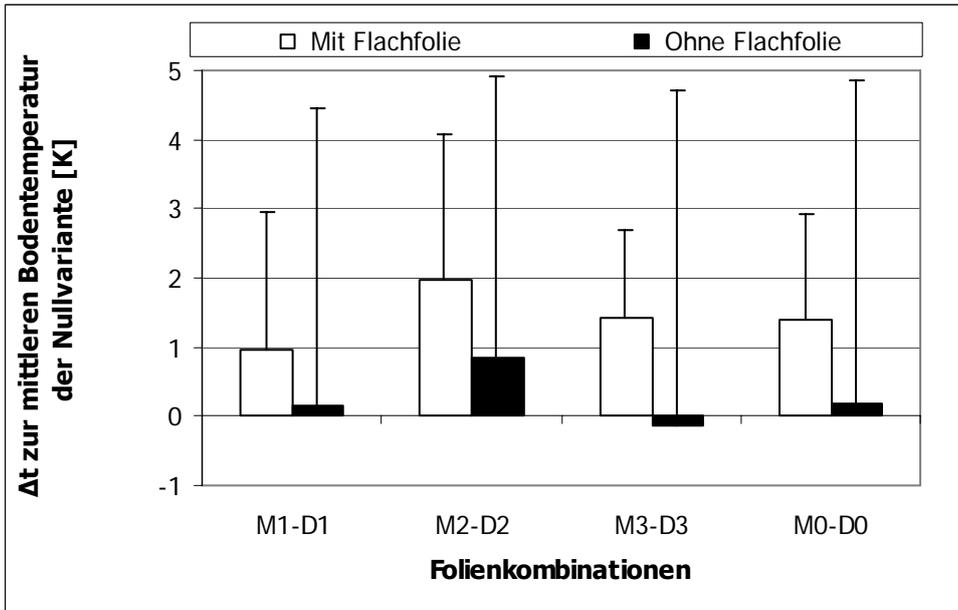


Abb. 4.1-2: Differenzen und Standardabweichungen der Lufttemperaturen der Folienvarianten in 20 cm Höhe mit und ohne Flachfolienbedeckung zur Nullparzelle im Versuchszeitraum Frühjahr 2002

Freilandversuch Sommer 2002

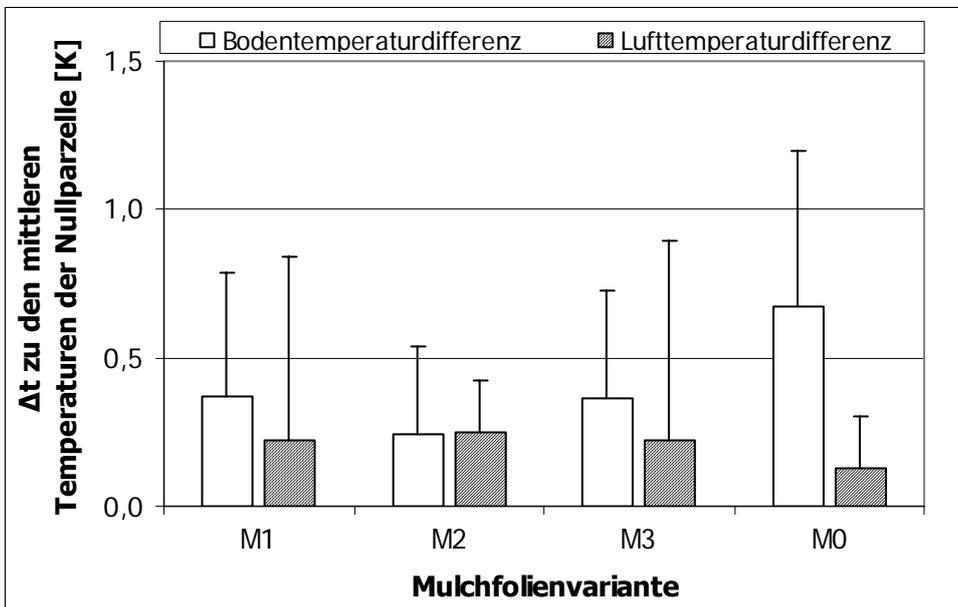


Abb.4.1-3: Temperaturdifferenzen und Standardabweichungen der Boden- und Lufttemperaturen zwischen der Nullvariante und den Mulchfolienvarianten in 30 cm Tiefe bzw. 20 cm Höhe im Versuchszeitraum Sommer 2002

Im Sommersversuch 2002 (Abbildung 4.1-3) wurde keine zusätzliche Flachfolienabdeckung der Parzellen vorgenommen. In Abb. 4.1-3 sind deshalb die Differenzen der Boden- und Lufttemperaturen zur Nullparzelle gemeinsam dargestellt. Bei der Bodentemperatur zeigten die Biofolien im Vergleich zur konventionellen Kontrolle geringere Werte. Dabei war der Unterschied zwischen den Folien M2 und M0 signifikant. Bei der Lufttemperatur wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Folienvarianten festgestellt. Die Temperaturen über den Biofolien lagen geringfügig höher als über der konventionellen Kontrolle.

Freilandversuch 2003

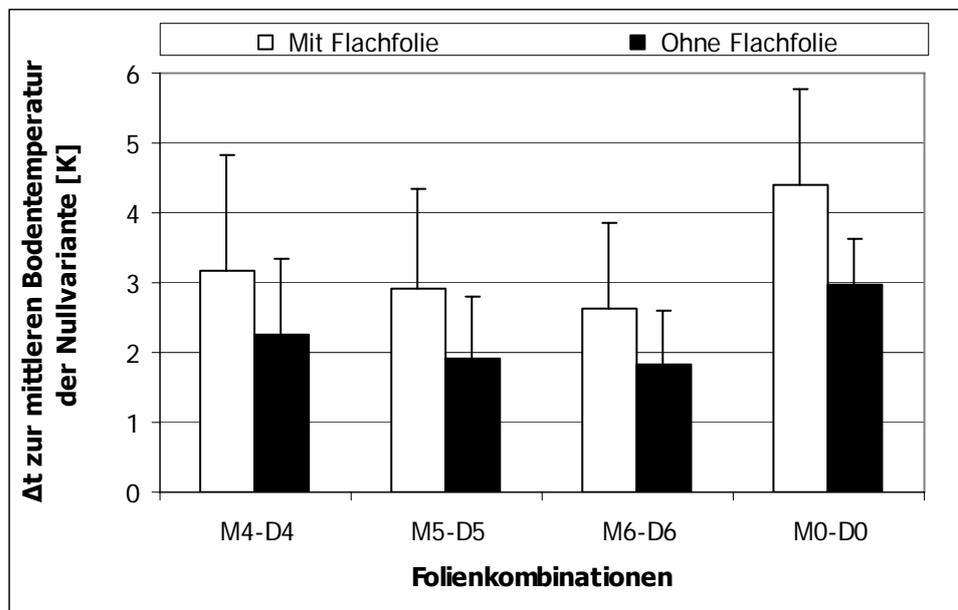


Abb.4.1-4: Differenzen und Standardabweichungen der Bodentemperaturen in 30 cm Tiefe der Folienvarianten mit und ohne Flachfolienbedeckung zur Nullparzelle im Versuchszeitraum 2003

Im Freilandversuch 2003 wurde bei allen Versuchsvarianten eine signifikante Erhöhung der Bodentemperaturen durch die Flachfolien festgestellt. Bei den in Abbildung 4.1-4 dargestellten Differenzen der Bodentemperaturen zur Nullparzelle zeigten die Biofolien in beiden Zeiträumen vergleichbare Werte. Diese lagen mit Flachfolienabdeckung bei ca. 3 K und ohne Flachfolie bei ca. 2 K. Die konventionelle Kontrolle M0 zeigte in beiden Zeiträumen mit 4,5 K (mit Flachfolie), bzw. 3 K (ohne Flachfolie) im Vergleich zu den

Biofolien signifikant höhere Bodentemperaturen. Bezüglich der anderen Freilandversuche wurden in diesem Versuch die größten Bodentemperaturdifferenzen zur Nullparzelle festgestellt.

Die Lufttemperaturdifferenzen des Versuchszeitraumes 2003 sind in Abbildung 4.1-5 dargestellt. Im Gegensatz zu den anderen Freilandversuchen wurden in diesem Messzeitraum signifikant höhere Lufttemperaturen im Zeitraum ohne Flachfolienanwendung festgestellt. Die Folienkombination M5-D5 zeigte mit 0,4 K in beiden Zeiträumen die deutlichste Erhöhung der Lufttemperatur. Die verbleibenden Varianten lagen mit Werten von 0,2 K bis 0,4 K bei Flachfoliennutzung und 0,1 K ohne Flachfolien knapp darunter.

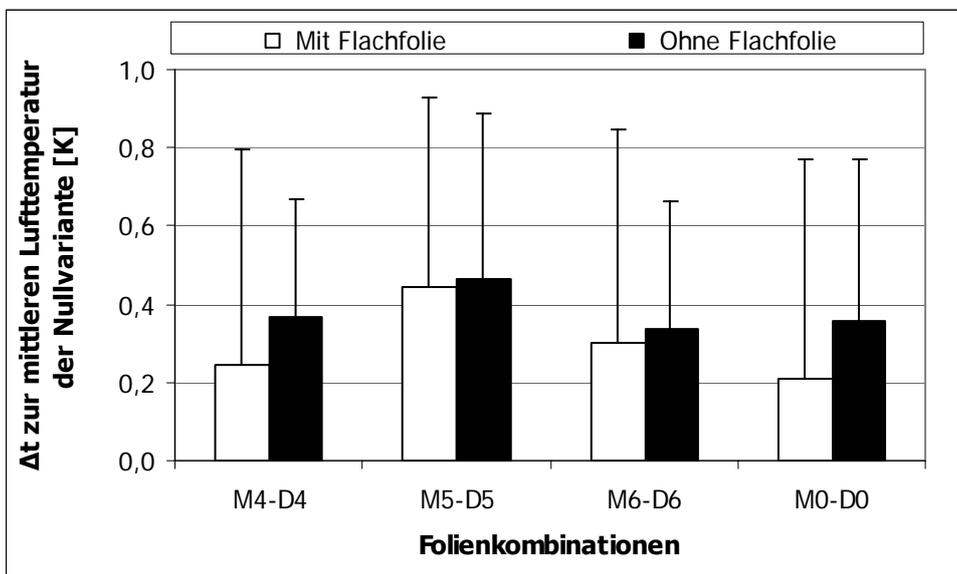


Abb.4.1-5: Differenzen und Standardabweichungen der Lufttemperaturen der Folienvarianten in 20 cm Höhe mit und ohne Flachfolienbedeckung zur Nullparzelle im Versuchszeitraum 2003

Freilandversuch 2004

Der Freilandversuch des Jahres 2004 wurde mit einer größeren Anzahl von Folienkombinationen durchgeführt, als in den vorhergegangenen Versuchen. Aufgrund der unterschiedlichen Zahl der Wiederholungen der einzelnen Parzellen (siehe Anhang Abb. A-1), war keine statistische Auswertung der Folienkombinationen möglich. Es wurde allerdings bei einem Vergleich der Bodentemperaturen unter den Parzellen

während der Zeit der Flachfolienverwendung und danach bei allen Mulchfolienvarianten ohne Berücksichtigung der Flachfolienvariante ein signifikanter Unterschied festgestellt. Bei den in Abb. 4.1-6 dargestellten Differenzen der Bodentemperaturen zur Nullparzelle wurden bei der Folienkombination M9-D0 in beiden Zeiträumen die mit Abstand höchsten Werte festgestellt. Die Mulchfolie M5 zeigte unter konventioneller und bioabbaubarer Abdeckung um 2 K höhere Werte als die Nullparzelle, ebenso die Kombination M9-D6. Bei den verbleibenden Varianten wurden um 1,8 K (M0-D0), bzw. um 1,5 K (M8-D0) geringere Bodentemperaturen gemessen.

Ohne Flachfolie waren zwischen den Biofolien mit 0,3 K bis 0,5 K keine nennenswerten Unterschiede feststellbar, die konventionelle Kontrolle M0 lag mit einer Differenz von 1 K doppelt so hoch wie die meisten bioabbaubaren Varianten außer M9-D0.

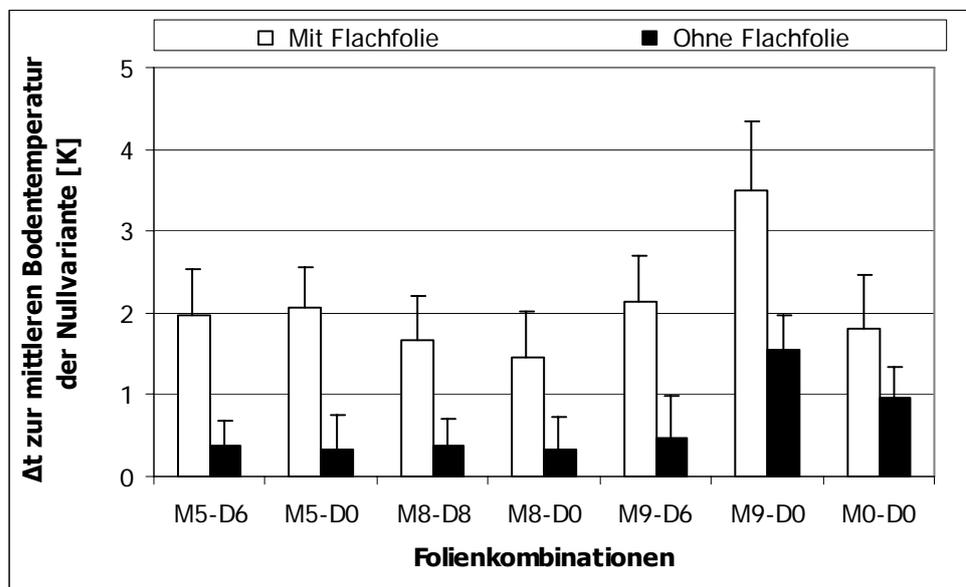


Abb.4.1-6: Differenzen und Standardabweichungen der Bodentemperaturen in 30 cm Tiefe der Folienvarianten mit und ohne Flachfolienbedeckung zur Nullparzelle im Versuchszeitraum 2004

Bei den Lufttemperaturmessungen des Versuchsjahres 2004 (Abbildung 4.1-7) wurden nur geringe Unterschiede mit einer hohen Streuung zwischen einzelnen Folienvarianten gemessen. Die Lufttemperaturen der Folienkombination M9-D0 lagen mit und ohne Flachfolienabdeckung 0,4 K bzw. 0,3 K als Einzige über denen der Nullparzelle. Alle anderen Varianten wiesen in beiden Zeiträumen niedrigere oder bei Flachfolienverwendung geringfügig höhere Lufttemperaturen auf. Ein signifikanter Unterschied durch die Flachfolienverwendung war nicht feststellbar.

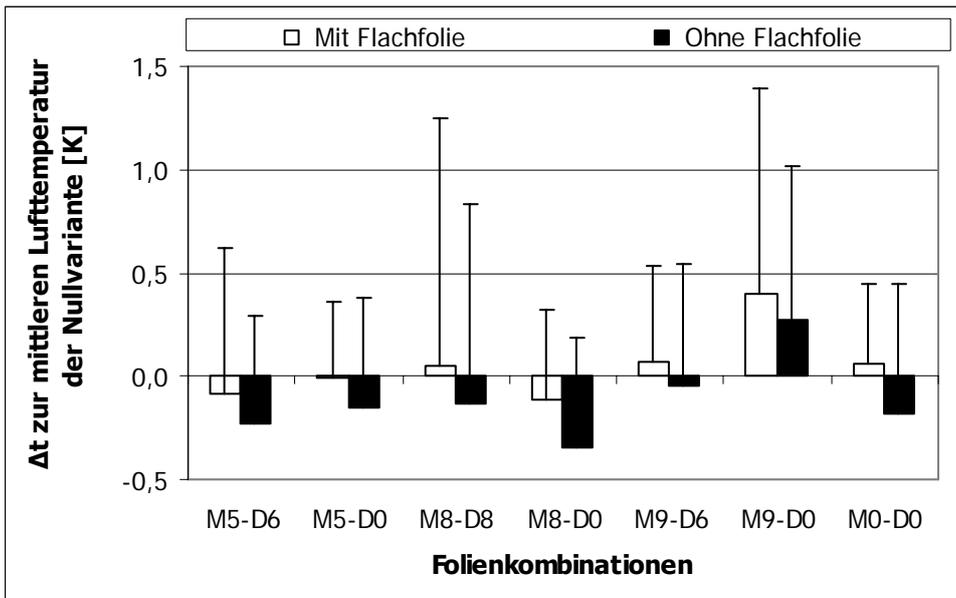


Abb. 4.1-7: Differenzen und Standardabweichungen der Lufttemperaturen der Folienvarianten in 20 cm Höhe mit und ohne Flachfolienbedeckung zur Nullparzelle im Versuchszeitraum 2004

4.1.2 Bodenfeuchte

Im Rahmen der Freilandversuche wurde die Bodenfeuchte zur Bewässerungssteuerung und zum Vergleich der Folienvarianten regelmäßig gemessen. In den Jahren 2002 und 2003 wurden dazu Tensiometer verwendet, wobei im Jahre 2003 witterungsbedingt keine darstellbaren Ergebnisse ermittelt werden konnten. Aufgrund dessen wurden im Jahr 2004 FDR-Sonden zur Bodenfeuchtemessung eingesetzt. Im Unterschied zu den vorherigen Versuchen wurde die Messung 2004 nur auf den fünf Beeten vom ersten Versuchsblock durchgeführt (siehe Anhang Abb. A-1).

Versuchsjahr 2002

Die Abbildung 4.1-8 zeigt die gemittelten Saugspannungen der Versuchspartellen im Versuchszeitraum Frühjahr 2002. Zur besseren Visualisierung der Niederschlagswirkung sind die Werte negativ dargestellt. Die Werte befanden sich niederschlagsbedingt insgesamt auf einem sehr niedrigen Niveau, einzig der zweite Messzeitpunkt am 16.05.2002 zeigte etwas höhere Werte von über - 130 hPa bei den Nullparzellen und knapp unter -100 hPa bei den anderen Varianten. Alle anderen Messzeitpunkte lieferten

Werte zwischen -30 und -70 hPa. Die statistische Auswertung ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Parzellen.

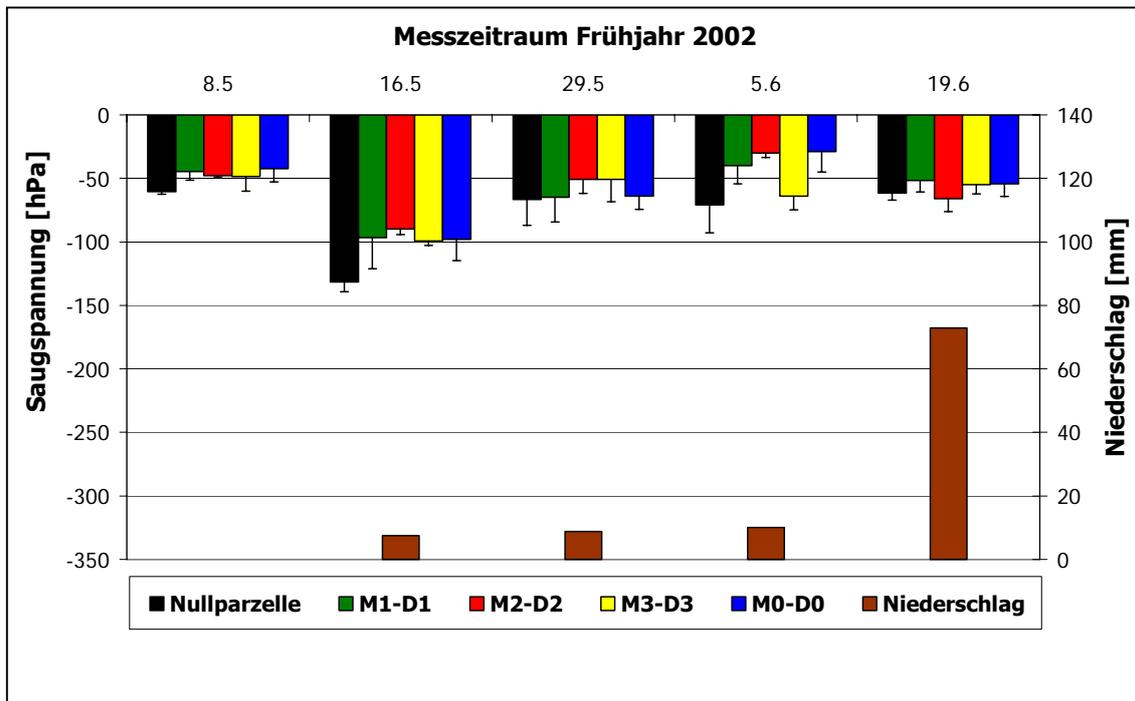


Abb. 4.1-8: Mittelwerte und Standardabweichungen der gemessenen Saugspannungen [hPa] in 30 cm Bodentiefe und zwischen den Messterminen kumulierte Niederschläge [mm] im Versuchszeitraum Frühjahr 2002

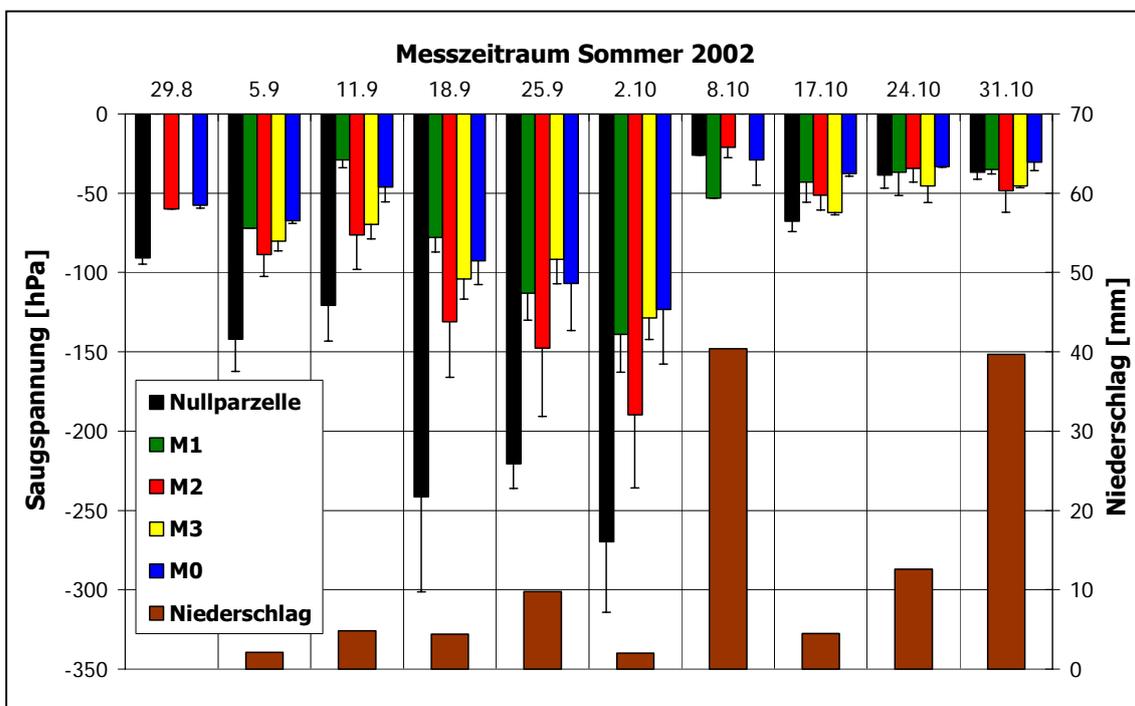


Abb. 4.1-9: Mittelwerte und Standardabweichungen der gemessenen Saugspannungen [hPa] in 30 cm Bodentiefe und zwischen den Messterminen kumulierte Niederschläge [mm] im Versuchszeitraum Sommer 2002

Der zweite Freilandversuch des Jahres 2002 wurde ohne zusätzliche Flachfolienabdeckung durchgeführt. Es war, wie in Abb. 4.1-9 ersichtlich, eine niederschlagsbedingte Zweiteilung der Messwerte im Versuchszeitraum zu erkennen. Vom Beginn am 29.08.2002 bis zum 02.10.2002 war für die gemessenen Saugspannungen aller Parzellen eine fallende Tendenz von Werten um -60 bis -90 hPa auf Werte zwischen -120 bis -270 hPa zu verzeichnen. Nach Niederschlagsmengen um 40 mm wurden bis zum Ende des Versuches nur noch geringe Saugspannungswerte von über -50 hPa gemessen.

Die Unterschiede der Mittelwerte der Folienvarianten waren bei zunehmender Saugspannung deutlicher ausgeprägt, ebenso wie die Streuung der Werte. Insgesamt gesehen wiesen die M0 Parzellen die geringsten Saugspannungen auf, gefolgt von den Biofolien M1, M2 und M3. Die statistische Auswertung der Messergebnisse ergab, dass die Saugspannungen der Nullparzellen signifikant niedriger waren als auf den Folienparzellen.

Freilandversuch 2004

Durch den Einsatz von FDR-Sonden erfolgte im Freilandversuch 2004 eine kontinuierliche elektronische Messung des Bodenwassergehaltes, deren Tagesmittelwerte in Abbildung 4.1-10 dargestellt sind. Es ist ersichtlich, daß die Verläufe der Kurven Ähnlichkeiten aufweisen, ausgenommen die Kurve der Variante M9-D6. Von Versuchsbeginn bis Anfang Mai 2004 waren abnehmende Bodenwassergehalte feststellbar, die sich in den verbleibenden elf Tagen des Versuches durch zwei niederschlagsbedingte Anstiege auf ein Endniveau um 25 Vol.-% erhöhten. Auch die Variante M9-D6, in der ersten Versuchsphase mit annähernd gleichbleibender Wertetendenz, folgte ab Anfang Mai dem ansteigenden Verlauf. Insgesamt hatte die Variante M8-D0 die höchsten Bodenwassergehalte, gefolgt von M5-D0, M0-D0 und der Nullparzelle. Die Variante M9-D6 hatte die geringsten Werte zu verzeichnen. Eine statistische Auswertung wurde aufgrund fehlender Wiederholungen nicht durchgeführt.

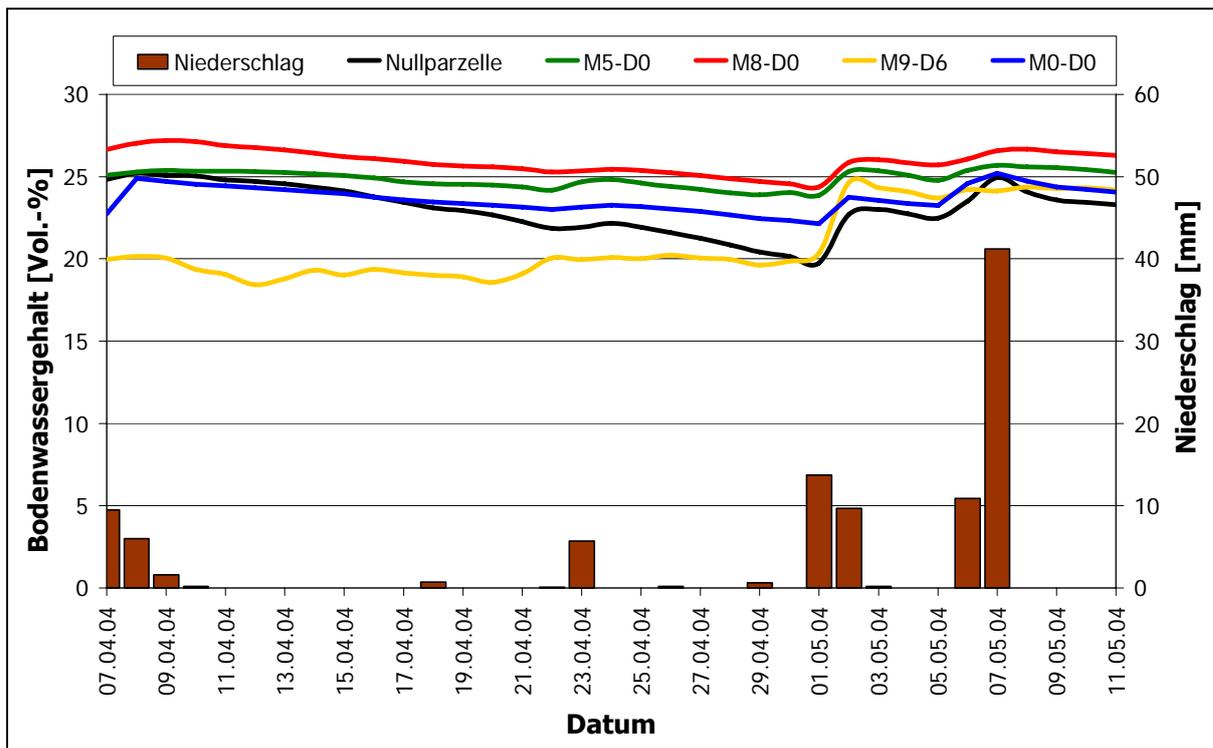


Abb. 4.1-10: Tagesmittelwerte des Bodenwassergehaltes [Vol.-%] in 30 cm Bodentiefe und die Tagesniederschlagsmengen [mm] während des Freilandversuches 2004

4.1.3 Klima unter Flachfolie

4.1.3.1 Luftfeuchte

Unter den Flachfolien wurden Psychrometer zur Erfassung der Trocken- und Feuchtekugeltemperaturen installiert. Aus den ermittelten Werten sollten Rückschlüsse auf die klimatischen Verhältnisse unter den Flachfolien im Vergleich zur Umgebungsluft gezogen werden. Durch die bei hoher Einstrahlung teilweise extremen Temperaturverhältnisse unterhalb der Flachfolien war eine sichere Messung der Feuchtekugel-Temperaturen technisch mit den verwendeten Psychrometern nicht immer durchführbar. Alternativ wurden zur Beschreibung der Luftzustände die Trockentemperaturen herangezogen. Aufgrund fehlender Wiederholungen war eine statistische Auswertung nicht möglich.

Freilandversuch Frühjahr 2002

Aus den in Abbildung 4.1-11 dargestellten Mittelwerten der Trockentemperaturen im Frühjahr 2002 lässt sich entnehmen, daß die Werte unter den Flachfolien 2-3 °C höher waren, als auf der Nullparzelle.

Die Folienvarianten M0-D0, M1-D1 und M2-D2 wiesen geringfügig höhere Temperaturen als die Folienkombination M3-D3 auf.

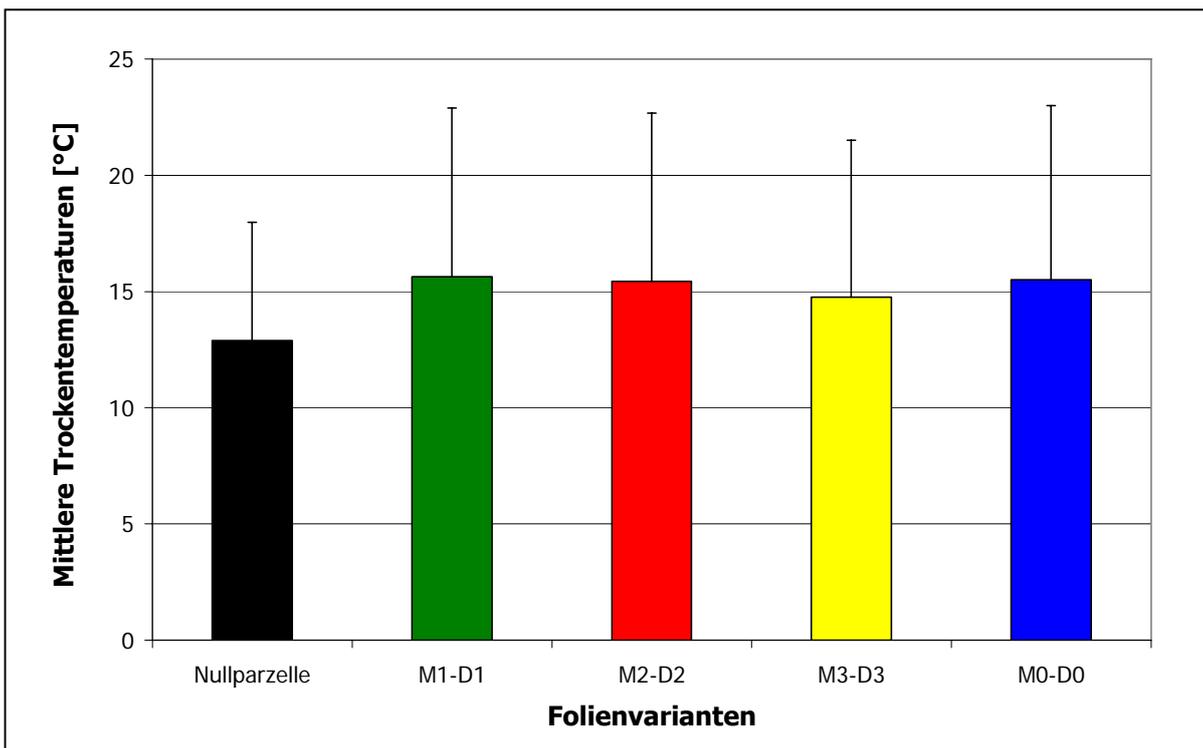


Abb. 4.1-11: Mittelwerte und Standardabweichungen der Trockentemperaturen unter Flachfolie während des Frühjahrsversuches 2002

In Abbildung 4.1-12 sind die Wassergehalte der feuchten Luft für die Zeit vom 05.05.2002 bis zum 09.05.2002 exemplarisch dargestellt. Dabei wurden jeweils zwei Tage mit niedrigen und zwei Tage mit höheren Lufttemperaturen ausgewählt. Die verhältnismäßig hohen Wassergehalte unter der konventionellen Flachfolie, sowie die geringen Werte der Nullparzelle waren deutlich zu erkennen. Bei den biologisch abbaubaren Flachfolien wurden keine eindeutigen Unterschiede festgestellt.

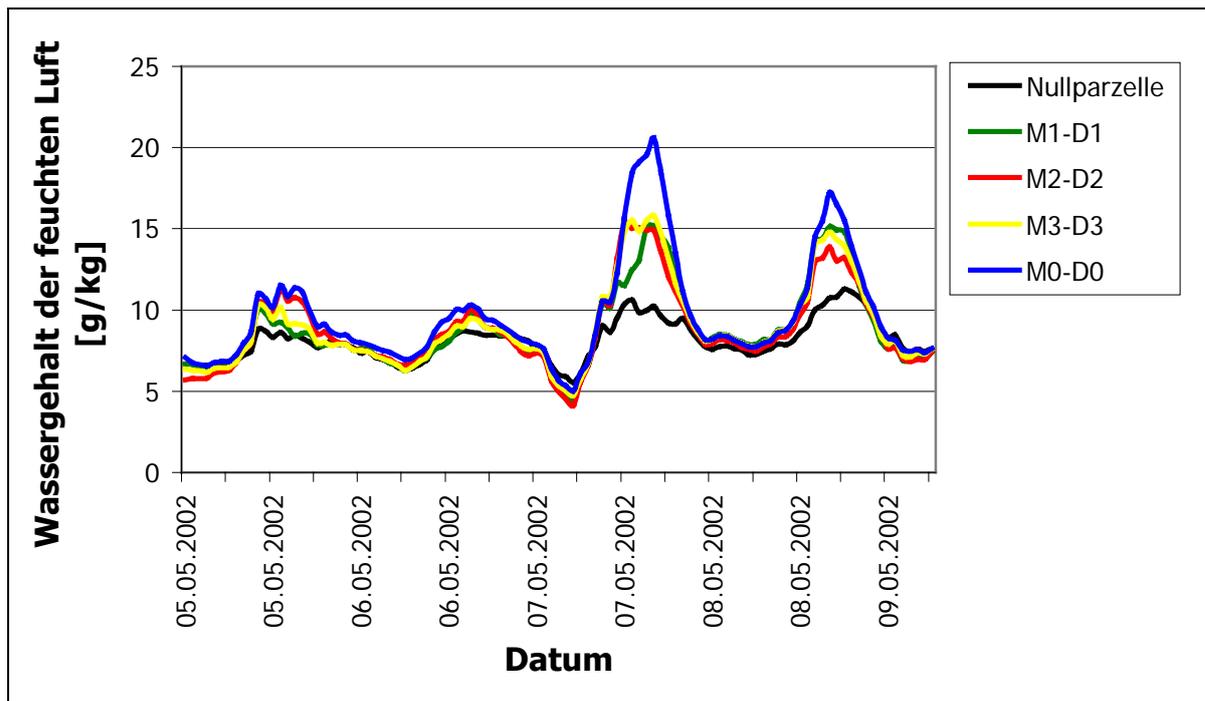


Abb. 4.1-12: Wassergehalte der feuchten Luft [g/kg] unter Flachfolie vom 05.05.2002 bis 09.05.2002

Freilandversuch 2003

Im Versuchszeitraum 2003 wurde bei der Messung der Trockentemperaturen unter den Flachfolien um 4-5 °C höhere Werte im Vergleich zur Nullparzelle gemessen (Abb. 4.1-13). Bei den Folien wies die Variante M6-D6 um ca. 1 °C geringere Werte auf, als die übrigen Flachfolien. Diese Tendenz ist auf dem in Abbildung 4.1-14 dargestellten Tagesgang der Trockentemperaturen nicht zu erkennen. Es ist dort eher eine Gruppenbildung zwischen M0-D0 und M4-D4 einerseits und M5-D5 und M6-D6 zu sehen. Auffällig waren die mit über 50 °C sehr hohen Lufttemperaturen.

Freilandversuch 2004

Die Messungen der Luftzustände unter den Flachfolien wurden im Jahre 2004 in einem zusätzlichen Versuch durchgeführt. Da keine konventionelle Flachfolie mehr zur Verfügung stand, wurde eine biologisch abbaubare Flachfolie (D5) aus dem Vorjahr verwendet. Bei der Betrachtung der mittleren Trockentemperaturen, dargestellt in Abbildung 4.1-15, sind zwischen den Folienkombinationen keine großen Unterschiede erkennbar. Der Wert der Kombination M5-D6 lag um 1 °C über allen anderen Folien.

Die Werte der Aussenluft lagen mit 4-5 °C deutlich unter denjenigen der Folienparzellen.

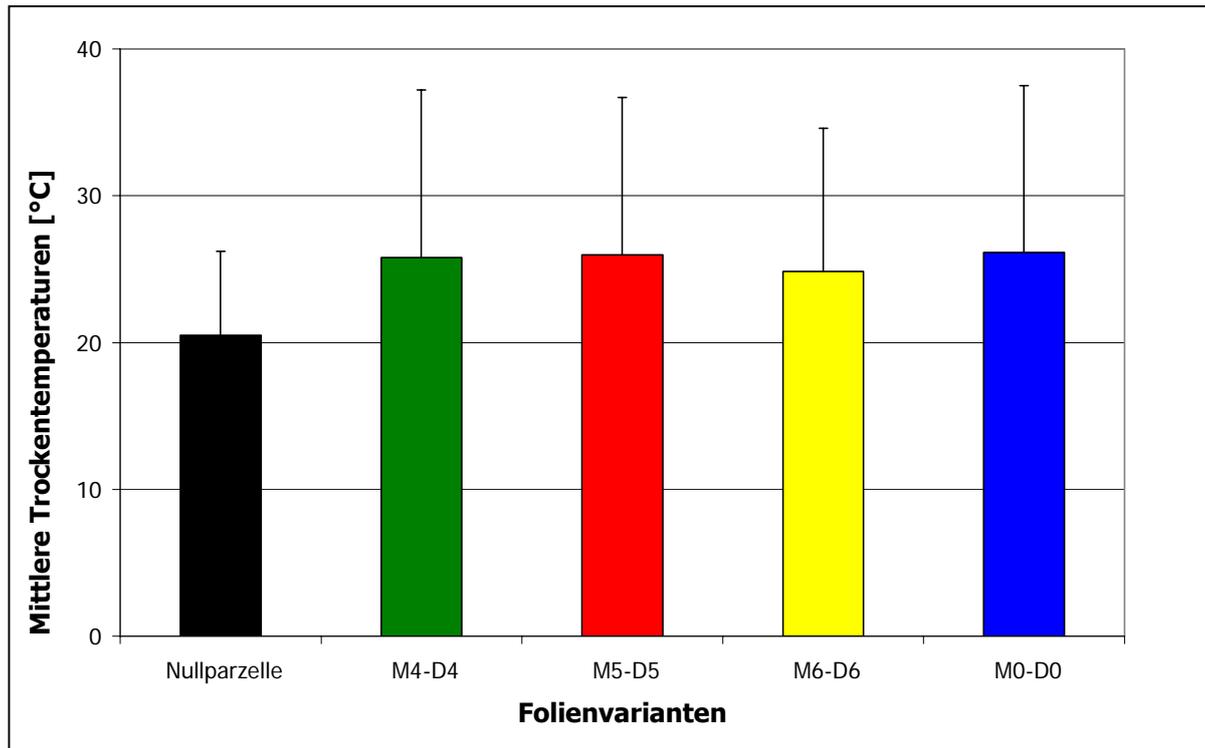


Abb. 4.1-13: Mittelwerte und Standardabweichungen der Trockentemperaturen unter den Flachfolien im Versuchszeitraum 2003

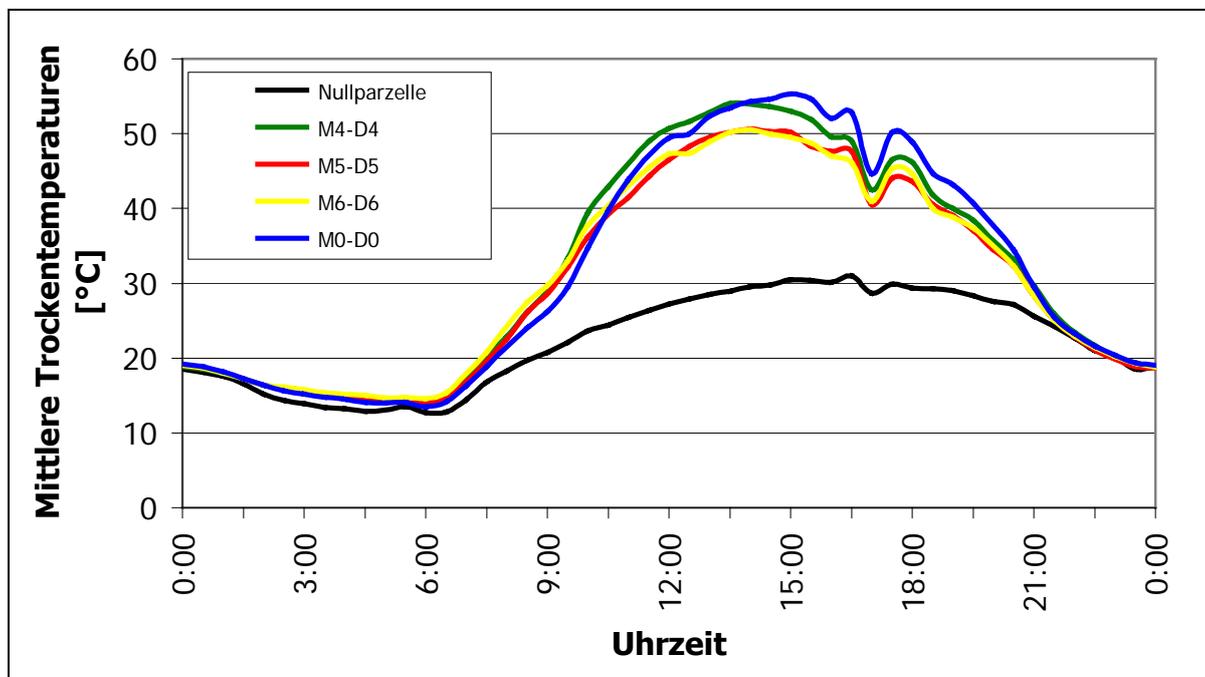


Abb 4.1-14: Tagesverlauf der Mittelwerte der Trockentemperaturen unter Flachfolie am 01.06.2003

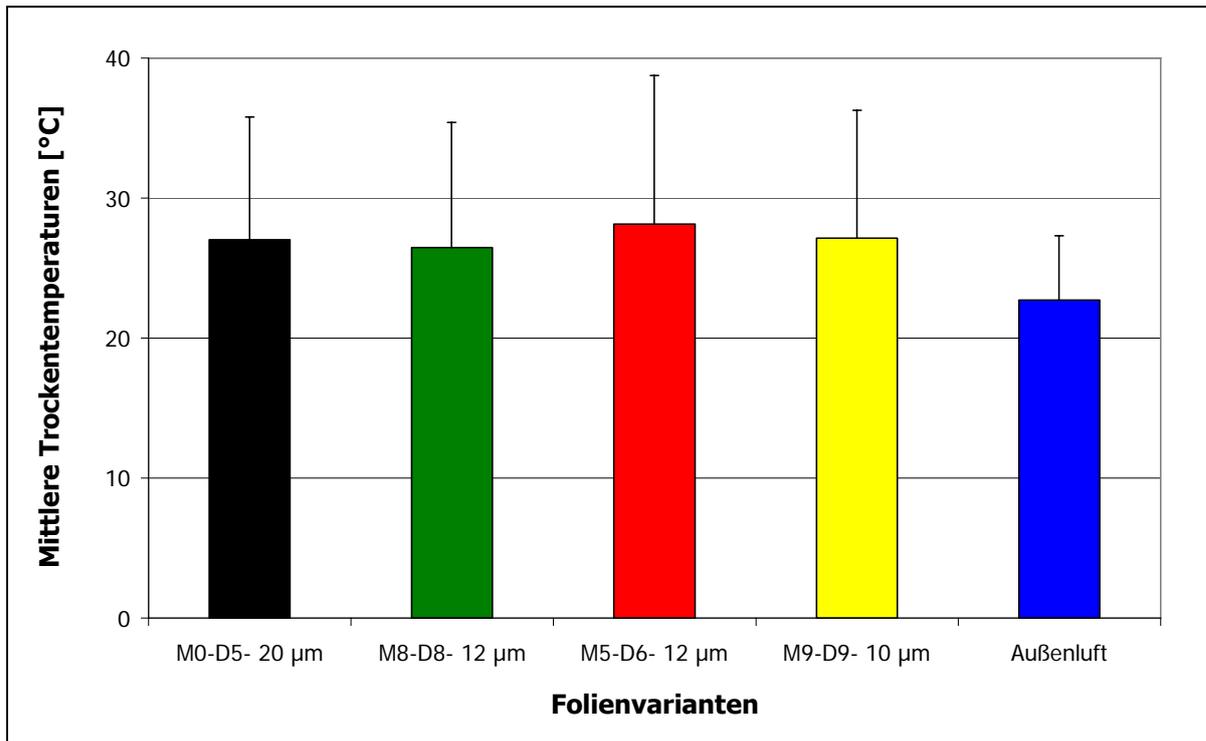


Abb.4.1-15: Mittelwerte und Standardabweichungen der Trockentemperaturen unter den Flachfolien während des Klimaversuches 2004

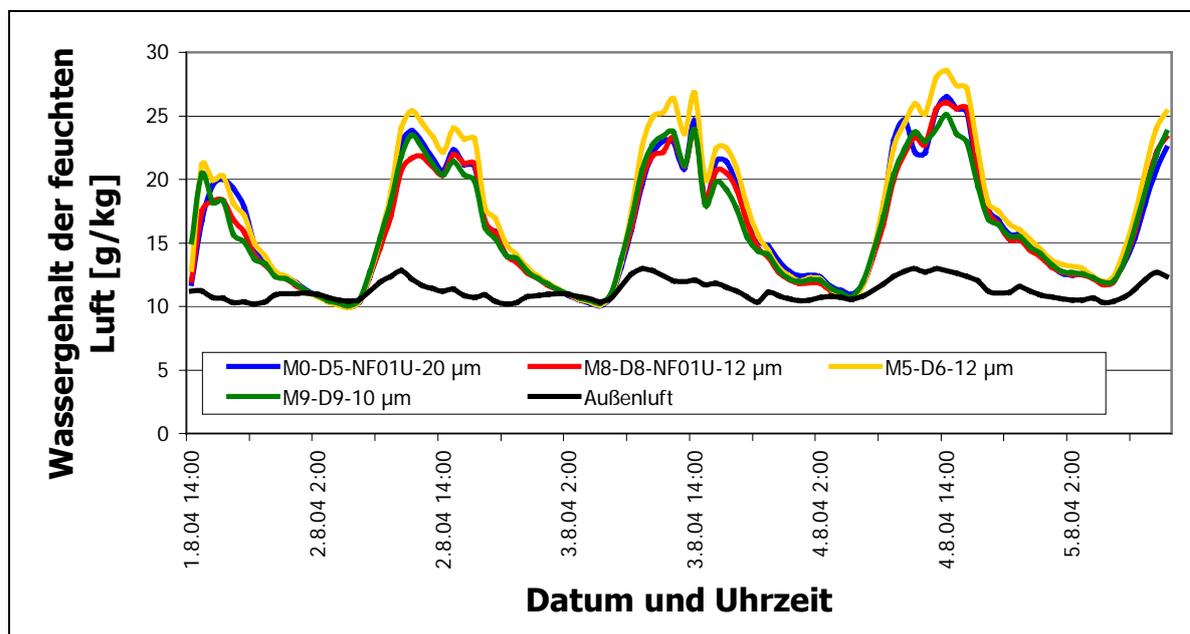


Abb.4.1-16: Wassergehalte der feuchten Luft [g/kg] während des Klimaversuches 2004

In Abbildung 4.1-16 sind die ermittelten Wassergehalte der feuchten Luft [g/kg] unter den Flachfolienvarianten grafisch dargestellt. Zwischen den Folienparzellen und der Aussenluft wurden tagsüber deutliche Unterschiede festgestellt, die im Laufe der Nachtphase relativierten. Bei den Folienvarianten zeigte M5-D6 tagsüber etwas höhere Werte, als die übrigen Parzellen. M0-D5 und M8-D8 zeigten ähnliche Werte und bei der Folienkombination M9-D9 wurden die niedrigsten Ergebnisse festgestellt.

4.1.3.2 Strahlungsdurchlässigkeit

Zur Beurteilung der Strahlungsminderung durch die Flachfolienabdeckungen wurden in den Versuchen der Jahre 2003 und 2004 Solarimeter im Pflanzenbestand unterhalb der Flachfolien aufgestellt. Ein weiteres Solarimeter zur Messung der Globalstrahlung war in ca. 1 m Höhe auf der Versuchsfläche als Referenz installiert.

Für den Versuch des Jahres 2003 sind die Ergebnisse in Abbildung 4.1-17 als Strahlungssumme über den Messzeitraum vom 12.06.2003 ab 16 Uhr bis zum 17.06.2003 um 10 Uhr dargestellt. Der Grafik ist zu entnehmen, daß die eingestrahelte Energie von den Flachfolien um ca. von 12 % bei der konventionellen D0-Flachfolie bis zu 24 % bei der D6-Flachfolie gemindert wurde. Bei der D5-Flachfolie lag die Minderung bei 13 %, während unter der D4-Flachfolie um 22 % geringere Werte gemessen wurden, als bei der Messung der Globalstrahlung. Die Durchlässigkeit ging bei dieser Messung mit abnehmender Foliendicke zurück.

Im Gegensatz dazu wurde im Versuch des Jahres 2004 vom 01.08.2004 bis zum 07.08.2004, wo keine konventionelle Flachfolie eingesetzt wurde, bei den dünneren Folien höhere Strahlungsdurchlässigkeiten festgestellt. Die Werte lagen diesmal zwischen 11 % bei D9/2004 und 31 % bei D5/2003. Die Minderungswerte von D6/03 mit 14 % und von D8/04 mit 27 % lagen zwischen den oben genannten Meßwerten. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.1-18 dargestellt.

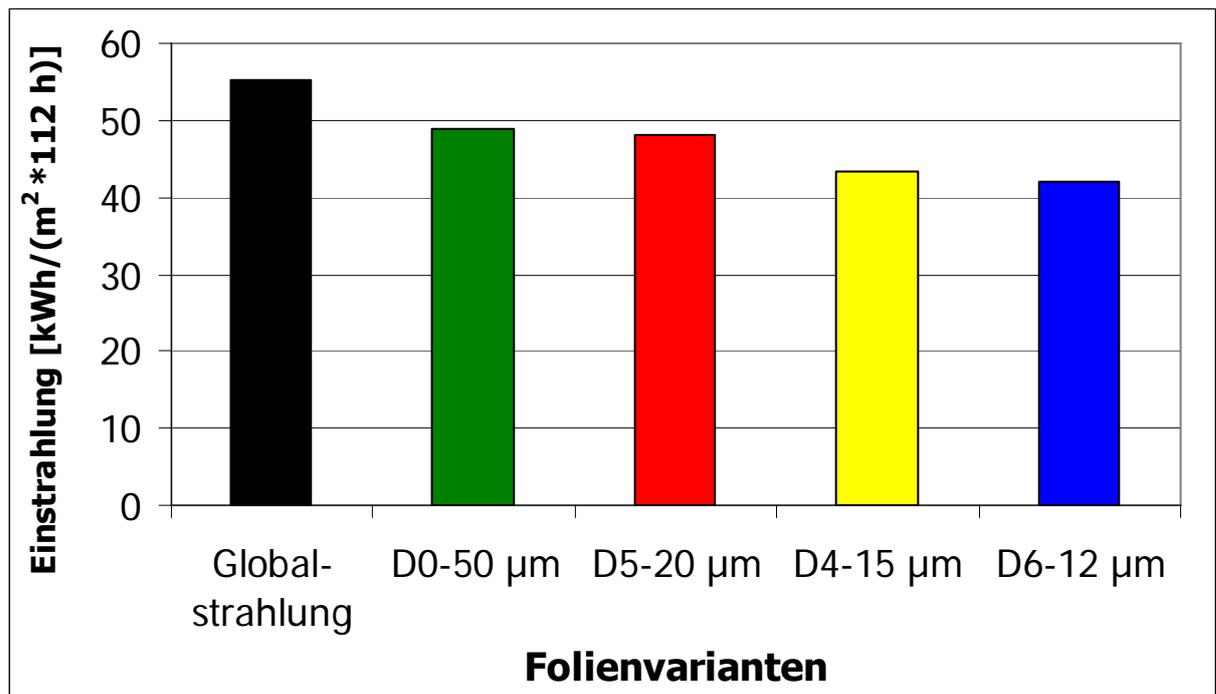


Abb. 4.1-17: Strahlungssumme während des Versuches 2003 vom 12.06.2003 16 Uhr bis zum 17.06.2003 10 Uhr

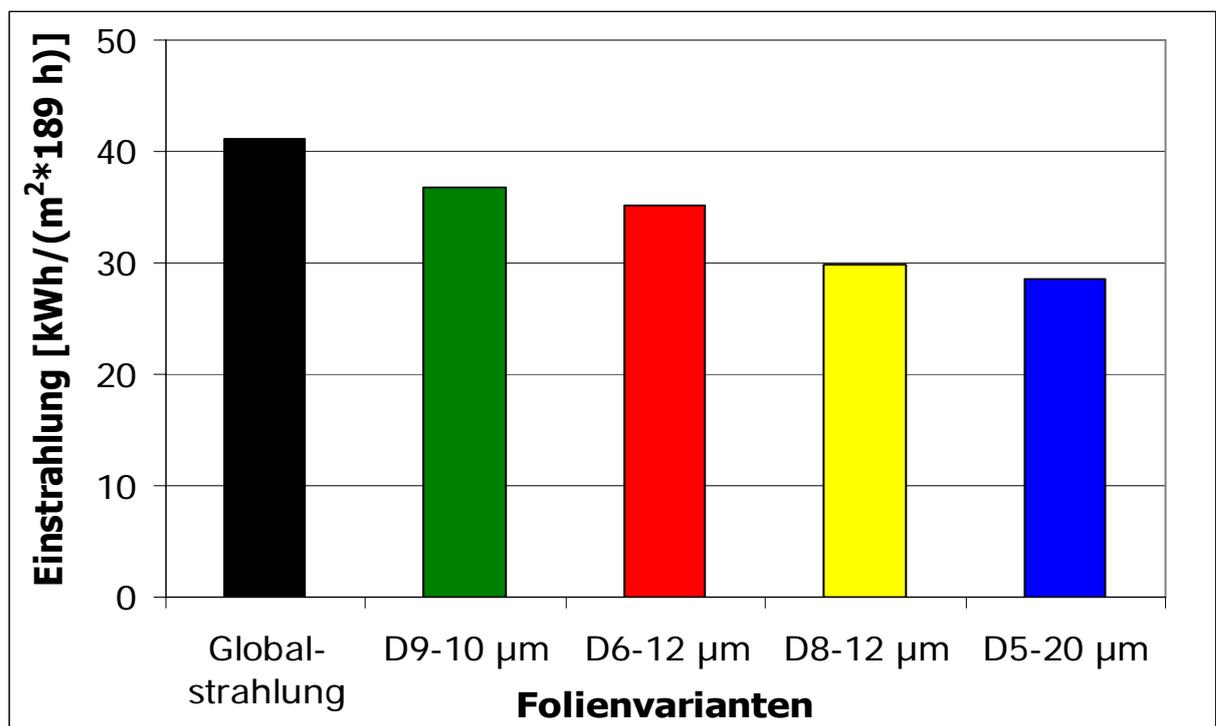


Abb. 4.1-18: Strahlungssumme während des Klimaversuches 2004 vom 30.07.2004 17 Uhr bis zum 07.08.2004 14 Uhr

4.1.4 Erträge

Bei zwei der vier Freilandversuche wurde eine Ertragsbonitur durchgeführt. Dazu wurden im Frühjahr 2002 und im Versuchsjahr 2004 die Frischmassen von randomisiert ausgewählten Versuchspflanzen durch Wägung bestimmt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 4.1.4-1 dargestellt.

Tab.4.1.4-1: Mittlere Frischmasse-Erträge der Freilandversuche Frühjahr 2002 und Versuchsjahr 2004

Versuchsjahr	Variante	Mittlere Frischmasse [g]	Ausfälle in %	n
2002	M1-D1	665,4	9	75
2002	M2-D2	714,2	3	75
2002	M3-D3	728,0	4	75
2002	M0-D0	675,8	4	75
2002	Null-parzelle	640,3	7	75
2004				
2004	M5-D0	269,7	3	40
2004	M5-D6	258,9	5	20
2004	M8-D0	253,6	5	40
2004	M8-D8	245,1	0	20
2004	M9-D6	241,7	15	40
2004	M9-D0	184,9	10	20
2004	M0-D0	132,7	37	60
2004	Null-parzelle	112,3	10	60

Bei Ergebnissen der Ertragsbonitur vom Frühjahr 2002 ist zu erkennen, daß keine signifikanten Unterschiede bei den ermittelten Frischmassen der Versuchsvarianten festgestellt werden konnten. Die konventionelle Variante M0-D0 lag mit ihren Ergebnissen zwischen den Ergebnissen der Varianten M3-D3 und M2-D2 mit höheren Resultaten und M1-D1 und den Nullparzellen mit niedrigeren Ergebnissen.

Die geringsten Frischmassererträge im Freilandversuch 2004 wurden auf den Nullparzellen und auf der konventionellen Variante M0-D0 gemessen. Letztere zeigte mit 37 % eine ungewöhnlich hohe Zahl an Pflanzenausfällen. Bei den biologisch abbaubaren Mulchfolien hatten die Kombinationen von M5 und M8 die höchsten Frischmassen vorzuweisen, wobei die Parzellen mit konventioneller Flachfolie leicht

höhere Frischmasseerträge als die mit biologisch abbaubarer Abdeckung aufwiesen. Bei der Mulchfolie M9 wurden einerseits die niedrigsten Ergebnisse der biologisch abbaubaren Folien festgestellt und andererseits wurden unter konventioneller Abdeckung geringere Werte ermittelt als unter biologisch abbaubarer Abdeckung. Durch die notwendigen Veränderungen in der Versuchsanstellung (siehe Kap. 3.3.1) wurden für die einzelnen Folienvarianten Stichproben in unterschiedlicher Größe gezogen, was eine statistische Auswertung unmöglich machte.

Beim Vergleich der Frischmasseerträge aus beiden Versuchsjahren sind große Unterschiede zu erkennen. Dies gilt besonders für die Nullparzelle und die konventionelle Kontrolle, wo die mittleren Frischmasseerträge im Jahr 2002 um das fünf bis sechsfache über den Ergebnissen vom Freilandversuch 2004 lagen.

4.2 Laborversuche

4.2.1 Transmission

Zur Feststellung, ob sich durch die Anwendung der Versuchsfolien im Freiland Veränderungen der spektralen Durchlässigkeit ergaben, wurden während der Freilandversuche regelmäßig Folienproben entnommen und mit einem Spektralphotometer untersucht. Die Ergebnisse der einzelnen Messungen wurden nach ELSNER (2004a) mit dem energetischen Gehalt der Globalstrahlung verrechnet, in pflanzenbaulich relevante Spektralbereiche eingeteilt (siehe Tabelle 3.3.-5) und im Folgenden grafisch dargestellt.

Die nicht verrechneten Meßwerte sind im Anhang dieser Arbeit in den Abbildungen A-4 bis A-31 zu finden. Die dort in jeder Grafik sichtbare höhere Transmission im Bereich von 860 nm ist ein Artefakt des Spektralphotometers, bedingt durch das interne Umschalten der Analyse-Lichtquellen. Bei der Auswertung der Meßergebnisse wurden diesen Werten keine Bedeutung beigemessen, da in diesem Wellenlängenbereich keine pflanzenphysiologischen Wirkungen zu erwarten sind. Eine statistische Auswertung konnte nur mit den Proben des Versuchsjahres 2002 durchgeführt werden.

Mulchfolien

Die Messergebnisse aller schwarzen Mulchfolien zeigten erwartungsgemäß sehr geringe Strahlungsdurchlässigkeiten. In den für das Pflanzenwachstum relevanten Wellenlängenbereichen UV und PAR war bei allen untersuchten Folien mit Werten unter 1,1 % praktisch keine Transmission nachweisbar. Ebenso wurden im NIR-Bereich mit Werten unter 5,1% nur geringe Transmissionswerte gemessen. Bei keiner Folie war eine von der Verwendungsdauer abhängige Veränderung der Strahlungsdurchlässigkeit festzustellen. Auf eine statistische Auswertung wurde verzichtet. Die Messergebnisse sind im Anhang in den Abbildungen A-4 bis A-18 dargestellt.

Im Versuchsjahr 2004 kam zusätzlich zu den schwarzen Mulchfolien auch die grün-transparente Mulchfolie M9, dargestellt in Abb. 4.2.1-1 und Abb. A-19, zum Einsatz. In allen drei untersuchten Wellenlängenbereichen war bis zur vorletzten Probe eine

Abnahme der Transmission zu beobachten. Bei den beiden letzten Proben vom 30.04.04 und 29.05.04 wurden bis auf das Ausgangsniveau ansteigende Werte gemessen. Die Messwerte lagen im UV-Bereich zwischen 12 % und 22 %, die Ergebnisse der PAR-Messung schwankten zwischen 33 % und 42 %. Die höchste Strahlungsdurchlässigkeit wurde mit Werten zwischen 73 % und 78 % im NIR festgestellt. Eine statistische Auswertung konnte mangels Wiederholungen nicht durchgeführt werden.

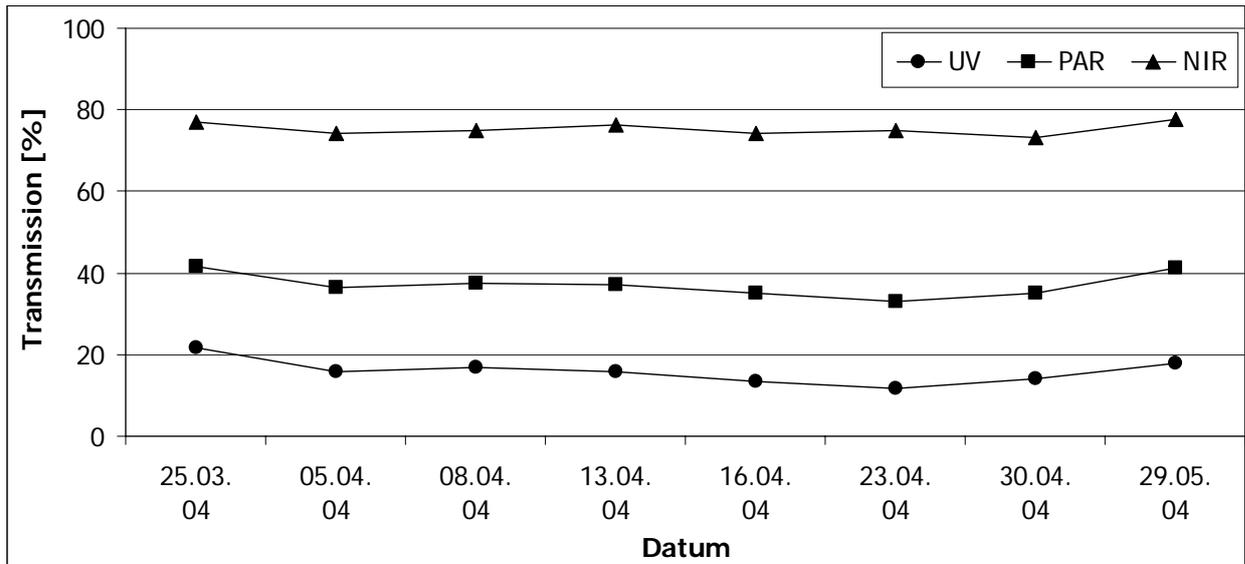


Abb. 4.2.1-1: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M9-NF01U/P-20c-04 im Versuchszeitraum 2004 in den untersuchten Spektralbereichen

Flachfolien

Versuchsjahr 2002

Die Ergebnisse der Messungen der spektralen Durchlässigkeiten für das Versuchsjahr 2002, wo nur im Frühjahrsversuch Flachfolien verwendet wurden, sind in den Abbildungen 4.2.1-2 bis 4.2.1-5 zu finden. Dort sind Unterschiede zwischen der konventionellen Kontrolle D0 und den biologisch abbaubaren Varianten zu erkennen. Die konventionelle Flachfolie D0 zeigte im UV-Bereich vor Versuchsbeginn eine um bis zu 30 % höhere Strahlungsdurchlässigkeit, als die biologisch abbaubaren Vergleichsfolien. In den höheren Wellenlängenbereichen lagen die Werte von D0 7 % - 10 % (PAR), bzw. 3 % - 8 % (NIR) oberhalb der Werte der anderen Varianten. Allen Folien gemeinsam war eine Abnahme der Strahlungsdurchlässigkeit über die

Versuchsdauer. Diese war im UV-Bereich am stärksten ausgeprägt und nahm mit steigender Wellenlänge immer weiter ab. Bei der konventionellen Flachfolie D0 waren die Verluste mit ca. 2 % im UV-Bereich und 1 %, bzw. 0,5 % im PAR und NIR gering. Die Verluste der Biofolien waren insgesamt höher. Sie lagen im UV-Bereich bei der Folie D3 bei bis zu 28 %, im PAR bis zu 18 % (Folie D2) und bis zu 13 % (Folie D2) im NIR-Bereich. Die statistische Auswertung ergab einen signifikanten Unterschied zwischen D0 und den biologisch abbaubaren Folien.

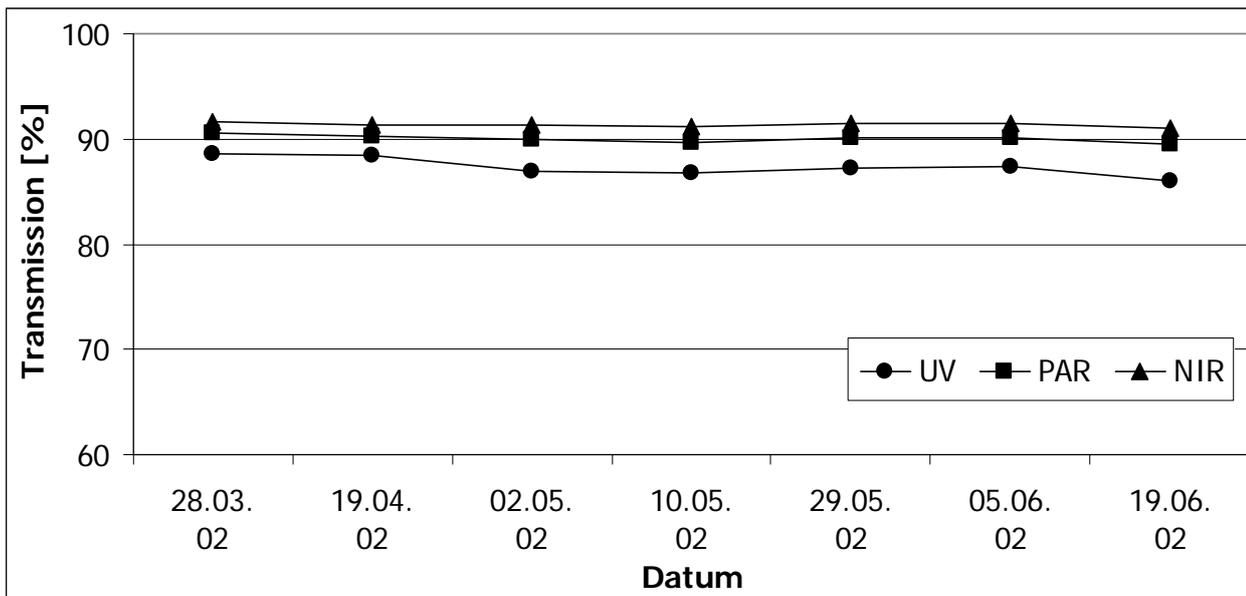


Abb. 4.2.1-2: Transmission [%] der konventionellen Flachfolie D0-EVA-50s-02 im Versuchszeitraum Frühjahr 2002 in den untersuchten Spektralbereichen

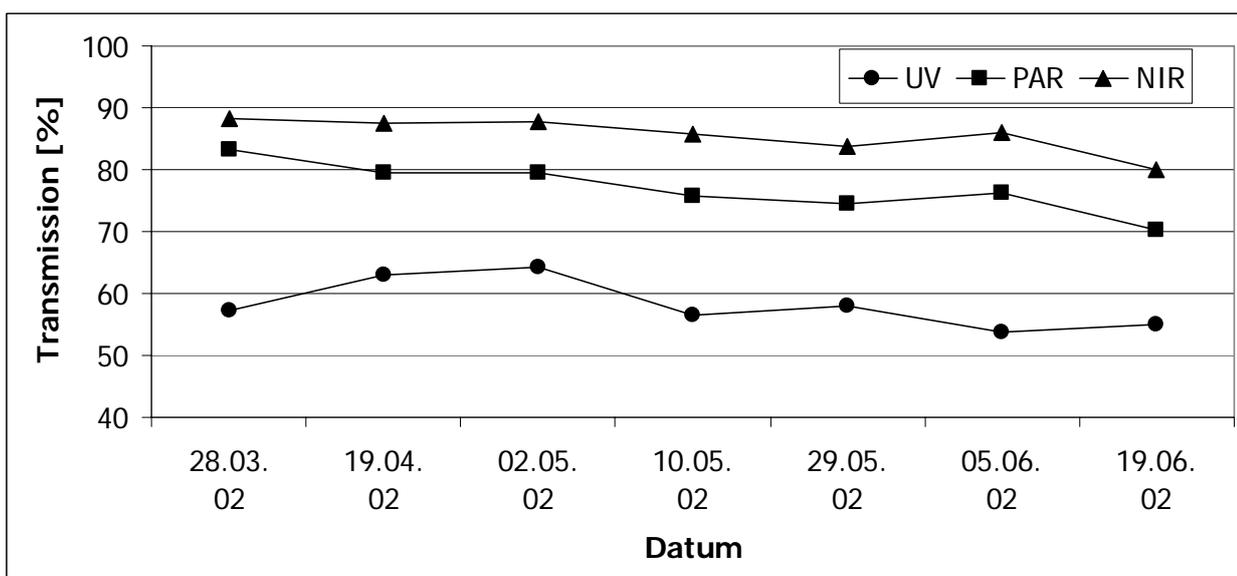


Abb. 4.2.1-3: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D1-NF803-20-02 im Versuchszeitraum Frühjahr 2002 in den untersuchten Spektralbereichen

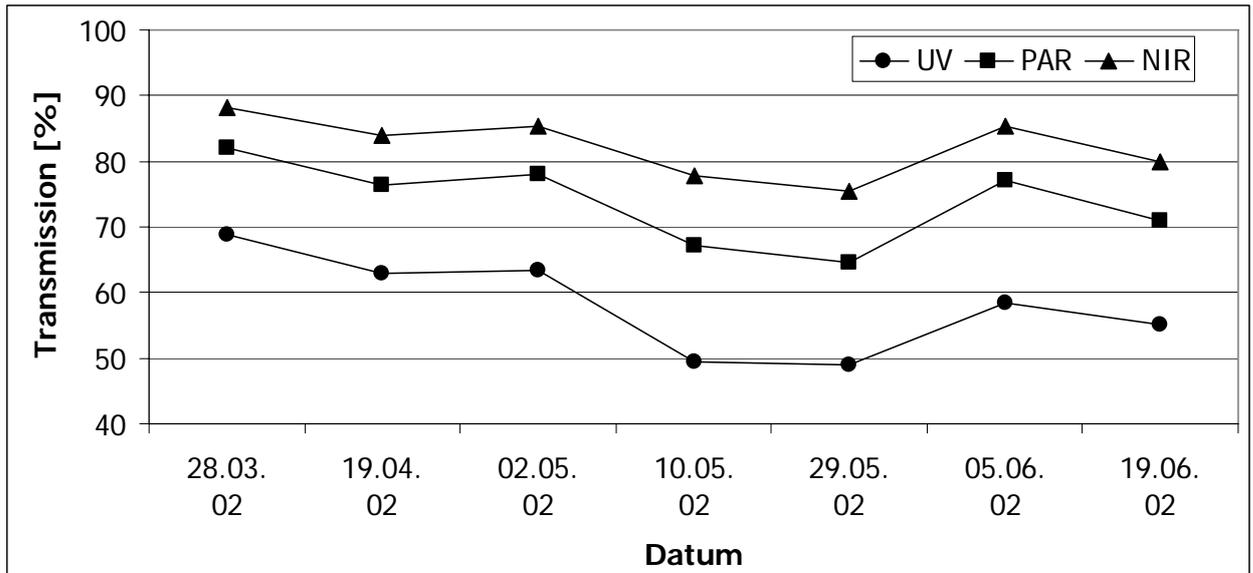


Abb. 4.2.1-4: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D2-NF803-20s-02 im Versuchszeitraum Frühjahr 2002 in den untersuchten Spektralbereichen

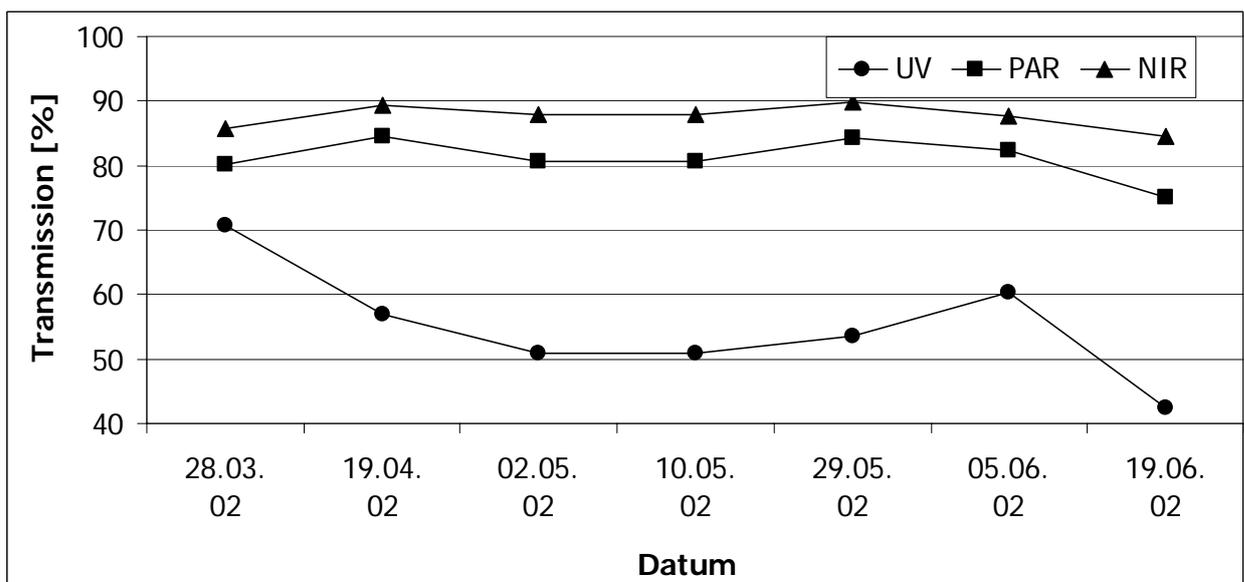


Abb. 4.2.1-5: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D3-NF803-20s-02 im Versuchszeitraum Frühjahr 2002 in den untersuchten Spektralbereichen

In den Abbildungen A-20 bis A-23 werden weitere Unterschiede zwischen den Flachfolienvarianten deutlich. So zeigten die Biofolien unter 300 nm keine Durchlässigkeit für Strahlung, die konventionelle Vergleichsfolie hingegen schon.

Bei den biologisch abbaubaren Flachfolien ist eine Schwankung der Strahlungsdurchlässigkeit über die Versuchsdauer deutlich erkennbar. Die Flachfolie D2 zeigte hierbei im PAR und NIR die größte Schwankungsbreite, D3 die geringste.

In den Abbildungen ist auch ein Unterschied im Kurvenverlauf im UV-Bereich 300 nm-400 nm zu erkennen. Bei den Flachfolien D1 und D2 lag ein geradlinig ansteigender Kurvenverlauf vor, Flachfolie D3 hingegen zeigte im Bereich zwischen 320 nm und 340 nm eine Sattelbildung.

Versuchsjahr 2003

Die Meßergebnisse der Strahlungsdurchlässigkeiten für das Versuchsjahr 2003 sind in den Abbildungen 4.2.1-6 bis 4.2.1-9 und den Abbildungen A-24 bis A-27 dargestellt. Erneut waren Unterschiede zwischen der konventionellen Variante D0 und den Biofolien zu erkennen.

Wie schon im Vorjahresversuch lagen die Werte der konventionellen Kontrolle höher, als die der Vergleichsfolien. Die größte Differenz war im UV-Bereich zu finden, wo die konventionelle Folie zu Beginn eine Strahlungsdurchlässigkeit von 83% aufwies. Die Werte der Biofolien lagen hingegen bei 59 % -69 %. Im Bereich von PAR und NIR waren die Differenzen nicht so groß, dort lagen die Werte der Kontrolle zu Versuchsbeginn 3 % (PAR), bzw. 7% (NIR) über denen der Biofolien.

Während die Kontrolle keinen Rückgang der Strahlungsdurchlässigkeit, im UV-Bereich sogar einen leichten Anstieg, zu verzeichnen hatte, ließ bei den Biofolien die Strahlungsdurchlässigkeit über die Versuchsdauer nach. Die größten Verluste erfolgten im UV-Bereich, die geringsten im NIR-Bereich.

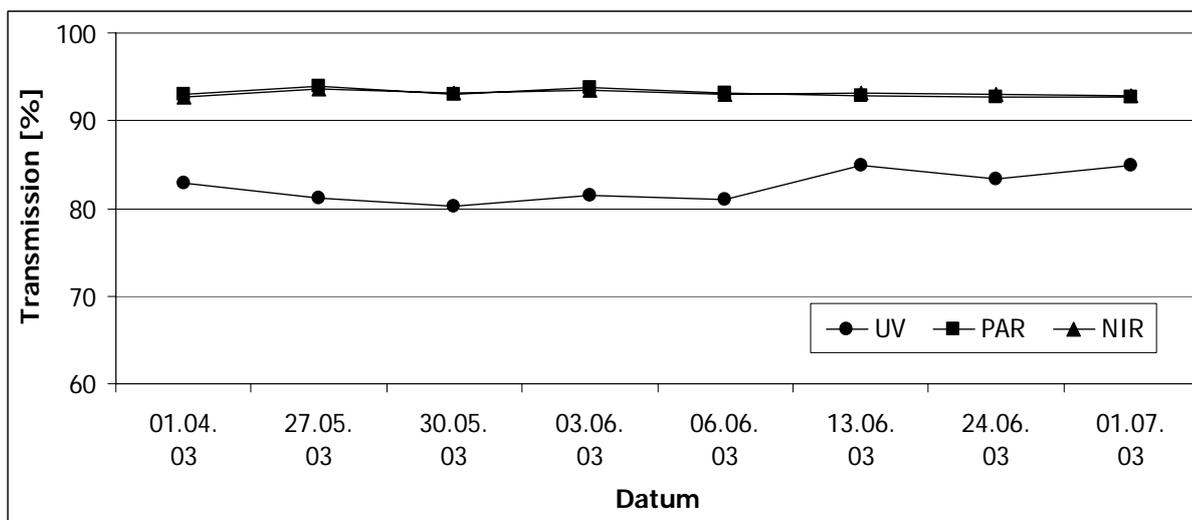


Abb. 4.2.1-6: Transmission [%] der konventionellen Flachfolie D0-EVA-50s-03 im Versuchszeitraum 2003 in den untersuchten Spektralbereichen

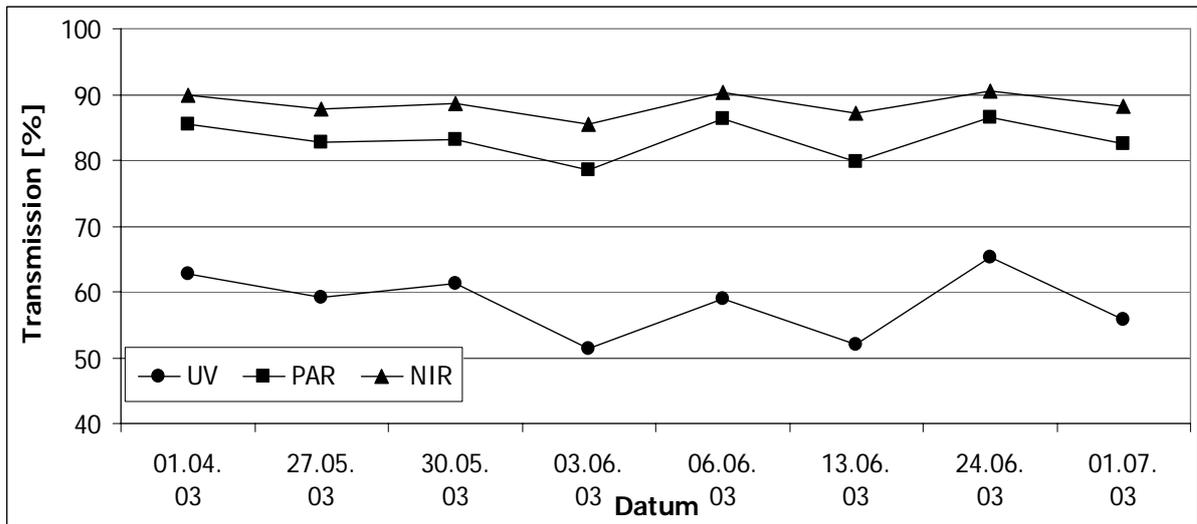


Abb. 4.2.1-7: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D4-NF803-15-03 im Versuchszeitraum 2003 in den untersuchten Spektralbereichen

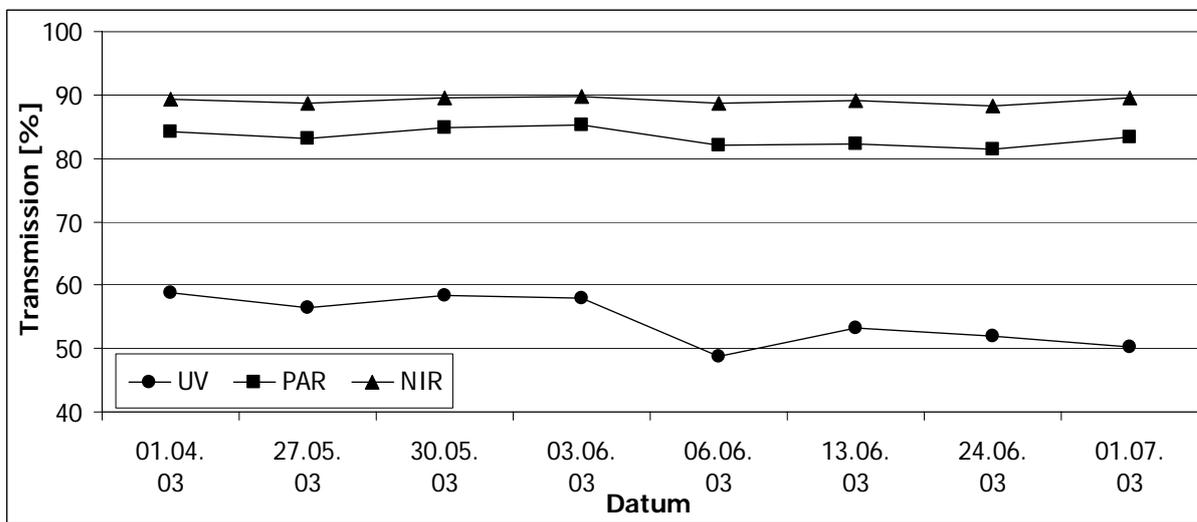


Abb. 4.2.1-8: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D5-NF01U-20-03 im Versuchszeitraum 2003 in den untersuchten Spektralbereichen

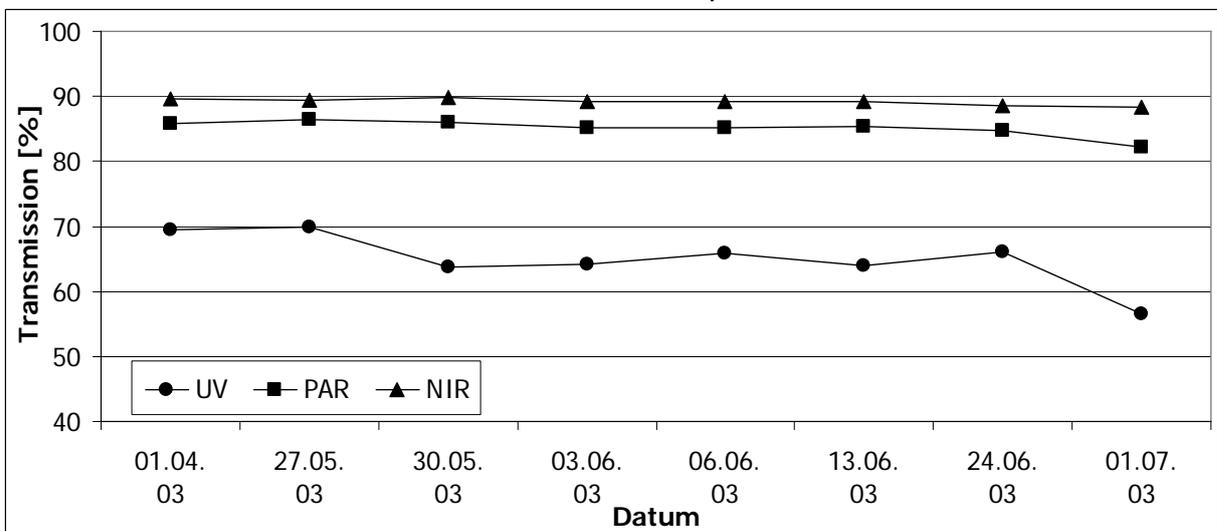


Abb. 4.2.1-9: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D6-NF803-12-03 im Versuchszeitraum 2003 in den untersuchten Spektralbereichen

Bei den Abbildungen im Anhang ist die im Vorjahresversuch festgestellte Sattelbildung zwischen 300 nm und 400 nm ebenfalls bei allen Biofolien sichtbar. Die größten Schwankungen in den Meßwerten zeigte Folie D4.

Versuchsjahr 2004

Im Versuchsjahr 2004 wurden hinsichtlich der Strahlungsdurchlässigkeit etwas veränderte Verhältnisse, als in den vorherigen Versuchen, festgestellt. In den Abbildungen 4.2.1-10 bis 4.2.1-13 zeigte sich, daß zwischen den Folienvarianten zu Versuchsbeginn keine großen Unterschiede in der Transmission zu erkennen waren. Im UV-Bereich wies die Biofolie D7 sogar eine höhere Strahlungsdurchlässigkeit auf, als die Kontrollfolie D0. Die Werte der beiden anderen Varianten lagen auf demselben Niveau (D8) oder leicht unterhalb (D9) den Werten der Kontrollfolie. In den beiden verbleibenden Wellenlängenbereichen lagen die Werte der Biofolien bis zu 5 % unterhalb der Kontrollwerte.

Veränderungen der Strahlungsdurchlässigkeiten im Versuchszeitraum ließen sich 2004 bei allen eingesetzten Versuchsfolien erkennen. Mit Werten von 0,5 % (UV) bis 1,5 % (PAR) waren die Verluste der konventionellen Flachfolie D0 eher gering, verglichen mit bis zu 16 % Abnahme bei der UV-Durchlässigkeit der Biofolie D8. Diese Folie zeigte im PAR mit 7 % und im NIR mit 3 % auch die höchsten Minderungswerte.

In den Abbildungen A-28 bis A-31 im Anhang ist bei den Biofolien, im Gegensatz zum Vorversuch, keine Sattelbildung zwischen 300 nm und 400 nm zu erkennen. Es lag ein gradliniger Abfall der Transmission bis zum Nullpunkt bei 300 nm vor. Verglichen mit der Kontrolle zeigten die Biofolien eine Streuung der Werte über die Versuchszeit, wobei D9 die größte und D7 die geringste Streuung aufwiesen.

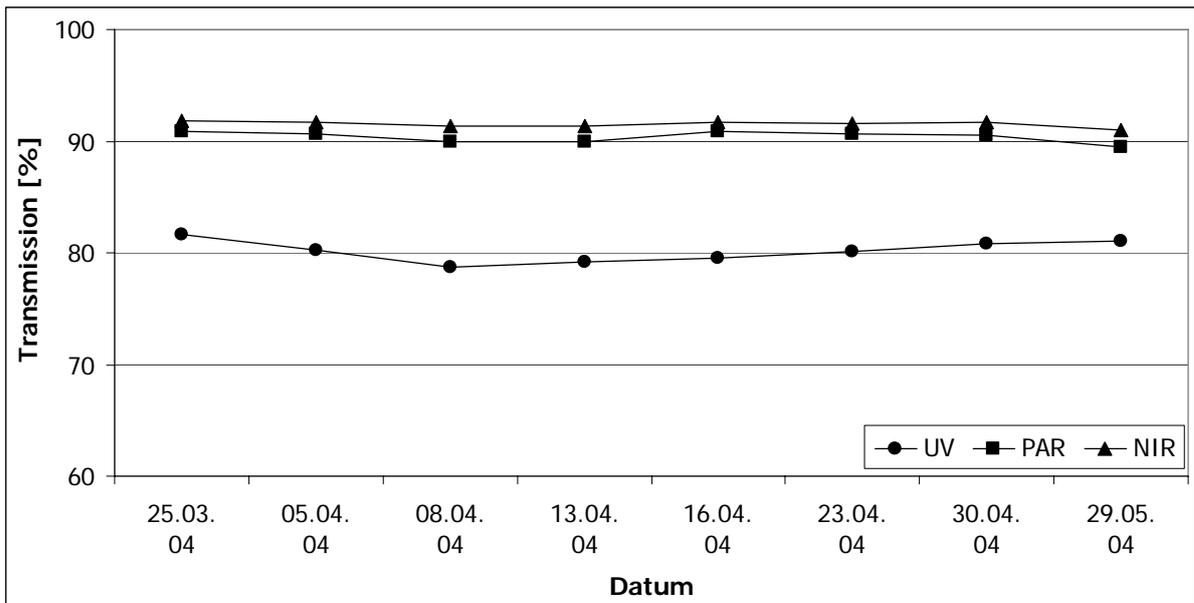


Abb. 4.2.1-10: Transmission [%] der konventionellen Flachfolie D0-EVA-50s-04 im Versuchszeitraum 2004 in den untersuchten Spektralbereichen

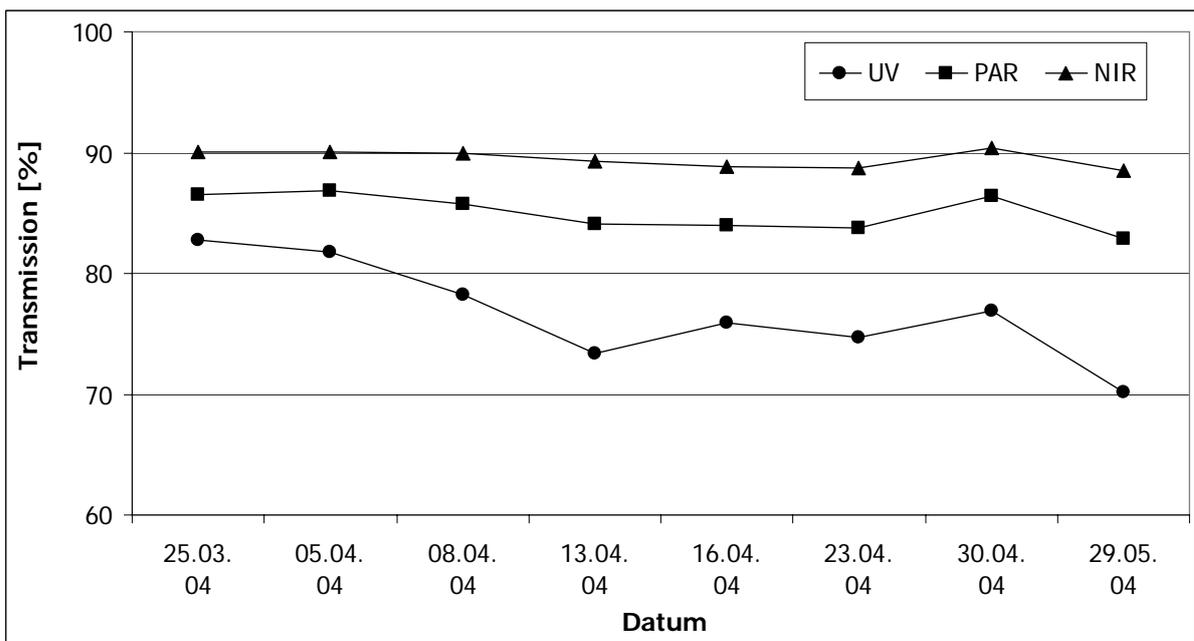


Abb. 4.2.1-11: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D7-NF803-12-04 im Versuchszeitraum 2004 in den untersuchten Spektralbereichen

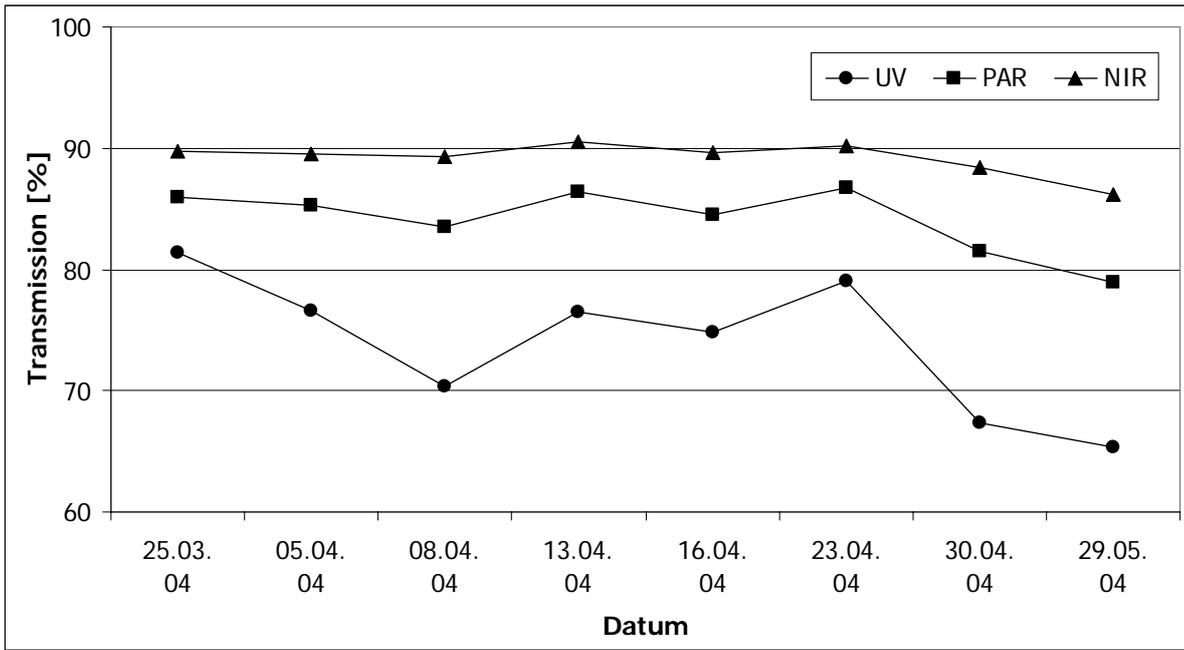


Abb. 4.2.1-12: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D8-NF01U-12-04 im Versuchszeitraum 2004 in den untersuchten Spektralbereichen

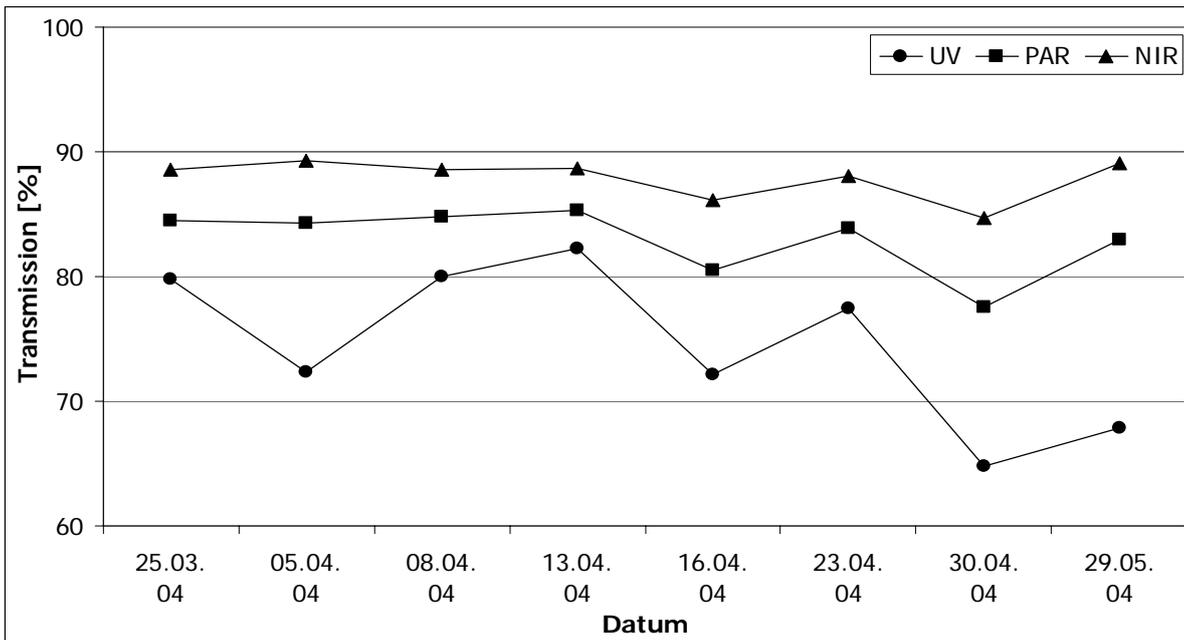


Abb. 4.2.1-13: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D9-NF803-10-04 im Versuchszeitraum 2004 in den untersuchten Spektralbereichen

4.2.2 Attenuierte Totalreflexion (ATR)

Mittels der attenuierten Totalreflexion (ATR) sollte festgestellt werden, ob eine Veränderung der molekularen Zusammensetzung der Folienoberflächen durch Bewitterung und Kompostierung im Laufe der Expositionszeit feststellbar war und diese Methode zur Bewertung des Abbaugrades der Biofolien herangezogen werden kann. Dazu wurden Folienproben sowohl aus Bewitterungs- und Kompostierungsversuchen, als auch aus dem Freilandversuch 2003 entnommen und analysiert. Im Folgenden soll über einen Spektrenvergleich unbenutzter Proben eine kurze stoffliche Analyse der Folienzusammensetzungen erfolgen und abschließend die Änderungen der mittleren Transmission der Bereiche über 1500 cm^{-1} und unter 1500 cm^{-1} (Fingerprintbereich) im zeitlichen Verlauf der Expositionszeit interpretiert werden. Die vollständigen Messergebnisse der Kompostierungs- und Bewitterungsversuche sind in den Abbildungen A-36 bis A-47 im Anhang grafisch dargestellt.

Unbenutzte Folienproben

In der Abbildung 4.2.2-1 sind die ATR-Spektren unbenutzter Proben der konventionellen Folien D0 und M0, sowie der biologisch abbaubaren Folien D5 und M5 dargestellt. Beim Vergleich der ATR-Spektren sind Unterschiede zwischen den einzelnen Folienvarianten zu erkennen. Die konventionellen Folien D0 und M0 zeigten im gesamten gemessenen Wellenzahlbereich wenige scharfe Peaks, während die biologisch abbaubaren Folien hauptsächlich im Fingerprint-Bereich ($< 1500\text{ cm}^{-1}$) eine eng beieinanderliegende Vielzahl von Banden aufwiesen. Damit lassen sich die beiden Materialklassen mittels der attenuierten Totalreflexion eindeutig voneinander differenzieren. Ebenso scheinen die Oberflächen der Biofolien aus Stoffen mit geringerer Bindungsenergie zu bestehen.

Die beiden konventionellen Folien zeigten starke Absorptionen in den Wellenzahlbereichen der CH-, CH₂- und CH₃-Gruppen zwischen 3000 cm^{-1} und 2850 cm^{-1} (siehe Tabelle 3.3-7), deren Ansatz auch bei den Biofolien erkennbar war (siehe auch Abb. A-40 bis A-47). Im Absorptionsbereich der C-Dreifachbindungen von 2300 cm^{-1} bis 2050 cm^{-1} (Tab 3.3-7) war bei allen untersuchten Proben ein Doppelpeak mit einer

Transmissionsminderung von ca. 10-15 % zu erkennen, der in seiner Intensität nur bei den Biofolien D5, M4 und M5 durch Bewitterung beeinflusst wurde.

Im Absorptionsbereich C=O Doppelbindungen $1830 - 1650 \text{ cm}^{-1}$ zeigten alle untersuchten Folien, ausgenommen M0, einen scharfen Peak bei einer Wellenzahl von ca. 1740 cm^{-1} bis 1708 cm^{-1} . Dieser könnte von Carbonyl-Gruppen stammen, die sowohl im EVA der konventionellen Flachfolie, als auch im Polycaprolacton der Biofolien zu finden sind (BRIASSOULIS et al., 2004) (FEUILLOLEY et al., 2005).

Beim Vergleich der konventionellen Folien fallen die vermehrte Anzahl von scharfen Peaks im Bereich der Absorptionsbanden der Acetat-Gruppen (GÜNZLER, 1998) bei 1368 cm^{-1} und bei 1238 cm^{-1} im Fingerprintbereich der EVA-Flachfolie D0 auf, was wahrscheinlich auf die Copolymerisation von Ethylen mit Vinylacetat zurückzuführen ist. Die PE-Folien zeigten gemeinsam bei 1470 cm^{-1} eine scharfe Bande, die, ebenso wie die bei allen Materialien zu findende Bande bei 720 cm^{-1} , auf die Anwesenheit von CH_2 - und CH_3 -Gruppen (GÜNZLER, 1998; FEUILLOLEY et al., 2005) zurückgeführt werden kann.

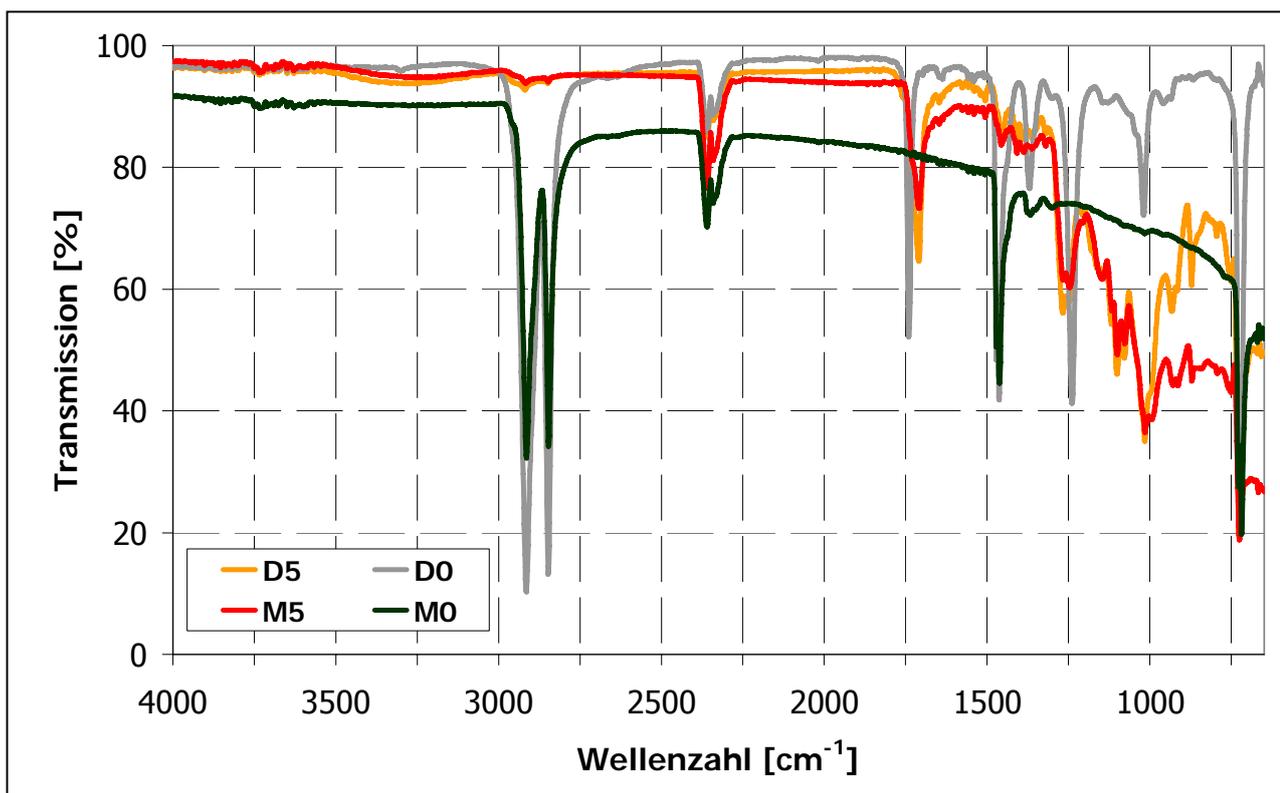


Abb. 4.2.2-1: ATR-Spektren von unbenutzten Proben der Folienvarianten D0 und M0, sowie D5 und M5.

Alle Proben, ausgenommen die konventionelle Mulchfolie M0, wiesen im Fingerprintbereich einen Peak bei 1014 cm^{-1} auf, wo der Absorptionsbereich der C-Einfachbindungen zu finden ist (GOTTWALD et al., 1997).

Bei den biologisch abbaubaren Mulchfolien war eine breite und sehr flache Bande bei 3200 cm^{-1} zu erkennen, die nach SCARASCIA-MUGNOZZA et al. (2006) auf die Anwesenheit von Stärke an den Folienoberflächen hinweisen könnte. BASTIOLI (2005) gibt für die Schwingungen von Stärkeringen einen Bereich von 960 cm^{-1} bis 920 cm^{-1} an, wo die biologisch abbaubaren Folien einen kleinen Peak aufwiesen.

Bei der schwarzen Mulchfolie M0 konnte zu Beginn der Messreihen im gesamten Untersuchungsbereich eine deutlich abgesunkene Basislinie festgestellt werden, die über die Versuchsdauer mit zunehmender Beeinflussung eine nachlassende Tendenz zeigte (siehe Anhang Abb. A-38 und A-39). Bei den biologisch abbaubaren Mulchfolien konnte, besonders im Wellenzahlbereich unter 1000 cm^{-1} , ebenfalls ein Absinken der Basislinie festgestellt werden. Oberhalb von 1000 cm^{-1} lagen die Werte allerdings nur wenig unter denen der biologisch abbaubaren Flachfolien.

Exponierte Folienproben

In den Abbildungen 4.2.2-2 und 4.2.2-3 sind die mittleren Transmissionen aller Folienproben vom Bewitterungs- und Kompostierungsversuch im zeitlichen Verlauf dargestellt. Dabei ließen sich bei allen Folienvarianten mit fortschreitender Versuchsdauer zunehmende Transmissionswerte erkennen. Besonders deutlich zeigte sich dieser Effekt im Fingerprintbereich, da hier, besonders bei den Biofolien, die meisten Absorptionsbanden festgestellt wurden.

Bei den kompostierten Folienproben wurden hohe Transmissionszuwächse in den ersten beiden Wochen der Expositionszeit und anschließend eine anhaltend hohe Transmission festgestellt. Dies lässt auf eine starke Veränderung der Folienoberfläche schließen. Ausnahmen dieser Messreihe waren die konventionellen Folien M0 und D0. Bei D0 wurden zwar nur geringe Erhöhungen der Transmission errechnet, was nach Betrachtung der Messergebnisse im Anhang (Abb. A-36 und A-37) auch auf eine eindeutige Verkürzung der wenigen scharfen Absorptionsbanden zurückzuführen war. Ähnlich waren die Verhältnisse bei der Mulchfolie M0, wo der Rückgang der Fläche unter der Kurve hauptsächlich auf das Anheben der Basislinie zurückzuführen war. Eine

deutliche Verkürzung der wenigen Peaks lässt sich, wie schon bei D0, auch bei dieser Variante feststellen.

Bei den bewitterten Folienproben war der Anstieg der Transmission langsamer und das Endniveau nicht so hoch, wie bei den kompostierten Proben. Es konnte jedoch eine höhere Streuung der Werte, vor allem bei der Flachfolie D4, beobachtet werden.

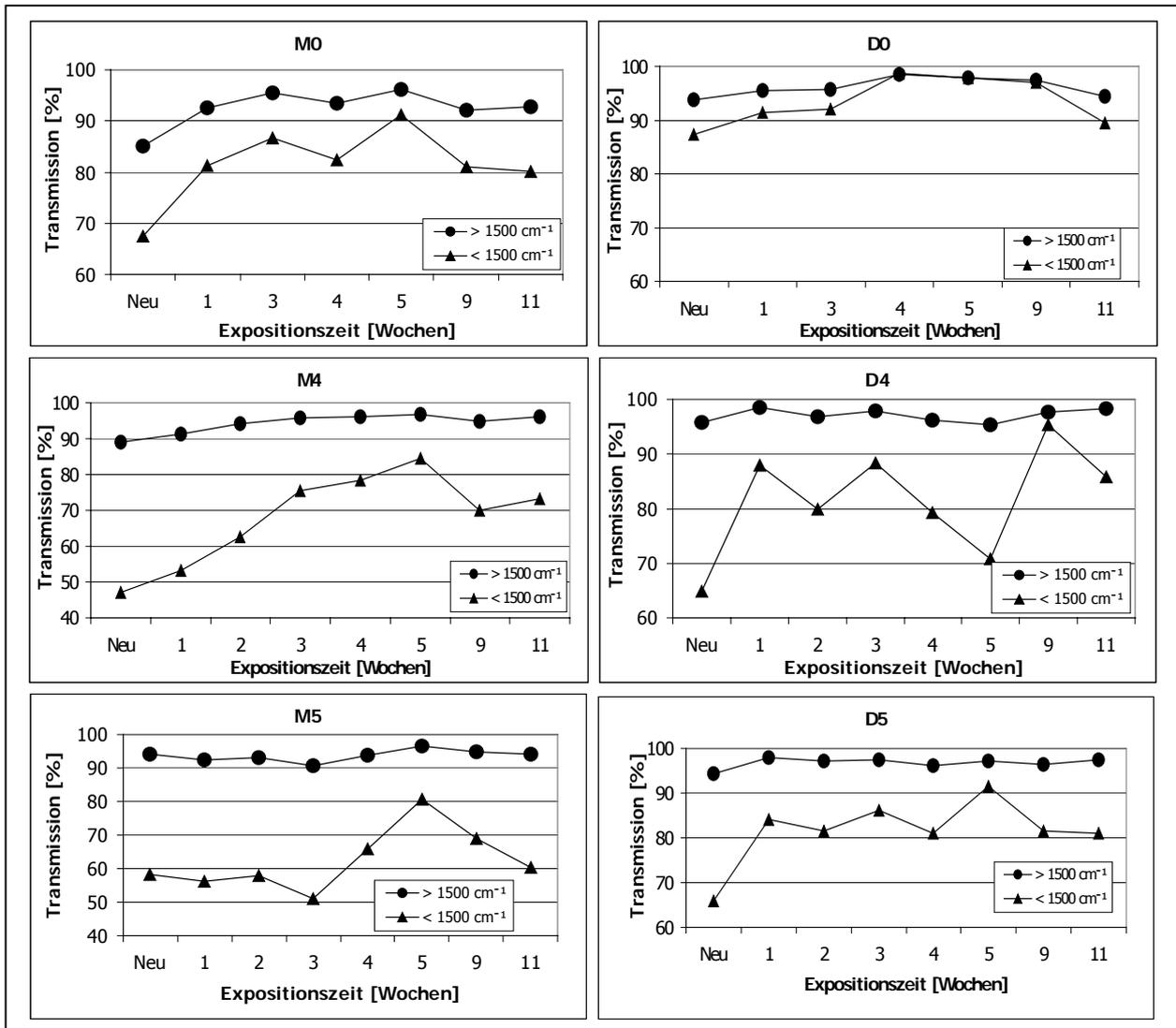


Abb. 4.2.2-2: Mittlere Transmission der ATR-Kurven oberhalb und unterhalb von 1500 cm⁻¹ aller Untersuchungsmaterialien vom Bewitterungsversuch im Laufe der Expositionszeit

Zusätzlich zeigten die Bewitterungsproben in allen Messreihen einen „Erholungseffekt“: Nach Versuchsbeginn stieg die Transmission zunächst an und ging aber zum Versuche hin wieder zurück. Die Kurven mit der höchsten Transmission wurden in den meisten Fällen nach 5 Wochen Expositionszeit gemessen, ausgenommen bei den insgesamt abweichenden Ergebnissen der Flachfolie D4, wo nach 9 Wochen

Bewitterung die höchste Transmission festgestellt wurde. Erneut zeigte die konventionelle Flachfolie D0 von allen untersuchten Varianten die geringsten Veränderungen in der Transmission.

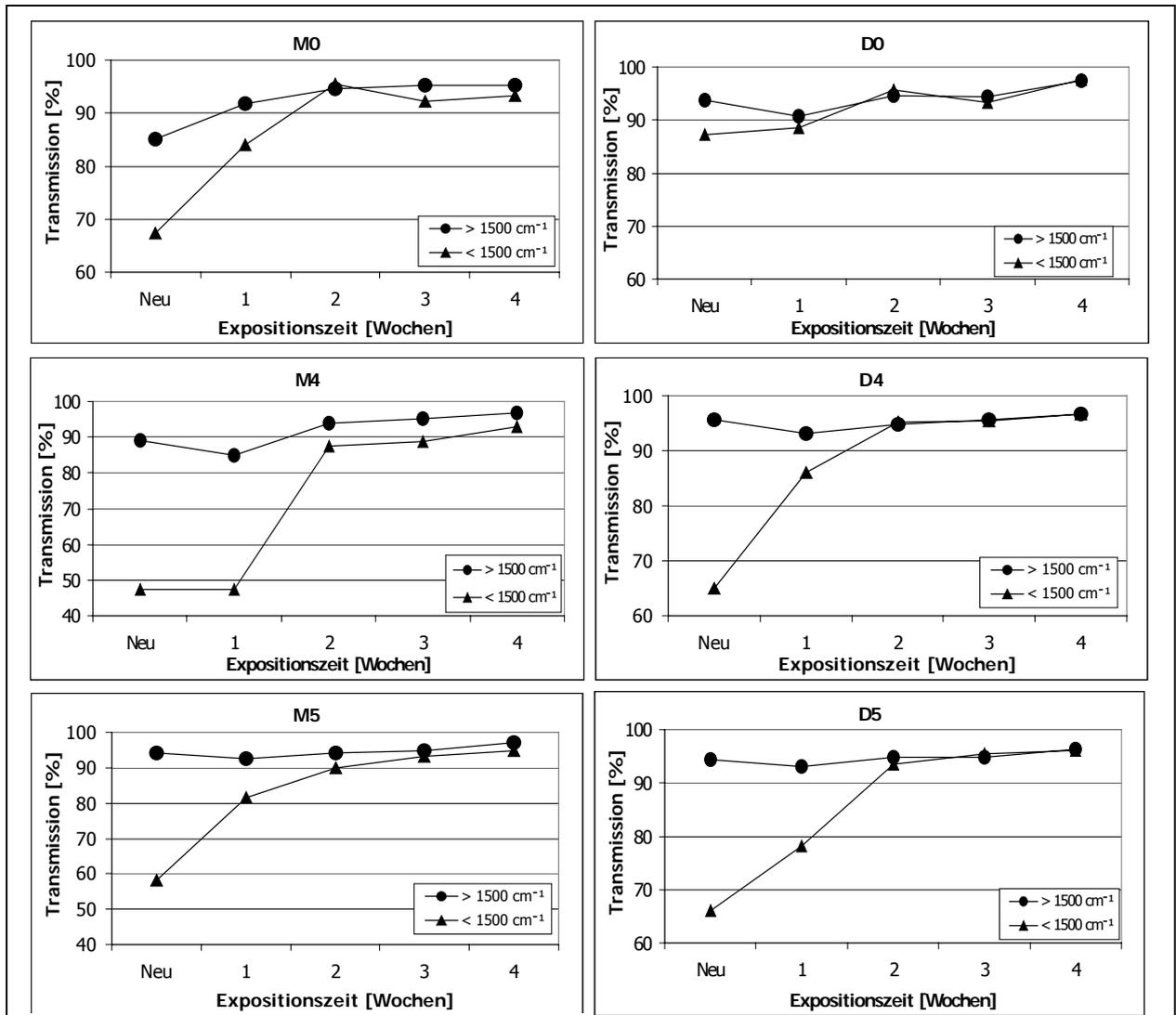


Abb. 4.2.2-3: Mittlere Transmission der ATR-Kurven oberhalb und unterhalb von 1500 cm^{-1} aller Untersuchungsmaterialien vom Kompostierungsversuch im Laufe der Expositionszeit

Die Messungen der Mulchfolienproben aus dem Freilandversuch 2003 sind in den Abbildungen A-48 und A-49 dargestellt. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Ergebnissen zeigten sich nach 11 Wochen Expositionsdauer geringere Erhöhungen der Transmission gegenüber den unbenutzten Folienproben. Die IR-Spektren lagen bei den beiden Folien bei variabler Reihenfolge nah beieinander, womit keiner Beeinflussung ein besonders starker Effekt zugewiesen werden konnte.

4.2.3 Wasserdampfdurchlässigkeit

Von Juli bis September 2005 wurden in einem Kühlraum des BGT Versuche zur Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit (WDD) von biologisch abbaubaren Folien durchgeführt. Die zu untersuchenden Folien (siehe Tabelle 3.3-3) wurden in einem Messstand simulierten Freilandbedingungen mit Tag- und Nachtphasen ausgesetzt. Dabei wurden neben der durch die Folien durchtretenden Wasserdampfmenge auch die Klimawerte der Raumluft bestimmt.

Aus den Messergebnissen wurde die Wasserdampfdurchlässigkeit P_{WDD} [$\text{g}/(24 \text{ h} \cdot \text{m}^2)$] des jeweiligen Versuchsmaterials berechnet. Ausgehend von diesen Werten wurden die Permeationskoeffizienten (P_{WD}) in Abhängigkeit von der Materialdicke $P_{WD}(\mu\text{m})$ [$\text{g}/(24 \text{ h} \cdot \text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$], vom Temperaturunterschied $P_{WD}(\Delta t)$ [$\text{g}/(24 \text{ h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K})$] und Wasserdampfpartialdruckdifferenz $P_{WD}(\Delta PD)$ [$\text{g}/(24 \text{ h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hPa})$] zwischen der Variante und Raumluft ermittelt.

Für die Mulchfolien aus NF01U/P und die Flachfolien aus NF803 wurde zusätzlich mittels Bestimmtheitsmaß und Trendlinienermittlung versucht, funktionelle Zusammenhänge zwischen den Permeationskoeffizienten und der Materialdicke zu errechnen. Die Ergebnisse sind, nach Folienart und Ausgangsmaterial sortiert, im Folgenden für die Tag- und Nachtphasen vergleichend dargestellt.

Mulchfolien

In Abbildung 4.2.3-1 sind die Tag- und Nachtwerte der Wasserdampfdurchlässigkeit [$\text{g}/(24 \text{ h} \cdot \text{m}^2)$] aller Versuchs-Mulchfolien und der Nullvariante dargestellt. Zur besseren Differenzierung sind auf der Rubrikenachse die beiden Ausgangsgranulate und die Kontrollwerte gekennzeichnet, wobei die vergleichsweise hohen Werte der Nullvariante auf der Sekundärachse aufgetragen sind. In der Grafik sind Unterschiede in der Wasserdampfdurchlässigkeit zwischen den biologisch abbaubaren Folien und den Kontrollen zu erkennen. Die Wasserverluste der Nullvariante lagen um ein Vielfaches über denen der Versuchsvarianten, während die PE-Folie die geringsten Werte aufwies. Bei den biologisch abbaubaren Folien waren die Tagwerte zum Teil deutlich höher als die Nachtwerte und zeigten eine größere Streuung.

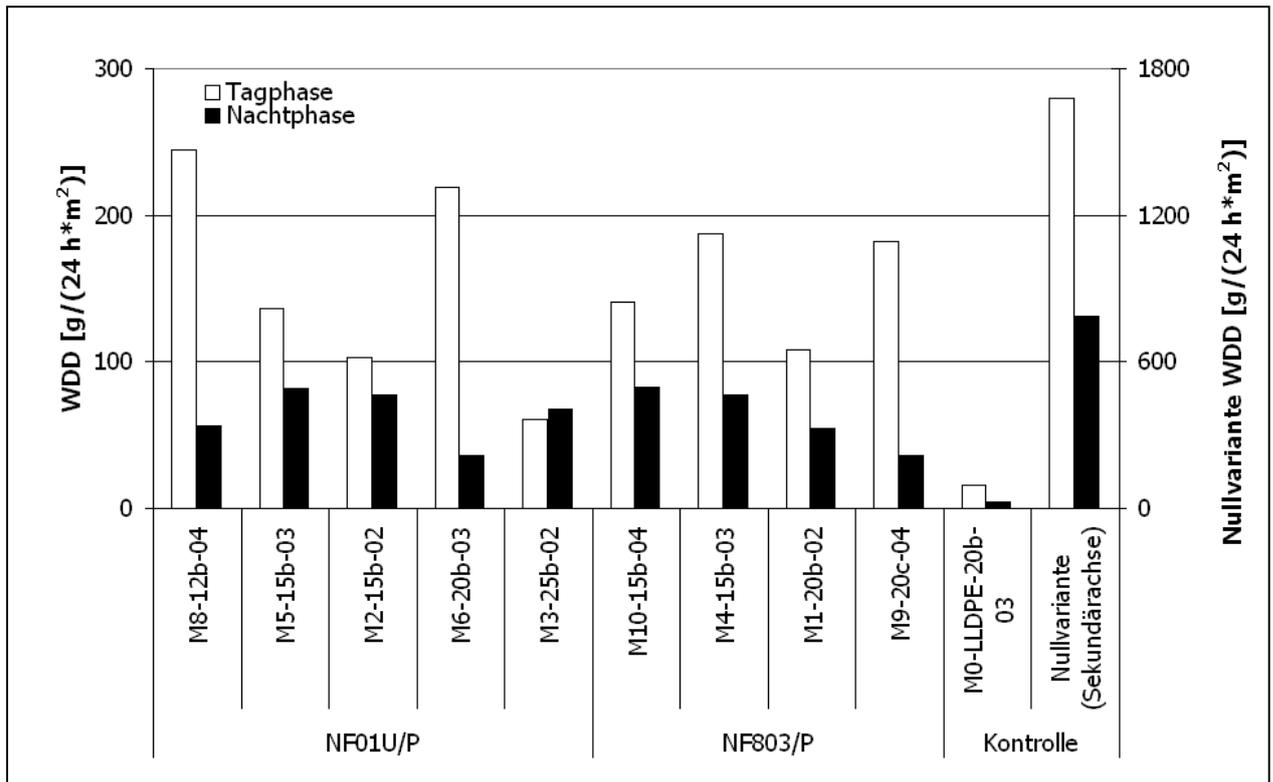


Abb.4.2.3-1: Wasserdampfdurchlässigkeit [g/(24 h*m²)] der Mulchfolien in den Tag- und Nachtphasen im Vergleich mit den Kontrollvarianten

Eine Ausnahme hierbei ist die Folie M3, wo die Nachtwerte geringfügig höher waren, als die Tagwerte. Bei den Tagwerten der Folien aus NF01U/P war eine abnehmende WDD bei zunehmender Foliendicke festzustellen, ausgenommen die 20 µm starke Folie M6, die einen unerwartet hohen Tageswert im Vergleich zu den anderen Folien desselben Granulates zeigte.

Die Tagwerte von NF803/P wiesen, obwohl nur zwei unterschiedliche Foliendicken vorlagen, Resultate mit einer hohen Schwankungsbreite auf. Die beiden 15 µm starken Folien unterschieden sich in ihren Tagwerten um 40 g/(24 h*m²), bei den 20 µm Folien war die Differenz fast doppelt so groß. Eine paarweise Unterscheidung nach der Foliendicke war nicht möglich. Bei den Nachtwerten der Folienpaare waren Unterschiede feststellbar und die WDD-Werte der 15 µm-Folien waren höher, als die der 20 µm-Folien, womit eine paarweise Unterscheidung erkennbar war.

Zur Untersuchung ob die Materialdicke der Versuchsvariante einen Einfluß auf die WDD hatte, wurden die Permeationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Materialdicke bestimmt. Die Ergebnisse sind für alle Versuchsfolien und Kontrollvarianten in Abbildung 4.2.3-2 dargestellt.

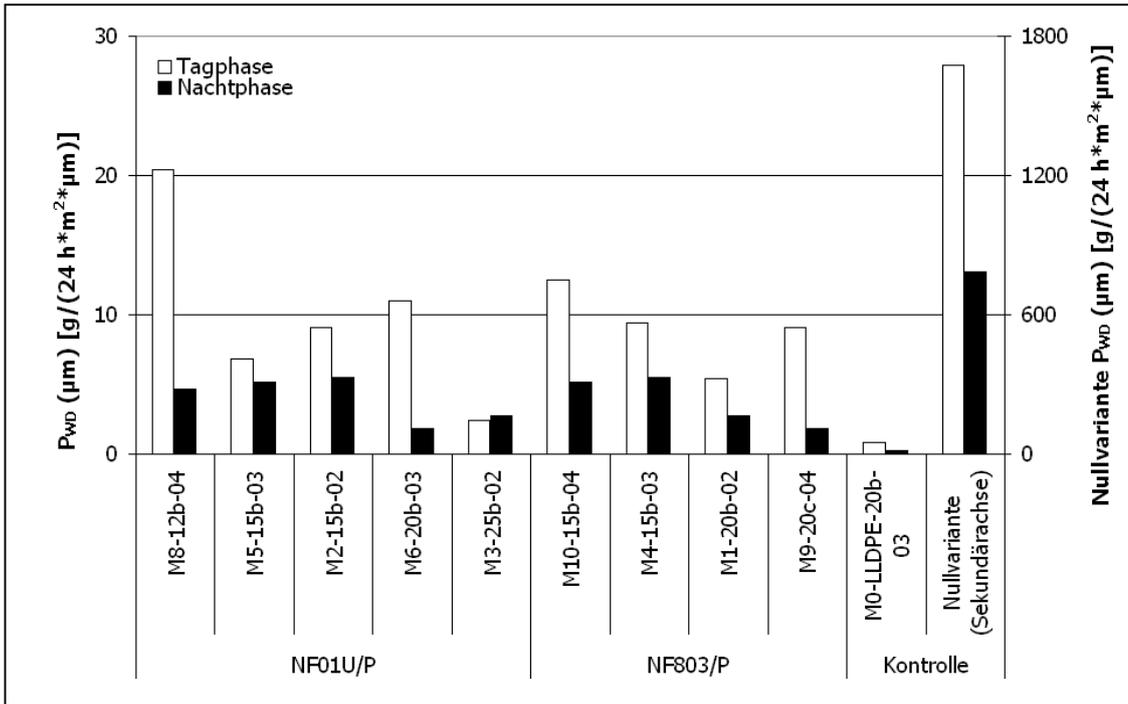


Abb.4.2.3-2: Permeationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Materialdicke P_{WD} (μm) [g/(24 h*m²* μm)] der Mulchfolien in den Tag- und Nachtphasen im Vergleich mit den Kontrollvarianten

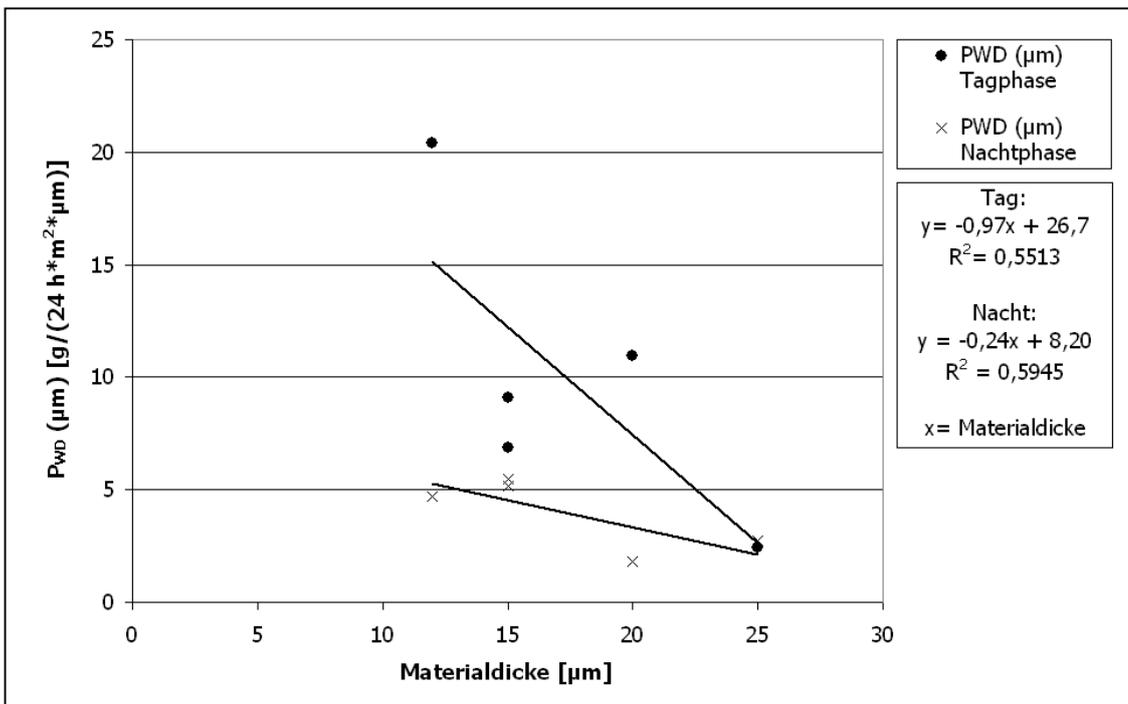


Abb.4.2.3-3: Funktionelle Zusammenhänge der Permeationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Materialdicke P_{WD} (μm) [g/(24 h*m²* μm)] der Mulchfolien aus dem Granulat NF01U/P in den Tag- und Nachtphasen

Für beide Mulchfoliengruppen wurde erneut eine höhere Streuung der Tagwerte im Vergleich zu den Nachtwerten festgestellt. Die Tag- und Nachtwerte der konventionellen Kontrolle lagen mit einer P_{WD} (μm) von unter $1 \text{ g}/(24 \text{ h}\cdot\text{m}^2\cdot\mu\text{m})$ deutlich unterhalb der Werte der biologisch abbaubaren Mulchfolien.

Bei den 15 und 20 μm Folienpaaren aus dem Granulat NF803/P wurde bei Tagwerten von 9-12 $\text{g}/(24 \text{ h}\cdot\text{m}^2\cdot\mu\text{m})$ bei den 15 μm Folien und 5-9 $\text{g}/(24 \text{ h}\cdot\text{m}^2\cdot\mu\text{m})$ bei den 20 μm Folien eine Tendenz zur Paarbildung erkennbar. Bei den Nachtwerten war mit 5-6 $\text{g}/(24 \text{ h}\cdot\text{m}^2\cdot\mu\text{m})$ bei den 15 μm Folien und 2-3 $\text{g}/(24 \text{ h}\cdot\text{m}^2\cdot\mu\text{m})$ der 20 μm Folien eine Paarbildung erkennbar.

Die Mulchfolien aus dem Granulat NF01U/P werden in Abbildung 4.2.3-3 auf einen funktionellen Zusammenhang hin genauer untersucht. Über die ermittelten Trendlinien konnte für die Tag- und Nachtwerte eine funktionelle Abhängigkeit der WDD von der Materialdicke abgeschätzt werden. Diese war in der Tagphase mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,5513$ geringfügig niedriger, als in der Nachtphase mit einem Wert von $R^2 = 0,5945$.

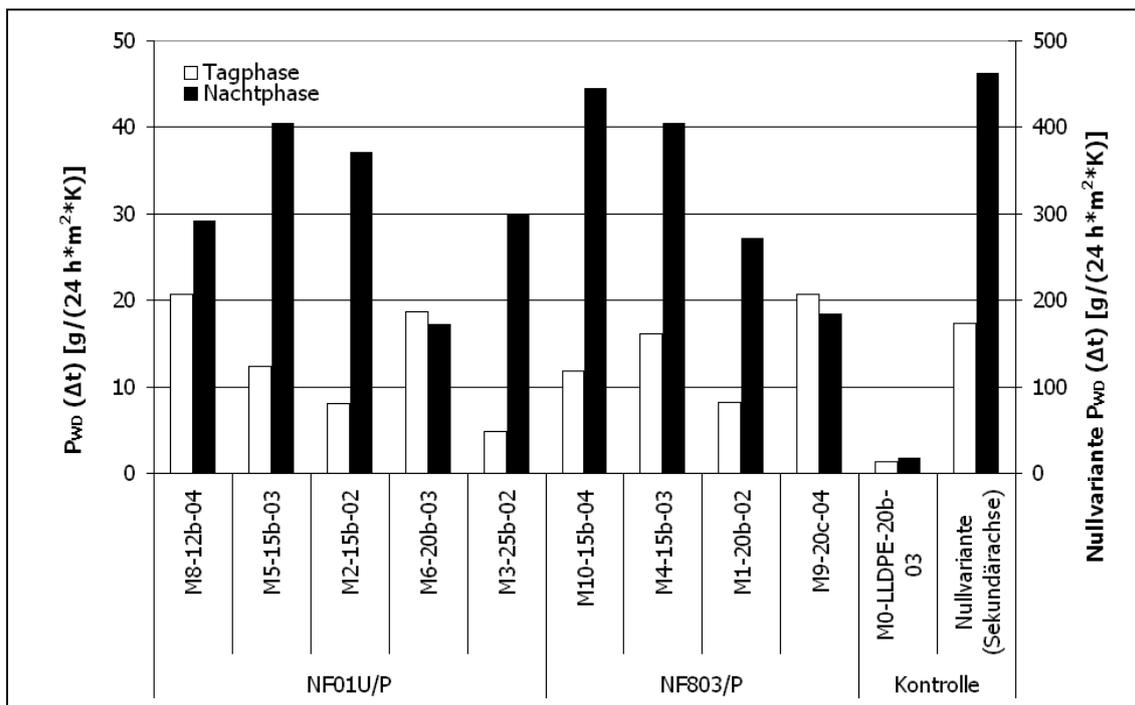


Abb.4.2.3-4: Permeationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz P_{WD} (Δt) [$\text{g}/(24 \text{ h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K})$] der Mulchfolien in den Tag- und Nachtphasen im Vergleich mit den Kontrollvarianten

Die Permeationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen der Variante und der Raumluft ($P_{WD}(\Delta t)$), dargestellt in Abb. 4.2.3-4, lagen bei den biologisch abbaubaren Versuchsfolien in der Nachtphase höher, als in der Tagphase, ausgenommen die schwarze Mulchfolie M3 und die grün-transparent gefärbte Mulchfolie M9, die beide leicht höhere Tagwerte aufwiesen.

Die Mulchfolien aus NF803/P zeigten in der Tagphase Werte, die nicht auf eine Abhängigkeit von der Foliendicke hinwiesen. In der Nachtphase hingegen war mit Werten um $40 \text{ g}/(24 \text{ h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K})$ bei den $15 \mu\text{m}$ Folien und $27\text{-}18 \text{ g}/(24 \text{ h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K})$ bei den $20 \mu\text{m}$ Folien eine dickeabhängige Werteverteilung zu erkennen.

Die Mulchfolien aus NF01U/P ließen in beiden Meßphasen keine funktionelle Abhängigkeit der Permeationskoeffizienten von der Foliendicke erkennen. Die Trendlinienermittlung in Abbildung 4.2.3-5 ließ mit R^2 von $0,153$ für die Tagphase und $0,2986$ in der Nachtphase diese Schlussfolgerung zu.

Die konventionelle Mulchfolie M0 lag mit Werten von $3 \text{ g}/(24 \text{ h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K})$ unterhalb der biologisch abbaubaren Folien. Die Nullvariante zeigte erneut in beiden Meßphasen zum Teil zehnfach überhöhte Werte als die Folienvarianten.

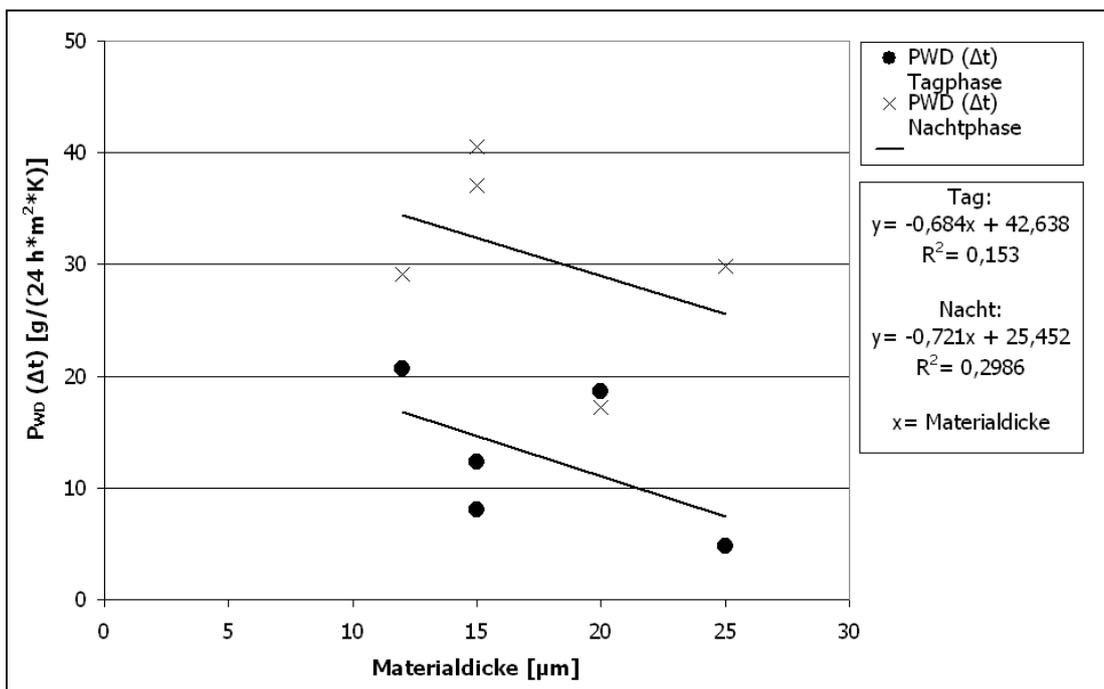


Abb.4.2.3-5: Funktionelle Zusammenhänge der Permeationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz $P_{WD}(\Delta t) [\text{g}/(24 \text{ h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K})]$ der Mulchfolien aus dem Granulat NF01U/P in den Tag- und Nachtphasen

Der Permeationskoeffizient in Abhängigkeit der Wasserdampfdruckdifferenz zwischen Variante und Umgebung P_{WD} (ΔPD) für die Mulchfolien für die Tag- und Nachtphasen ist in Abbildung 4.2.3-6 dargestellt.

Die Tag- und Nachtwerte der konventionellen Mulchfolie M0 variierten um $12 \text{ g}/(24 \text{ h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hPa})$ voneinander. Der Permeationskoeffizient P_{WD} (ΔPD) für den Tagwert lag damit auf einem Niveau mit den Nachtwerten der biologisch abbaubaren Folien.

Bei den Mulchfolien aus NF803/P war bei den Tagwerten durch die hohe Streuung der Werte keine Abhängigkeit von der Foliendicke zu erkennen. Die Nachtwerte hingegen zeigten mit Werten von $13 \text{ g}/(24 \text{ h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hPa})$ bei den $15 \mu\text{m}$ -Folien und 10 und $6 \text{ g}/(24 \text{ h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hPa})$ bei den $20 \mu\text{m}$ -Folien eine Abhängigkeit von der Foliendicke auf. Die grün-transparente Mulchfolie M9 zeigte erneut im Vergleich niedrige Tag- und Nachtwerte, die sich nur wenig voneinander unterschieden.

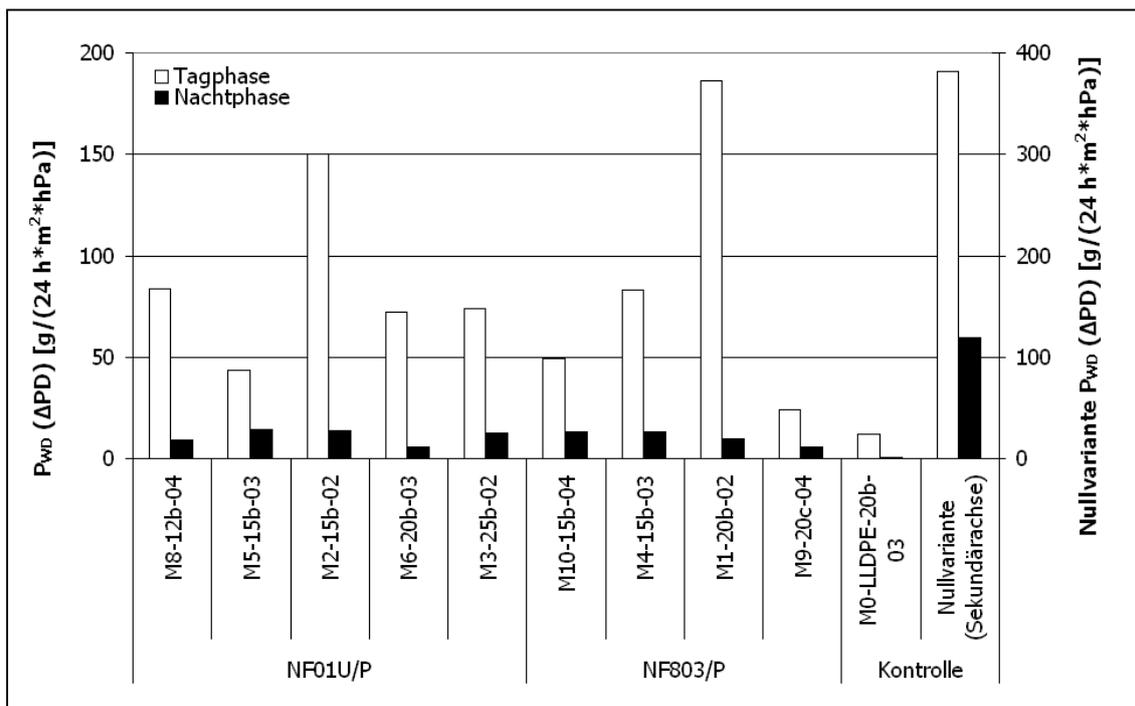


Abb.4.2.3-6: Permeationskoeffizienten der Mulchfolien in Abhängigkeit von der Wasserdampfdruckdifferenz P_{WD} (ΔPD) [g/(24 h * m² * hPa)] in der Tag- und Nachtphase im Vergleich mit den Kontrollvarianten

Bei den beiden $15 \mu\text{m}$ starken NF01U/P-Mulchfolien war eine große Differenz zwischen den Tagwerten zu verzeichnen, während die Werte der übrigen Mulchfolien desselben Granulates um die $80 \text{ g}/(24 \text{ h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hPa})$ lagen. Bei den Nachtwerten konnten nur geringe Unterschiede zwischen den Varianten erkannt werden. Bei der Untersuchung

auf einen funktionellen Zusammenhang zwischen P_{WD} (ΔPD) und der Foliendicke in Abbildung Abb.4.2.3-7 konnte für die Mulchfolien aus dem Granulat NF01U/P keine lineare Abhängigkeit festgestellt werden.

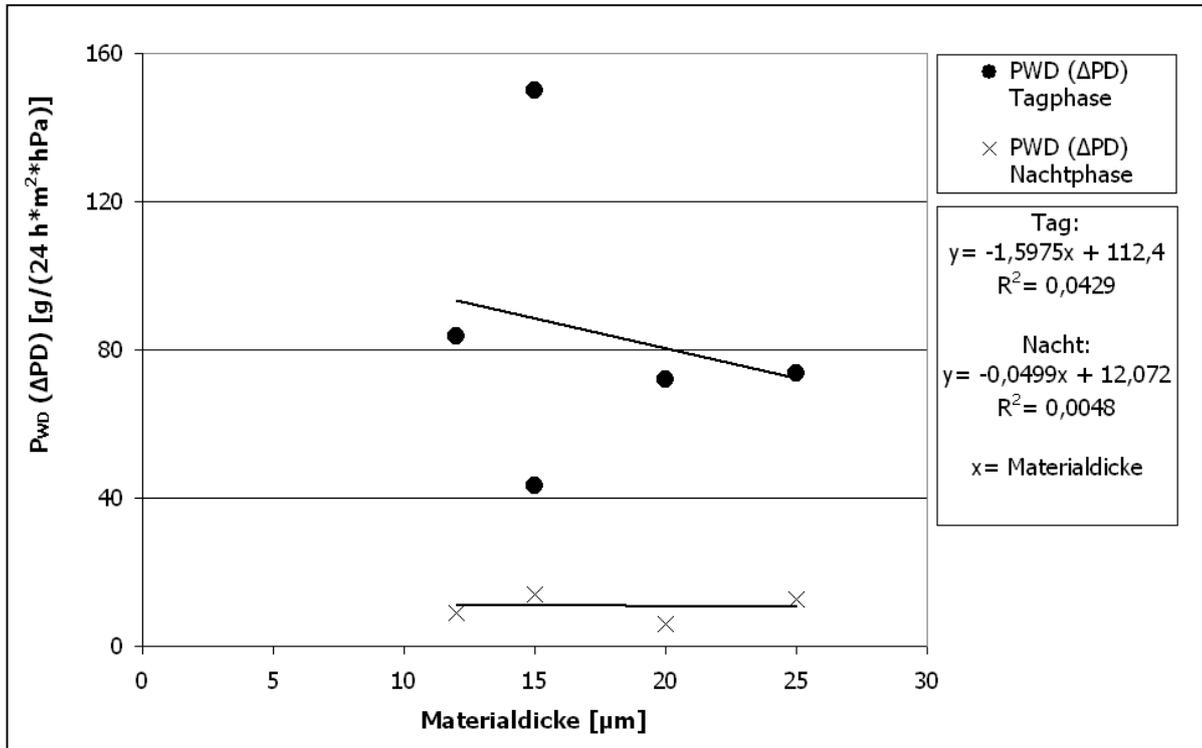


Abb.4.2.3-7: Funktionelle Zusammenhänge der Permeationskoeffizienten der Mulchfolien aus dem Granulat NF01U/P in Abhängigkeit von der Wasserdampfdruckdifferenz P_{WD} (ΔPD) [g/(24 h*m²*hPa)] in der Tag- und Nachtphase

Flachfolien

Bei den Wasserdampfdurchlässigkeiten der Flachfolien in Abbildung 4.2.3-8 fällt auf, daß die biologisch abbaubaren Folien, wie schon zuvor die Mulchfolien, wesentliche Unterschiede zu den Werten der Kontrollen aufwiesen.

Bei den beiden Flachfolien D8 und D5 aus dem Granulat NF01U wurde bei den Tageswerten eine deutliche dickeabhängige Differenz der WDD gemessen. Bei der 20 μm Folie D5 war diese um mehr als die Hälfte geringer, als bei der 12 μm Folie D8. In den Nachtmessungen wurde ein geringerer Unterschied zwischen den beiden Folien festgestellt. Bei den NF803-Folien war eine so deutliche Unterscheidung nicht erkennbar. In der Tagphase lagen die Werte der dünneren Folien D9, D7 und D4 über 200 g/(24 h*m²) und die Werte der dickeren Folien D1 und D10 knapp darunter. Die

Nachtphase zeigte eine annähernd dickeabhängige Verteilung der Durchlässigkeiten. Bei den 10 und 12 μm Folien D9 und D7 hatten Werte über $100 \text{ g}/(24 \text{ h}\cdot\text{m}^2)$, die 15 und 20 μm Folien D4 und D1 lagen knapp unter $100 \text{ g}/(24 \text{ h}\cdot\text{m}^2)$ und die 30 μm Folie D10 zeigte mit ca. $50 \text{ g}/(24 \text{ h}\cdot\text{m}^2)$ die geringste WDD. Die Flachfolie D5 wies im Vergleich die geringsten Tageswerte aller biologisch abbaubaren Varianten auf. Bei den Nachtwerten wurden bei der 30 μm starken Flachfolie D10 die geringsten Werte gemessen.

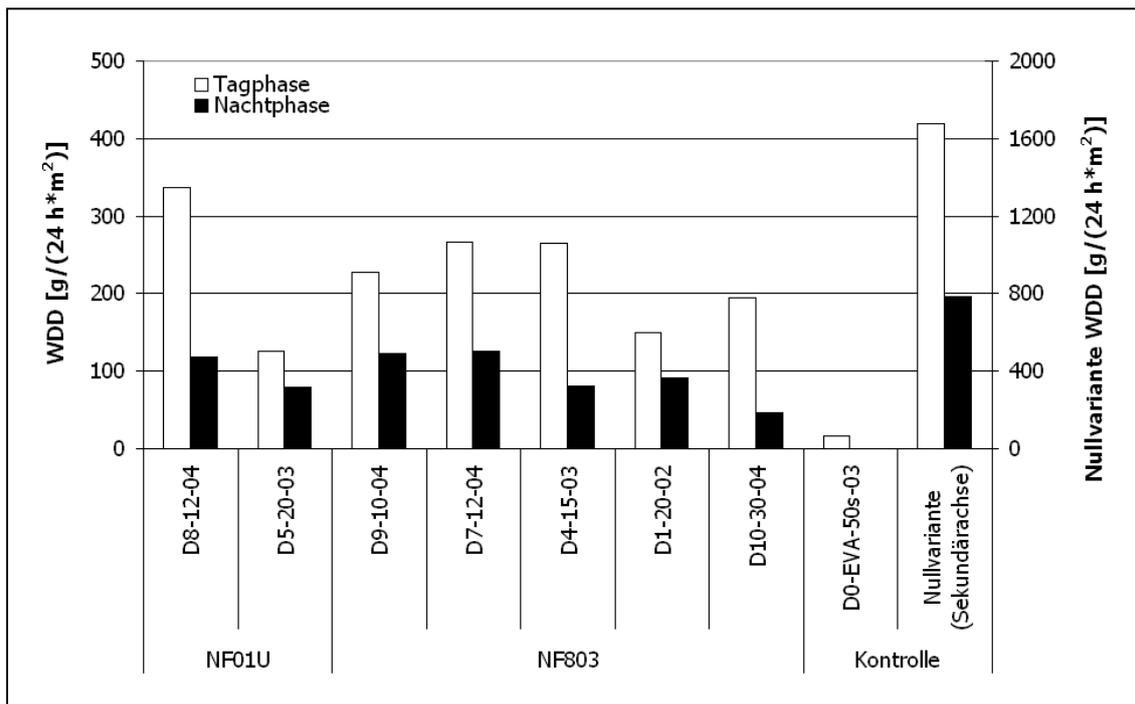


Abb.4.2.3-8: Wasserdampfdurchlässigkeit [$\text{g}/24 \text{ h}\cdot\text{m}^2$] der Flachfolien in den Tag- und Nachtphasen im Vergleich mit den Kontrollvarianten

Die berechneten Permeationskoeffizienten P_{WD} (μm) in Abhängigkeit von der Materialdicke der Flachfolien sind in Abbildung 4.2.3-9 dargestellt. Die Werte der Kontrollfolie D0 lagen in beiden Meßphasen unterhalb der P_{WD} (μm) der biologisch abbaubaren Vergleichsfolien. Die Werte der Nullvariante lagen in beiden Meßphasen um ein Vielfaches höher. Bei den Flachfolien aus dem Granulat NF01U war erwartungsgemäß die P_{WD} (μm) der dickeren 20 μm -Folie geringer, als die der dünneren 12 μm -Folie.

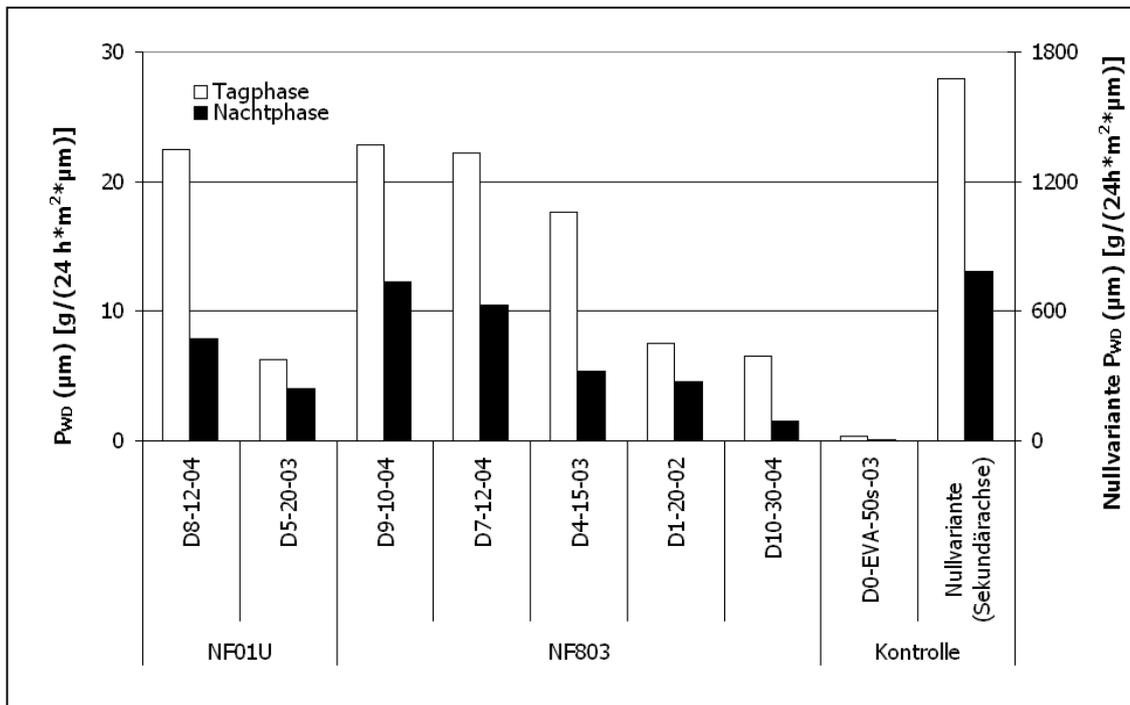


Abb.4.2.3-9: Permeationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Materialdicke P_{WD} (μm) [g/(24 h*m²* μm)] der Flachfolien in den Tag- und Nachtphasen mit den Kontrollvarianten

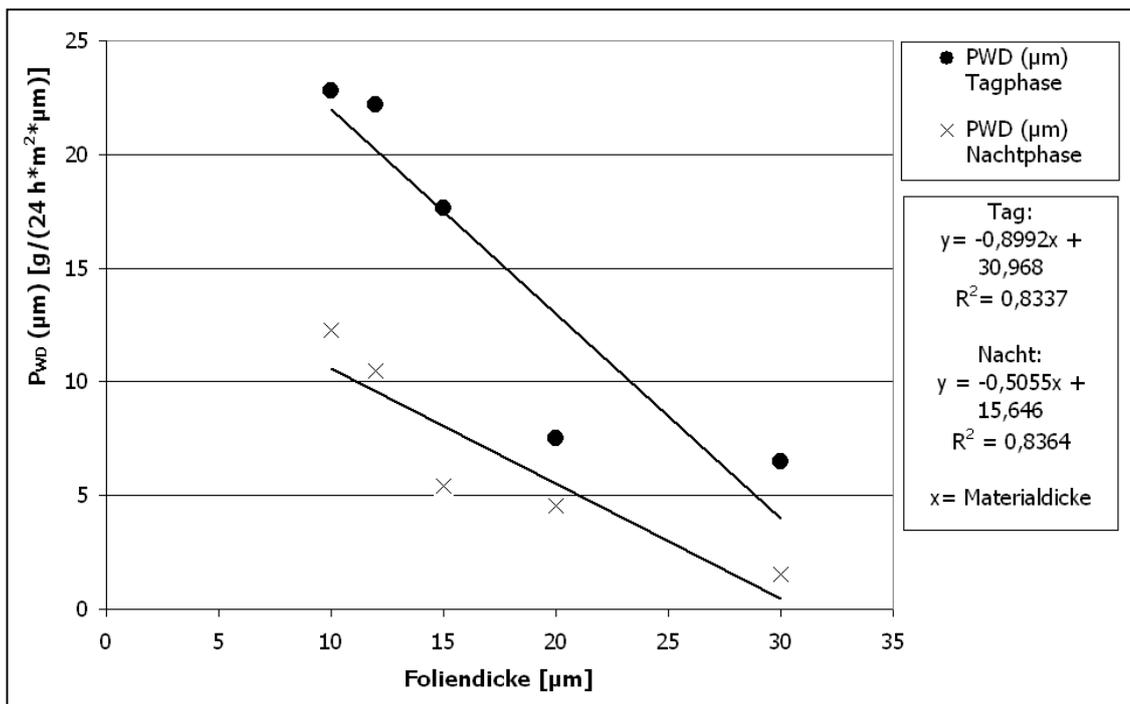


Abb.4.2.3-10: Funktionelle Zusammenhänge der Permeationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Materialdicke P_{WD} (μm) [g/(24 h*m²* μm)] der Flachfolien aus dem Granulat NF803 in den Tag- und Nachtphasen

Die Flachfolien aus NF803 zeigten in beiden Meßphasen mit zunehmender Dicke geringere Werte und, wie in Abbildung 4.2.3-10 zu erkennen, kann mit einer hohen Wahrscheinlichkeit auf einen funktionellen Zusammenhang zwischen der Materialart und der Foliendicke geschlossen werden. Dies gilt für die Tag- ($R^2 = 0,8337$) und auch für die Nachtwerte ($R^2 = 0,8364$).

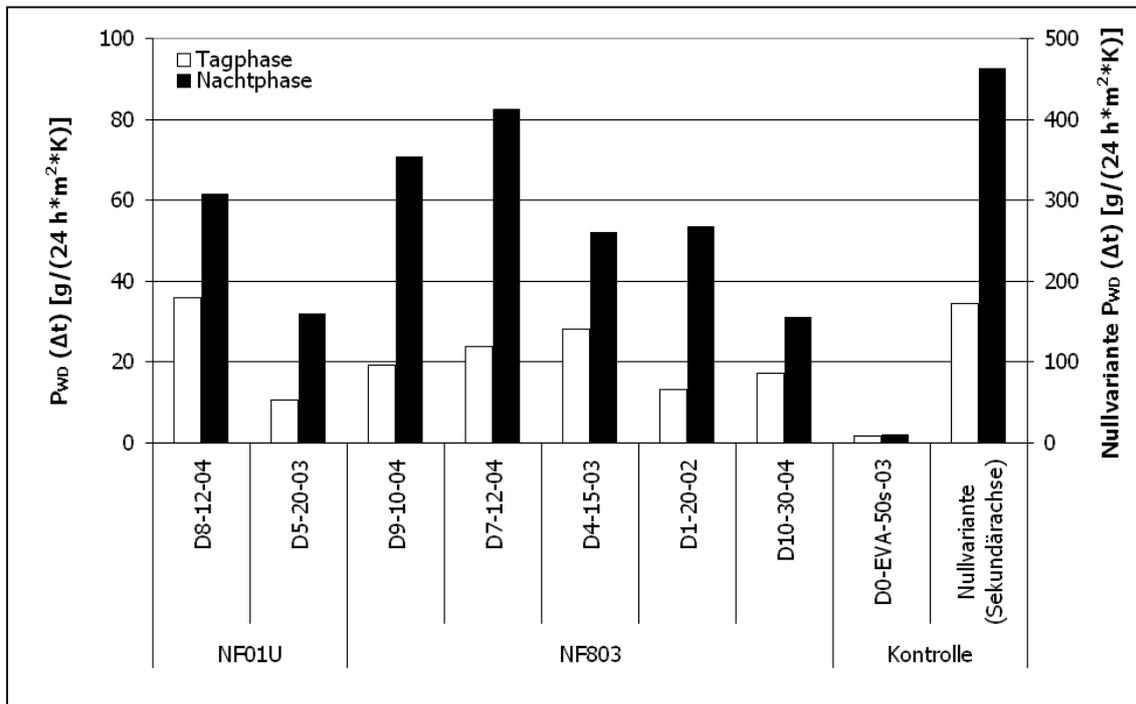


Abb.4.2.3-11: Permeationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz $P_{WD} (\Delta t)$ [g/(24 h*m²*K)] der Flachfolien in den Tag- und Nachtphasen im Vergleich mit den Kontrollvarianten

Die Permeationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Variante und Raumluft $P_{WD} (\Delta t)$ für die untersuchten Flachfolien sind in Abb. 4.2.3-11 dargestellt. Die Werte der konventionellen Kontrolle lagen mit knapp 2 g/(24h*m²*K) deutlich unterhalb denen der biologisch abbaubaren Folien. Erneut lag die Nullvariante mit ihren Meßwerten um ein Vielfaches oberhalb aller Ergebnisse der Folien. Bei den Varianten D8 und D5, bestehend aus dem Granulat NF01U, wurden abnehmende Werte mit zunehmender Foliendicke festgestellt. Die Flachfolien aus NF803 zeigen ebenfalls in beiden Meßphasen diesen Effekt. In Abbildung 4.2.3-12 ist bei näherer Untersuchung aber ersichtlich, daß für die aus NF803 bestehenden Folien in der Nachtphase mit einem R^2 von 0,2242 keine funktionelle Abhängigkeit zwischen $P_{WD} (\Delta t)$ und der

Foliendicke festgestellt wurde. Bei den Tageswerten erscheint mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,8039 ein solcher Zusammenhang wahrscheinlich.

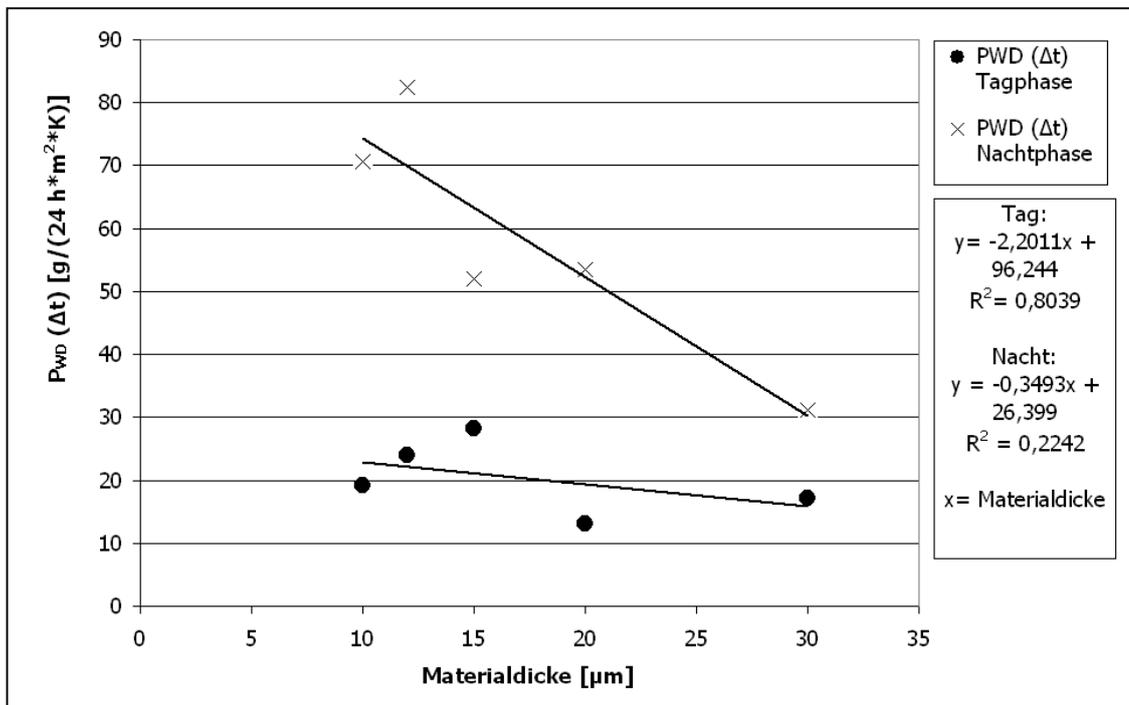


Abb.4.2.3-12: Funktionelle Zusammenhänge der Permeationskoeffizienten in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz $P_{WD} (\Delta t)$ [g/(24 h*m²*K)] der Flachfolien aus dem Granulat NF803 in der Tag- und Nachtphase

Die in Abbildung 4.2.3-13 dargestellten Permeationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wasserdampfdruckdifferenz $P_{WD} (\Delta PD)$ [g/(24 h*m²*hPa)] der Flachfolien zeigen erneut große Unterschiede zwischen den Kontrollen und den Versuchsvarianten auf. Die Werte der konventionellen Kontrolle liegen zu beiden Meßphasen unterhalb der Meßwerte der biologisch abbaubaren Flachfolien.

Bei den Folien aus NF01U wurden bei der 12 μm-Folie höhere Werte als bei der 20 μm-Folie festgestellt. Im Unterschied zu den vorherigen Untersuchungen waren die Differenzen der Werte zueinander in diesem Fall nicht sehr groß. Gleiches galt auch für die andere Gruppe von Flachfolien aus dem Granulat NF803. Besonders deutlich wurde dies bei den Nachtwerten. Bei den Flachfolien aus dem Granulat NF803 (siehe Abbildung 4.2.3-14) ist bei den Tagwerten mit $R^2 = 0,2579$ ein funktioneller Zusammenhang nicht nachweisbar, im Unterschied zu den Nachtwerten, die diesen mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,8632$ wahrscheinlich erscheinen lassen.

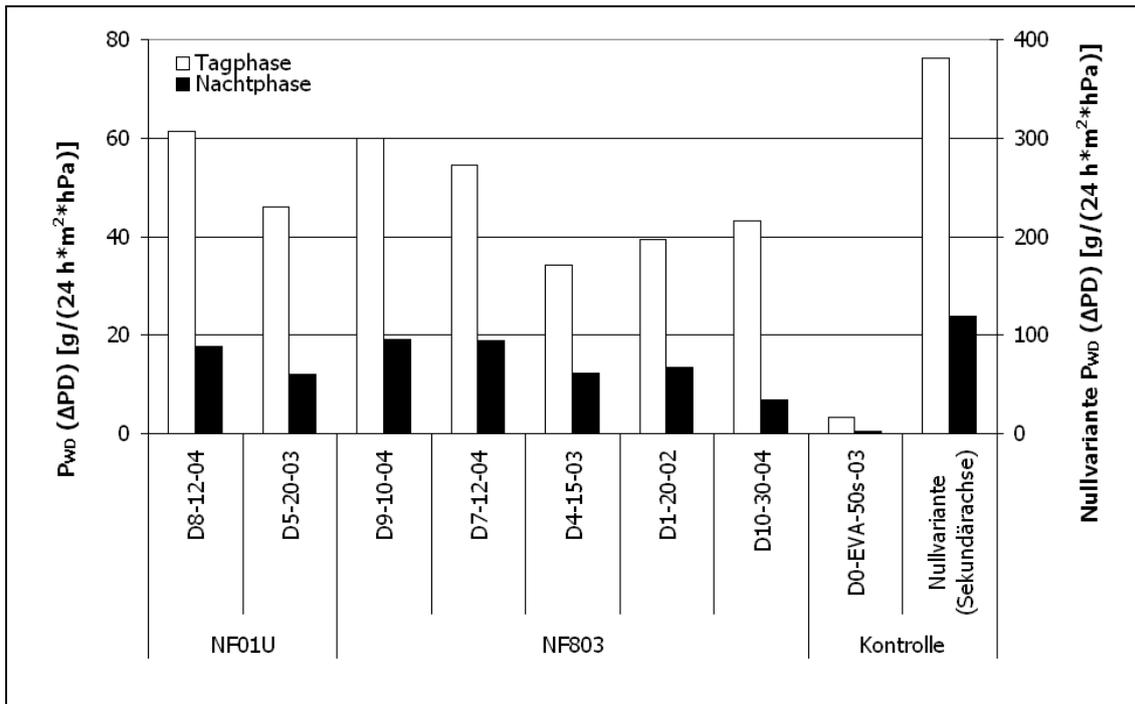


Abb.4.2.3-13: Permeationskoeffizienten der Flachfolien in Abhängigkeit von der Wasserdampfdruckdifferenz $P_{WD} (\Delta PD)$ [g/(24 h*m²*hPa)] in der Tag- und Nachtphase im Vergleich mit den Kontrollvarianten

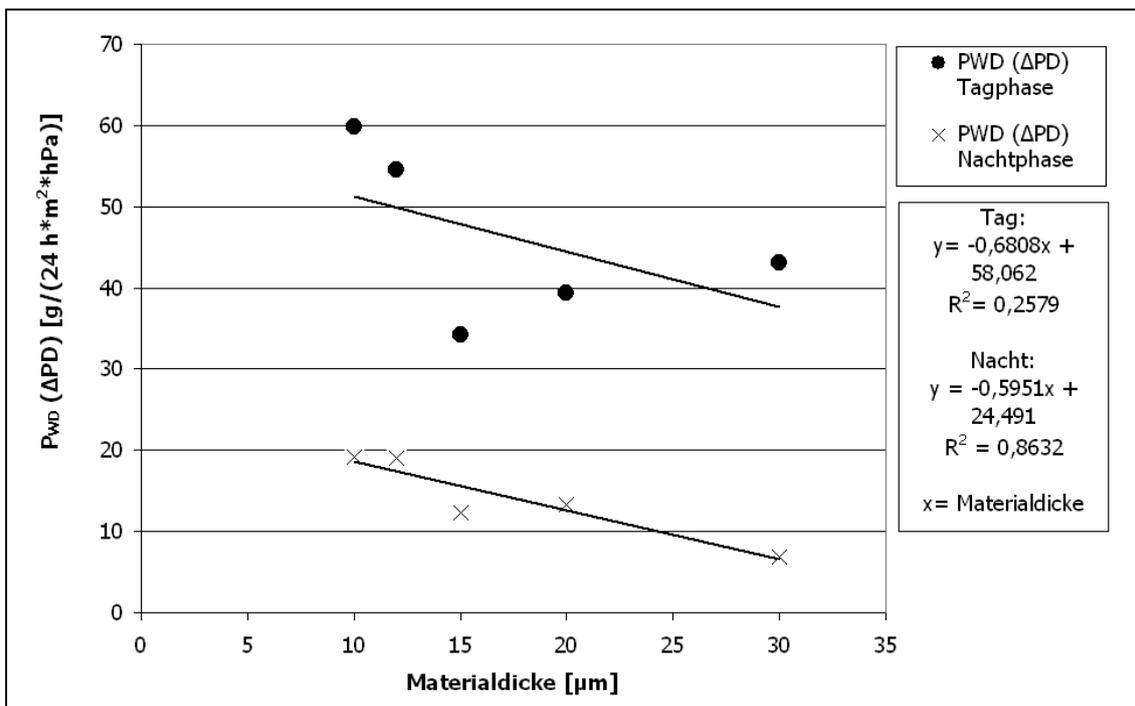


Abb.4.2.3-14: Funktionelle Zusammenhänge der Permeationskoeffizienten in Abhängigkeit Wasserdampfdruckdifferenz $P_{WD} (\Delta PD)$ [g/(24 h*m²*hPa)] der Flachfolien aus dem Granulat NF803 in der Tag- und Nachtphase

Gelochte Folien

Bei der Messung der Wasserdampfdurchlässigkeit der Flachfolien wurden ebenfalls drei praxisüblich gelochte Flachfolien untersucht. Die Löcher hatten einen Durchmesser von 12 mm und bei der Messung wurden jeweils acht Löcher über der Schalenöffnung platziert. In Abbildung 4.2.3-15 sind die Werte der Wasserdampfdurchlässigkeit von gelochten und ungelochten Flachfolien gleicher Materialstärke im Vergleich dargestellt. Die gelochten Flachfolien D6 und D0 wiesen im Vergleich mit ihren ungelochten Varianten in der Tagphase eine höhere WDD auf. Die gelochte Folie D8 hingegen zeigte mit einer fast gleichen WDD wie die intakte Vergleichsfolie ein abweichendes Permeationsverhalten. In der Nachtphase traten bei den Biofolien geringere Unterschiede in der WDD in Erscheinung, wobei die gelochten Folien die höheren Werte aufwiesen. Der größte Unterschied lag bei der Kontrollfolie D0 vor, die im intakten Zustand in der Nachtphase praktisch keine Durchlässigkeit zeigte, gelocht hingegen eine WDD von ca. 80 $\text{g}/(24 \text{ h} \cdot \text{m}^2)$ erkennen liess. Die WDD aller gelochten Varianten lag deutlich unterhalb der Nullvariante.

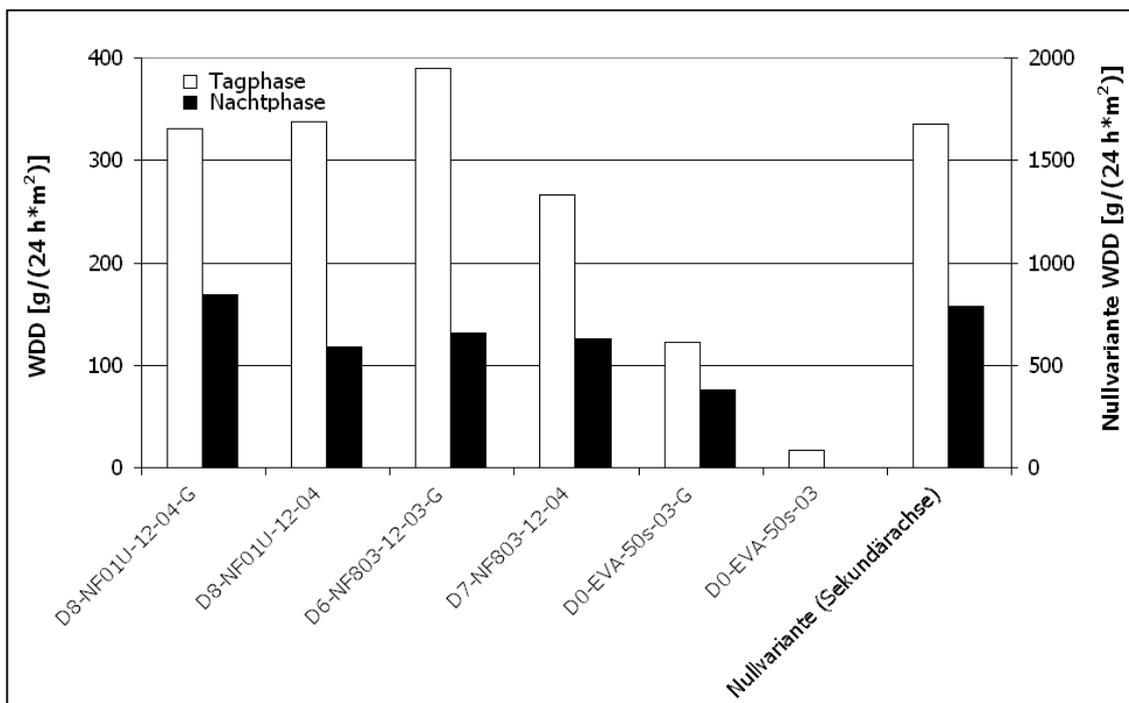


Abb.4.2.3-15: Vergleich der Wasserdampfdurchlässigkeiten $[\text{g}/(24 \text{ h} \cdot \text{m}^2)]$ von gelochten und ungelochten Flachfolien in der Tag- und Nachtphase

5 DISKUSSION

5.1 Freilandversuche

Im Rahmen der Freilandversuche sollte die Wirksamkeit der biologisch abbaubaren Mulch- und Flachfolien hinsichtlich der Wachstumsparameter und den produzierten Erträgen im Vergleich zur konventionellen Kontrolle und zur Nullparzelle ohne Folienverwendung untersucht werden.

5.1.1 Veränderungen der Wachstumsparameter durch Folienverwendung

Bodentemperatur

Die Ergebnisse der Bodentemperaturmessung ergaben höhere Werte unter den Folienkombinationen als unter den Nullparzellen. Daraus lässt sich für Folienabdeckungen in Bezug auf die Bodentemperaturerhöhung eine höhere Effektivität im Vergleich zum unbedeckten Boden ableiten. Bei der getrennten Betrachtung der Zeiten vor und nach der Flachfolienverwendung ergab die statistische Auswertung einen signifikanten Unterschied zwischen den Bodentemperaturen beider Zeiträume, was auf den Einfluss der Flachfolien zurückzuführen sein dürfte.

Die Bodentemperaturwerte der konventionellen schwarzen Mulchfolien lagen in den meisten Fällen oberhalb derjenigen der bioabbaubaren schwarzen Folien. Ausnahme war die Zeit ohne Flachfolie im Frühjahrsversuch 2002, wo ein anderes Verhältnis der Bodentemperaturen zueinander festgestellt wurde, als mit Flachfolienbedeckung. Auch in 2004 änderte sich das Verhältnis der Temperaturwerte zueinander nach Entfernen der Flachfolien. Der Grund hierfür könnte die Beschattung des Bodens durch den Kulturpflanzenbestand sein, der nach vier Wochen Kulturzeit einen Teil der Fläche bedeckte. STRUZINA (1990) ermittelte in seinen Untersuchungen einen Kultureinfluss auf

die Werte der Bodentemperatur, der durch Beschattung, bzw. Bedeckung der Mulchfolien für geringere Temperaturen sorgte. Dieses könnte auch eine Erklärung für die Bodentemperaturverhältnisse im Freilandversuch 2003 sein, wo nach Entfernen der Flachfolien vergleichsweise hohe Bodentemperaturen gemessen wurden und keine Veränderungen der Temperaturverhältnisse zueinander erkennbar waren. Durch den Ausfall der meisten Kulturpflanzen waren die Folienversuchspartellen, im Gegensatz zur Nullparzelle, weitgehend unbeschattet.

Im Freilandversuch Sommer 2002, wo keine Flachfolien verwendet wurden, lagen die Bodentemperaturen unter der konventionellen Kontrolle höher, als unter den bioabbaubaren Varianten, wobei der Unterschied zur Variante M2 auch signifikant war. Dieser Versuch könnte als Referenz für den reinen Mulchfolieneffekt auf die Bodentemperaturen herangezogen werden.

Bei den Untersuchungen von WEBER (2003) lagen die Bodentemperaturen der Biofolienvarianten unterhalb derjenigen der PE-Variante und oberhalb der Nullparzelle. Vox et al. (2005) ermittelten in Versuchen desselben EU-Projektes ebenfalls höhere Bodentemperaturen unter konventionellen Mulchfolien-Flachtunnel-Kombinationen als unter den bioabbaubaren Varianten.

Wie in Kapitel 5.2.1 dargestellt, stieg die NIR-Durchlässigkeit der schwarzen Biofolien mit abnehmender Materialdicke an. Die dadurch mögliche direkte Erwärmung der Bodenoberfläche könnte die Werte der Bodentemperaturen unter den Mulchfolien im Vergleich zur Nullparzelle positiv beeinflusst haben, was in den ermittelten Ergebnissen allerdings nicht zu erkennen ist. Es ist eher anzunehmen, dass dieser Faktor für einen messbaren Effekt zu gering war und von anderen Einflüssen überlagert wurde. MARTIN-CLOSAS et al. (2003) stellten bei ihren Messungen ebenfalls eine signifikante Erhöhung der Bodentemperatur von ca. 2 °C in 2 cm Tiefe unter einer PE-Folie und einer Mater-Bi-Folie im Vergleich zu Mulchpapier fest. In 20 cm Bodentiefe waren bei derselben Messung keine signifikanten Unterschiede mehr festzustellen.

Die grüntransparente Mulchfolie M9 zeigte im Freilandversuch 2004, unabhängig von der verwendeten Flachfolienvariante, eine vergleichsweise hohe mittlere Bodentemperatur. Dieses war auf die höhere Strahlungsdurchlässigkeit dieser Mulchfolie zurückzuführen (siehe Tabelle 4.2.1-1 und Abb. A-19), welche gleichzeitig Unkrautwachstum unter der Folie ermöglichte (Abb.5.2.1-1). In den Versuchen von KELL et al. (2005) wurden ebenfalls höhere Bodentemperaturen unter grüner Mulchfolie

festgestellt. Nach POSTWEILER (2004a und 2004c) bewirkt eine Mulchfolie zwar eine Bodentemperaturerhöhung, vermindert aber gleichzeitig als Trennschicht zur bodennahen Luftschicht einen Temperatúrausgleich in diesem Bereich (siehe 5.1.3) mit möglichen negativen Folgen für die Kulturpflanzen bei Extremwetterlagen. Bei bestimmten Kulturen können sich infolge hoher Einstrahlung Ertragsminderungen durch zu hohe Bodentemperaturen zeigen (LOCHER et al., 2005). In den vorliegenden Versuchen könnte dies für die Pflanzenausfälle im Freilandversuch 2003 mitverantwortlich sein.

Klima unter Flachfolie

Der Verfrühungseffekt durch die Flachfolien-Mulchfolien-Kombinationen zeigte sich erwartungsgemäß, trotz Minderung der unbewerteten Einstrahlung im Vergleich zur einfallenden Globalstrahlung, in den höheren Erntemengen der Folienvarianten gegenüber denen der Nullparzellen. GIMINEZ et al. (2002) führten dieses auf den Gewächshauseffekt durch die Abdeckung zurück, der ein für Wachstum und Entwicklung vorteilhaftes Klima entstehen lässt.

Nach ELSNER (2005) könnte die Opazität der bioabbaubaren Flachfolien durch Streuung der einfallenden Globalstrahlung eine gleichmäßigere Lichtverteilung bewirken und das Pflanzenwachstum positiv beeinflussen (siehe auch Kap. 5.2.1).

Die Messungen der Strahlungsdurchlässigkeit unter den Flachfolien zeigten im Klimaversuch 2004 (Abb. 4.1-18) erwartungsgemäß mit zunehmender Foliendicke eine Minderung der Einstrahlung. Beim Vorjahresversuch (Abb. 4.1-17) wurden gegenteilige Ergebnisse gemessen. Die Ursachen hierfür könnten in der unterschiedlichen Expositionsdauer der Folienvarianten zu finden sein. Für 2004 wurde die Messung zu Beginn der Expositionszeit der Flachfolien durchgeführt. 2003 hingegen zeigt den Zustand der Flachfolien zum Ende des Versuchszeitraumes, nach einer Expositionsdauer von ca. 6 Wochen. Eine Erklärungsmöglichkeit wäre die Photodegradation, die die dünneren Biofolien stärker beeinträchtigt haben müsste. Betrachtet man allerdings die Untersuchungsergebnisse zur Transmission (Kap. 4.2.1) zum Zeitpunkt 17.06.2003 in den Tabellen 4.2.1-21 bis -24, so zeigt die Folie D6 eine höhere Strahlungsdurchlässigkeit als die anderen Biofolien. Somit könnte Verschmutzung oder

auch tropfenförmige Kondensation (ELSNER, 1986) bei den Folien des Freilandversuches diese Unterschiede hervorgerufen haben.

Die geringere Wasserdampfdurchlässigkeit der konventionellen Folien hätte unter dieser Flachfolienvariante eine höhere Luftfeuchte entstehen lassen müssen, was in den vorliegenden Messergebnissen nicht eindeutig festgestellt werden konnte. Die Ergebnisse vom Frühlingsversuch 2002 (Abb. 4.1-12) zeigen zwar höhere Wassergehalte der Luft unter der konventionellen Flachfolie, jedoch konnte dieser Unterschied mangels Wiederholungen und reproduzierbarer Messergebnisse nicht statistisch abgesichert werden. Auch im Klimaversuch 2004 wurden unterschiedliche Wassergehalte der Luft unter den Flachfolien festgestellt (Abb. 4.1-16). In diesem Fall ist hauptsächlich der Materialzustand der verwendeten Flachfolien für die Ergebnisse massgebend, da die Flachfolie D6, mit den höchsten Wassergehalten, als einzige keine Schäden aufwies.

Die Perforation der Flachfolienvarianten kann in Kombination mit Windbewegungen ebenso einen Einfluss auf die Wassergehalte und Lufttemperaturen gehabt haben. Da die Biofolien leichter und dünner waren, konnten mehr Windbewegungen beobachtet werden, als bei der konventionellen Folie. Neben dem Risiko von Folienschäden könnte dadurch auch ein erhöhter Luftwechsel die Messwerte verändert haben.

Vox et al. (2005) fanden im Gegensatz zu den eigenen Messungen bei Lufttemperaturmessungen unter Flachtunnelfolien desselben Projektes die höchsten Werte unter der konventionellen Folienvariante vor. Die Biofolienvarianten lagen um 1,4 °C, bzw 3,2 °C niedriger. Diese Ergebnisse wurden mit den Transmissionskoeffizienten für Globalstrahlung der jeweiligen Bedeckungsmaterialien erklärt, der für die Biofolien geringer war, als für die konventionellen Folien.

Ein Problem der Strahlungsdurchlässigkeitsmessung war, dass die Solarimeter im Laufe der Kulturzeit ihre anfangs horizontale Messposition auf der Mulchfolie durch bewässerungsbedingte Änderungen der Bodenstruktur z.T. nicht halten konnten. Teilweise wurde auch eine zunehmende Beschattung durch Kulturpflanzen festgestellt. Für weiterführende Versuche wäre eine erhöhte feste Plattform zur Messung sinnvoll, womit auch Dauermessungen möglich wären. Für die sichere Messung der Luftfeuchte unter den Flachfolien wäre ebenfalls eine Überarbeitung der Messtechnik notwendig.

Erträge

In den Freilandversuchen vom Frühjahr 2002 und vom Versuchsjahr 2004 wurden die Erträge von 25 randomisiert ausgewählten Salatköpfen pro Versuchsparzelle durch Wägung bestimmt. Dabei wurden im Frühjahrsversuch 2002 keine signifikanten Unterschiede zwischen den Versuchsvarianten festgestellt, während der Freilandversuch 2004 nicht statistisch ausgewertet werden konnte.

Für den Frühjahrsversuch 2002 hatten die festgestellten Unterschiede zwischen der Nullparzelle und den Folienvarianten hinsichtlich der Bodentemperatur, Lufttemperatur und Klima unter Flachfolie einen deutlicheren Unterschied im Ernteergebnis zwischen den Folienvarianten und der Nullparzelle erwarten lassen. Denkbar wäre, dass in den vier Wochen Kulturzeit ohne Flachfolienabdeckung die Entwicklung der ehemals abgedeckten Pflanzen infolge der verminderten Lufttemperatur und –feuchte stagnierte, während die abgehärteten Pflanzen der Nullparzellen weiteres Wachstum zeigten. Für die Messung des Verfrühungseffektes der Flachfolien wäre eine Erntebonitur direkt nach dem Entfernen der Flachfolien sinnvoll gewesen.

Dieses wurde im Rahmen des Freilandversuches 2004 berücksichtigt, wo die Erntebonitur direkt nach dem Entfernen der Flachfolien durchgeführt wurde. Durch die höhere Zahl der Folienkombinationen liess sich ein leichter Vorteil der konventionellen Flachfolie D0 beim Ertrag erahnen, der in weiteren Versuchen noch verifiziert werden müsste. Eine geplante zweite Erntebonitur zwei Wochen später konnte aufgrund des zu dem Zeitpunkt weit fortgeschrittenen Entwicklungszustandes der Salatpflanzen nicht realisiert werden.

Im Freilandversuch des Jahres 2004 wurde unterhalb der grüntransparenten Mulchfolie M9 Beikrautwuchs festgestellt. Durch diesen wurde die Mulchfolie angehoben, was eine normale Entwicklung der Kulturpflanzen verhinderte und die geringen Erträge dieser Mulchfolienvariante erklärt. Die höheren Bodentemperaturen dieser Folienvariante hätten im Vergleich einen Mehrertrag erwarten lassen, weil wie bei POSTWEILER et al. (2003, 2004b und 2005c) dabei durch eine schnellere und stärkere Mineralisierung der organischen Bodenbestandteile höhere Erntemengen bewirkt werden können. Allerdings können zu hohe Bodentemperaturen, wie bereits im Abschnitt „Bodentemperaturen“ dieses Kapitels erwähnt, nach LOCHER et al. (2005) auch Ertragsminderungen zur Folge haben.

Bei den Erträgen der konventionellen Folienkombinationen im selben Versuchsjahr wurden ungewöhnlich niedrige Werte mit einer hohen Streuung festgestellt, da zur Zeit der Pflanzung durch Windbewegungen der Mulchfolie viele Kulturpflanzen beschädigt wurden und infolge dessen ein vermindertes Wachstum zeigten oder ausfielen. Die Pflanzen der Nullparzellen hatten ebenfalls eine ungewöhnlich geringe mittlere Frischmasse, wofür das in diesem Jahr massenhafte Auftreten der kleinen Brennessel (*Urtica urens*) auf der Kulturfläche mitverantwortlich gewesen sein könnte. Im Vorjahr war die Brachfläche mit dem Herbizid „*Round up ultra*“ behandelt worden, was, bedingt durch eine Wirkungslücke beim Herbizid (Anonymus (D), 2009), die Entwicklung der kleinen Brennessel förderte und in 2004 zu einem Massenaufreten führte. Da dies zu Beginn des Versuches bei noch kleinen Kulturpflanzen auftrat, bremste es die Entwicklung der Salatjungpflanzen und könnte einen Entwicklungsrückstand bewirkt haben.

Vox et al. (2005) stellten in ihren Versuchen in einer Melonenkultur in Süditalien eine Abhängigkeit der Erntemenge von der jeweiligen Boden- und Lufttemperatur der Folienkombinationen fest. In den Versuchen anderer Forschungsanstalten fallen die Versuchsergebnisse vergleichbar mit denen der vorliegenden Arbeit aus. Aus denen in den Tabellen 2.4-1 und 2.4-2 aufgelisteten Versuchsberichten gehen einerseits kulturpflanzenabhängige höhere Erträge der Mulchfolien gegenüber dem unbedeckten Boden hervor. Unterschiede zwischen konventionellen Mulchfolien und biologisch abbaubaren Mulchfolien sind meistens nicht signifikant und es ist zusammenfassend, wie in der vorliegenden Arbeit, kein Vorteil einer Variante zu erkennen.

Beim Vergleich der Ertragsbonituren beider Freilandversuche fallen die wesentlich geringeren mittleren Frischmassen vom Versuchsjahr 2004 auf. Da in beiden Versuchsjahren mit „*Melody RZ*“ dieselbe Kopfsalatsorte verwendet wurde, ist ein Sortenunterschied weitgehend ausgeschlossen. Als Grund kommt hauptsächlich die mit sechs Wochen etwas kürzere Kulturzeit der Pflanzen zum Zeitpunkt der Bonitur 2004 infrage. Auch das wesentlich wärmere Wetter und der geringere Niederschlag in 2004 im Vergleich zum Frühjahr 2002 (siehe Abb. 4.1-8 und 4.1-10) wird eine Rolle gespielt haben. Wahrscheinlich lagen auch die FDR-Sonden in 2004 zu tief, so daß die Bewässerung zu spät aktiviert wurde um optimale Kulturergebnisse erzielen zu können. Die Installationstiefe von 30 cm wurde gewählt, um im Rahmen des EU-Projektes

europaweit gleiche Bedingungen bei den Freilandversuchen zu haben, zwecks projektinterner Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse.

5.1.2 Veränderungen der Bodenfeuchte durch Folienverwendung

In den Freilandversuchen der Jahre 2002 und 2003 wurden die Bodenfeuchtemessungen mit Tensiometern in der Beetmitte durchgeführt. Die Messergebnisse unterlagen hohen Schwankungen und häufigen Datenverlusten, was durch das störungsanfällige Funktionsprinzip der Tensiometer erklärt werden konnte (SCHMITZ et al., 1998). Nachweislich führte in den Freilandversuchen mangelnder Bodenschluß zu Datenverlusten und Fehlmessungen. Dies galt besonders für den warmen und niederschlagsarmen Versuchszeitraum 2003, wo besonders viele Messausfälle eine Auswertung unmöglich machten. Deswegen wurden im Versuchsjahr 2004 die Bodenfeuchtemessungen mit zwei FDR-Sonden pro Parzelle durchgeführt. Auch bei dieser Messmethode zeigten sich auf der Parzelle M9-D6 Fehlmessungen. In der Literatur sind verschiedene Probleme mit der Messtechnik für Bodenfeuchte beschrieben. Für statistisch auswertbare Ergebnisse sind nach SCHMITZ et al. (2000) aufgrund der hohen Streuung der Messwerte mindestens neun Messfühler pro Parzelle nötig. Als mögliche Gründe für sensorspezifische Messungenauigkeiten geben SCHMITZ et al. (1998) systematische und zufällige Fehler an. Dabei können systematische Fehler durch Kalibrierung (siehe Abb. A-3) ausgeschlossen werden. Die zufälligen Fehler umfassen hauptsächlich die Eigenschaften des den Sensor umgebenden Bodens und den Bodenkontakt.

Im vorliegenden Fall lag die Parzelle mit der M9-D6 in der Mitte der Versuchsgesamtfläche und wurde, im Gegensatz zu den anderen Parzellen, auch im Vorjahr als Versuchsfläche genutzt, was zu Unterschieden in der Bodenbeschaffenheit geführt haben könnte. Ebenso ist ein Bodentemperatureinfluss in den Messwerten zu erkennen. Bei den in Abb. A-35 im Anhang dargestellten Stundenmittelwerten der Bodenfeuchtemessung ist bei allen Varianten ein Tagesgang zu erkennen, der bei der Parzelle mit der grüntransparenten Mulchfolie M9-D6 besonders ausgeprägt ist. Die Bodentemperaturen unter dieser Folienkombination lagen zwar oberhalb der Vergleichsparzellen M0-D0, M4-D0 und M8-D0 (siehe Abb. 4.1-6), ob dieser Unterschied

diesen Effekt hervorruft erscheint unwahrscheinlich. Dass die Parzelle M9 als Einzige dieser Messung mit einer bioabbaubaren Flachfolie bedeckt war, spielt für die Ergebnisse eine untergeordnete Rolle (siehe Kap. 5.1-1).

Aufgrund der höheren Wasserdampfdurchlässigkeit der bioabbaubaren Folien (siehe Kap. 4.2.3) wären geringere Bodenfeuchten im Vergleich zur konventionellen PE-Kontrolle zu erwarten gewesen. Dieses konnte in keiner der vorliegenden Messungen statistisch nachgewiesen werden.

Nach STRUZINA (1990) ist eine Minderung der Wasserversorgung von Kulturpflanzen unter Mulchfolie bis zu einem Abstand von 50 cm vom Rand nicht zu erwarten, da die Nachlieferung von Niederschlagswasser, das über die unbedeckten Flächenanteile (ca. 32 % der Gesamtfläche) und die Pflanzlöcher in den Boden eindringt, zusammen mit dem kapillaren Aufstieg aus dem Boden zur Versorgung ausreicht. Dieses kann für den Versuch im Frühjahr 2002 bestätigt werden, wo wegen ausreichender Niederschläge keine zusätzliche Bewässerung notwendig war und auf allen Parzellen ähnliche Bodenwassergehalte festgestellt wurden. Der niederschlagsärmere Sommersversuch 2002 zeigte größere Unterschiede zwischen allen Parzellen und machte Bewässerung notwendig, gleiches galt für die Versuche von 2003 und 2004.

5.1.3 Veränderungen der Lufttemperatur durch Folienverwendung

Während des ersten Freilandversuches 2002 wurde bei Flachfolienverwendung eine vergleichsweise starke Erhöhung der Lufttemperaturen über den Folienvarianten im Vergleich zur Nullparzelle festgestellt. Dies war wahrscheinlich auf die Art der Anbringung der Messfühler zurückzuführen, da die Sensoren durch Windeinfluss unter die Flachfolie geraten konnten, was zu Fehlmessungen führte. In den Folgeversuchen wurden die Messfühler gegen ein Überwehen durch die Flachfolien geschützt.

Die getrennte Betrachtung der Zeiträume mit und ohne Flachfolienabdeckung zeigte kein eindeutiges Ergebnis. Ausser bei der vorab beschriebenen hohen Lufttemperaturdifferenz im Frühjahrsversuch 2002, waren kein eindeutiger Trend eines Versuchsmaterials zur Lufttemperaturerhöhung zu erkennen. Die hohe Streuung der Ergebnisse könnte einerseits im Reflexionsvermögen der Flachfolien oder andererseits im Luftaustausch von wärmerer Luft unter der Flachfolienabdeckung mit der

Umgebungsluft durch die Lochung der Flachfolien zu finden sein. Das Reflexionsvermögen der Flachfolien wurde nicht untersucht, wäre für weiterführende Versuche jedoch sinnvoll.

Die Lufttemperatur über den Folienskombinationen war jedoch nicht immer höher, als nach dem Entfernen der Flachfolien. Im Freilandversuch 2003 wurde eine signifikant höhere Lufttemperatur ohne Flachfolienabdeckung festgestellt. Die Ursachen hierfür könnte im Fehlen der Kulturpflanzen zu finden sein, wodurch sich die schwarzen Mulchfolien stärker erwärmten und die Lufttemperatur entsprechend erhöhten.

Die Untersuchungen von STRUZINA (1990) ergaben ebenfalls keine signifikanten Unterschiede bei der Lufttemperatur in 5 cm Höhe über der Bedeckung zwischen unterschiedlichen Arten von Mulchen in einer Maiskultur. Auch MARTIN-CLOSAS et al. (2003) fanden bei einer organischen Tomatenkultur in Spanien keine signifikanten Unterschiede bei der Lufttemperatur über Mulchpapier, PE, Mater-Bi oder unbedecktem Boden.

Allerdings kann durch extreme Witterungseinflüsse die Lufttemperatur über Mulchfolien den pflanzenverträglichen Bereich verlassen und Schäden verursachen. In den Freilandversuchen von POSTWEILER et al. (2004c, 2005a) führten Frostnächte bei einer Kohlrabikultur zu vermehrten Pflanzenschäden über schwarzen Mulchfolien. Bei hoher Einstrahlung führte starkes Aufheizen der Mulchfolie ebenfalls zu Pflanzenschäden. Als Begründung wird der durch die Mulchfolie verminderte Temperatursausgleich zwischen dem Boden und der bodennahen Luftschicht angeführt. Gleiches galt für zwei Blumenkohlkulturen (POSTWEILER et al., 2004a und 2005d), bei denen Verbrennungsschäden infolge hoher Einstrahlung und eine verminderte Pflanzenentwicklung auf die Lufttemperaturverhältnisse über einer schwarzen Biomulchfolie zurückgeführt wurden. Auch in den eigenen Versuchen wurde dieses beobachtet. Im Sommersversuch 2002 führte die hohe Lufttemperatur direkt nach der Pflanzung bei allen Mulchfolienvarianten zu Pflanzenschäden an den äußeren Laubblätter der Salatjungpflanzen.

5.1.4 Agronomische Bewertung der bioabbaubaren Folien

Für die vier Freilandversuche wurden biologisch abbaubare Mulch- und Flachfolien unterschiedlicher Materialdicke im Vergleich zu konventionellen Folienkombinationen eingesetzt. Alle bioabbaubaren Folien, ausgenommen die für das Versuchsjahr 2004 produzierten Flachfolien, waren zur Verwendung in der gartenbaulichen Produktion geeignet und stellten eine Alternative zu den konventionellen Folien dar. Im Folgenden sind einige Unterschiede in der Handhabung und kritische Eigenschaften dieser Materialien dargestellt.

Eine negative Eigenschaft der verwendeten biologisch abbaubaren Materialien war, dass die daraus produzierten Mulch- und Flachfolien bei direktem Kontakt durch Feuchtigkeitsaufnahme und anschließender Trocknung fest miteinander verklebten. Dieses war wahrscheinlich auf Quell- und Schrumpfvorgänge der hydrophilen Stärkekomponente der Biofolien zurückzuführen. Die möglichen Beeinträchtigungen des Kulturpflanzenwachstums und das Risiko von Folienschäden waren dadurch sehr hoch und unter Praxis Gesichtspunkten nicht akzeptabel. Ein Entfernen der Flachfolie vom Beet wäre in diesem Zustand nicht ohne die Gefahr von Mulchfolienschäden möglich gewesen. Diese Eigenschaft führte u.a. dazu, dass nach der Direktsaat der Einlegegurkenkultur 2003 für die Keimung zu hohe Temperaturen unter den Folienkombinationen vorlagen und deshalb nicht genügend Pflanzen für eine Erntebonitur zur Verfügung standen. Im Frühjahr 2002 und in 2003 haben die Mini-Psychrometer durch den Klebeeffekt ihre Werte zu Beginn der Messreihen in einem sehr kleinen Luftvolumen gemessen, was eine Auswertung der Ergebnisse erschwerte. Eine Verwendung von biologisch abbaubaren Folienkombinationen für Flachtunnelkulturen war hingegen, mangels direktem Kontakt der Biofolien, bei den Versuchen der Projektpartner problemlos möglich (SCARASCIA-MUGNOZZA et al., 2006).

Die im Boden verankerten Ränder der Mulchfolien zeigten deutliche Veränderungen durch biologischen Abbau. Solange der Boden am Beetrand nicht bearbeitet wurde, war die Bedeckung durch die biologisch abbaubaren Mulchfolien während der gesamten Kulturzeit gegeben. Wurde z.B. Beikraut direkt am Beetrand manuell entfernt, wurde auch die Mulchfolie an der Übergangsstelle in den Boden eingerissen.

Die im Laufe der Kulturzeit festgestellten oberirdischen Schäden an den bioabbaubaren Folien waren nicht primär auf biologischen Abbau zurückzuführen. Die Biofolien waren empfindlicher gegen mechanische Belastungen, wie sie z.B. durch Kontakt mit Bodenkonkretionen oder Reste organischer Substanz auf der Bodenoberfläche auftreten können. Gleiches galt für unter den Flachfolien installierte Messfühler. Durch diese kam es häufig zu Schäden, was eine Veränderung der Klimawerte unter diesen Folien bewirkte. Im Klimaversuch 2004 wurde dann eine Flachtunnelkonstruktion eingesetzt, die für die Psychrometermessungen ein größeres Luftvolumen bereitstellte und formbedingt das Risiko von Beschädigungen der Flachfolien durch die Messgeräte minderte.

Die Biofolien ließen sich nach Kulturrende problemlos in den Boden einarbeiten und es wurde keine Windverdriftung von Folienstücken an der Bodenoberfläche festgestellt. Bei Einarbeitung der Biofolien in die Kulturfläche mittels einer Zapfwellenfräse kam es vor, dass zu dem Zeitpunkt noch intakte oberirdischen Folienteile von der Achse der Fräse aufgewickelt wurden. Deshalb wurde dazu übergegangen die Folienreste einzupflügen. Dem Boden wurden so zwar größere unzerkleinerte Kunststoffstücke zugeführt, von denen nach einem Jahr nur noch geringe Mengen im Boden vorhanden waren. Eine erneute Nutzung der Fläche wurde durch die vorhandenen Folienreste nicht beeinträchtigt. An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass in den vorliegenden Versuchen jeweils nur ein Satz einer Kultur pro Vegetationsperiode angebaut wurde und danach zur Messung des biologischen Abbaues im Boden eine einjährige Kulturpause eingelegt wurde. Wie auch von AROLD (2005) wurde eine Abhängigkeit der Abbaugeschwindigkeit im Boden von der jeweiligen Witterung und dem daraus ableitbaren Einfluss auf das Bodenleben festgestellt. Inwieweit sich eine Akkumulation von eingearbeiteten Folienstücken auf Ertragsleistung und Bearbeitbarkeit des Bodens auswirkt, war nicht Bestandteil der vorliegenden Untersuchungen. BRAUN (2007) berichtete über die Vermehrung von Steckhölzern in bioabbaubarer Folie, dass bei einigen Betrieben die angesammelten Folienreste im Boden zu Problemen bei der Bodenbearbeitung führen.

Der Folienabbau im Boden war aus ökotoxikologischer Sicht unbedenklich. Im Rahmen der im EU-Projekt untersuchten Bodenproben der Versuchsfläche wurden keine Hinweise auf eine negative Beeinflussung des Bodenlebens durch Kunststoffabbauprodukte festgestellt.

Die PE-Mulchfolien aller Versuche zeigten eine geringere Folienspannung über die Beetbreite, als die Biomulchfolien. Diese hielten die Spannung der Installation und somit waren kaum Windbewegungen zu beobachten. Im Freilandversuch 2004 bewirkten die Windbewegungen der PE-Mulchfolie eine Vielzahl von Pflanzenausfällen. Bei den Flachfolien waren die Verhältnisse umgekehrt. Bei den dünneren Bio-Flachfolien traten bereits bei geringen Windkräften Bewegungen auf, was zu Folienschäden z.B. durch Kontakt mit Messeinrichtungen führte.

5.2 Laborversuche

Bei den Laborversuchen sollten die in den Freilandversuchen festgestellten Effekte näher untersucht werden, bzw. die Veränderungen von Materialeigenschaften über die Nutzungszeit dokumentiert werden.

5.2.1 Transmission

Bei dieser Untersuchung sollte die spektrale Durchlässigkeit der Versuchsfolien festgestellt und während der Nutzung der Folien im Freiland auftretende Veränderungen aufgezeigt werden. Bezüglich der schwarzen Mulchfolien ließ sich feststellen, dass die Durchlässigkeit in den pflanzenbaulich relevanten Spektralbereichen (UV und PAR) bei allen untersuchten Varianten unter 1,1 % lag und somit kein Pflanzenwachstum erwarten ließ. Die grün-transparente Mulchfolie M9 ließ mit bis zu 42 % Transmission im PAR-Bereich Pflanzenwachstum zu, was sich im Freilandversuch durch Beikrautwuchs unter dieser Mulchfolie bestätigte (Abb. 5.2.1-1). Einen Verlust an Strahlungsdurchlässigkeit über die Versuchsdauer war bei M9 im UV-Bereich zu erkennen. Die hohe Durchlässigkeit im NIR erklärte die verhältnismäßig hohen Bodentemperaturen unter dieser Folienvariante im Vergleich zu den schwarzen Mulchfolien (siehe Kap.5.1.1.). Diese Folienfärbung sollte die Vorteile einer schwarzen Mulchfolie (kein Beikrautwachstum) mit derjenigen einer transparenten Mulchfolie (Verdunstungsschutz, Bodenerwärmung) kombinieren.

In den beiden Freilandversuchen des Jahres 2002 wurden Mulchfolien gleicher Spezifikation, aber unterschiedlicher Herstellungschargen verwendet. Die Unterschiede in der Transmission (NIR) , dargestellt in den Abbildungen A-4 bis A-11 im Anhang, waren wahrscheinlich auf die unterschiedlichen Materialbeschaffenheiten der Mulchfolien zurückzuführen, da die Folien des Sommersversuches eine inhomogene Verteilung der Materialdicke aufwiesen. So war eine Längsstreifenbildung im Material erkennbar (siehe Abbildung 5.2.1-2), wo sich Bereiche höherer und geringerer Materialdicke befanden. Auch die fehlende Bedeckung durch eine Flachfolie im Sommersversuch 2002 könnte die Mulchfolie in ihrer Durchlässigkeit durch stärkere Photodegradation beeinflusst haben.

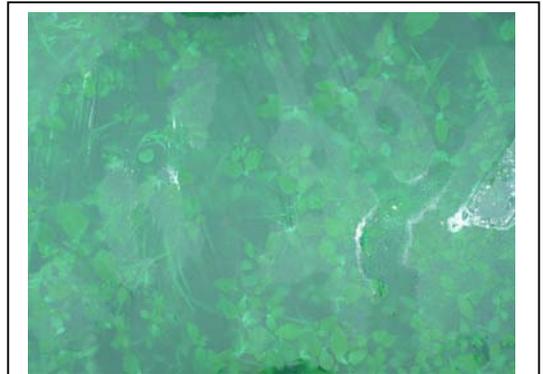


Abb. 5.2.1-1: Beikraut unter Mulchfolie M9 während des Freilandversuches 2004

Die Durchlässigkeit für NIR stieg bei den Mulchfolien mit abnehmender Materialdicke an, wobei die Zunahme bei den biologisch abbaubaren Folien im Verhältnis höher war, als bei den PE-Folien. Dieses ist auch auf den Abbildungen A-4 – A18 im Anhang gut zu erkennen.

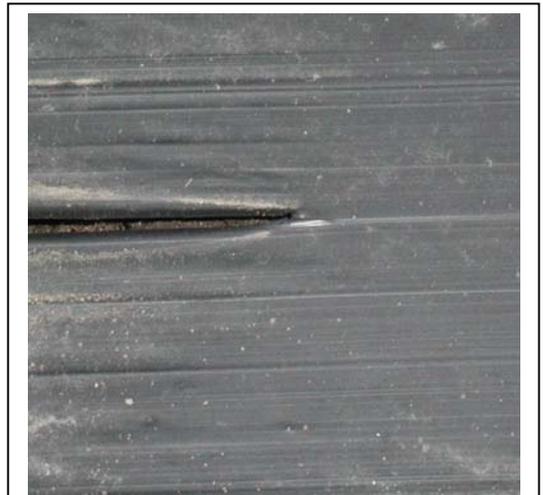


Abb. 5.2.1-2: Inhomogenes Mulchfolienmaterial der Mulchfolie M3 vom Sommersversuch 2002

Zwischen den Materialarten NF803/P und NF01U/P der bioabbaubaren Mulchfolien wurden im Jahr 2002 in der NIR-Transmission Unterschiede festgestellt (siehe Abb. A-5 bis A-7

und A-9 bis A-11). Die Werte von NF 803/P lagen geringfügig oberhalb derjenigen von NF01U/P. Dies könnte auf die unterschiedlichen Herstellungsschemata der Biofolien zurückzuführen sein, weil die NF803/P-Mulchfolien von 2002 nach dem Herstellungsschema A (siehe Tabelle A-1 im Anhang) produziert wurden. Ab 2003 wurden alle Mulchfolien nach Schema B produziert und es waren keine Unterschiede mehr feststellbar.

Erwähnenswert ist die Mulchfolie M4, die in zwei Versuchen (2003 und 2004) verwendet wurde. Vergleicht man die Grafiken A-13 und A-17 miteinander, so ließ sich nach

einjähriger Lagerung eine höhere Strahlungsdurchlässigkeit im NIR feststellen. Die Folie war auch in ihrer Konsistenz deutlich weniger elastisch und wirkte beinahe wie Papier, zusätzlich neigte sie zum Weiterreißen. Inwieweit diese festgestellten Eigenschaften einen kausalen Zusammenhang aufweisen, kann nicht gesagt werden, es wäre ein Ansatz für weiterführende Untersuchungen.

Im Frühjahrsversuch 2002 wurde bei der abbaubaren Flachfolie D3 im UV-Bereich bei 300 nm im Kurvenverlauf eine Sattelbildung festgestellt (siehe Abbildung A-23), wie auch bei den biologisch abbaubaren Flachfolien des Jahres 2003 (siehe Abbildungen A-25 bis A-27). Gleiches wurde 2002 im Rahmen desselben Projektes von SCARASCIA-MUGNOZZA et al. (2004) bei der spektroskopischen Untersuchung der Flachfolie L1 gemessen. Diese Folien wurden alle von der Firma PATI hergestellt. Die höhere Absorption im UV-Bereich ist wahrscheinlich auf die Verwendung eines UV-Absorbers zur Stabilisierung der Flachfolien zurückzuführen (siehe Tabellen 3.1-2 und 3.1-3). Aufgrund dieser Messergebnisse liegt die Vermutung nahe, dass die für das Versuchsjahr 2003 gelieferten Flachfolien, entgegen den Angaben der Bestellung, doch UV-stabilisiert waren.

In den vorliegenden Messungen wurden geringere Verluste der Transmission bei den UV-stabilisierten EVA-Folien im Vergleich zu den biologisch abbaubaren Flachfolien gemessen, bei welchen eine UV-Stabilisierung scheinbar keine Wirkung zeigte.

Ebenso wurde von SCARASCIA-MUGNOZZA et al. (2004) eine Abnahme der PAR-Strahlungsdurchlässigkeit von biologisch abbaubaren Flachtunnelfolien desselben Projektes festgestellt und mit der eingestrahlt kumulierten Globalstrahlung korreliert. Hieraus konnte eine höhere Empfindlichkeit der bioabbaubaren Folien gegenüber der einfallenden Globalstrahlung abgeleitet werden. Da diese unter 300 nm keine Transmission zeigten, kann auf eine Absorption der in diesem Bereich vorhandenen Globalstrahlung geschlossen werden. Somit kann der photochemische Abbau schneller einsetzen und die Wirkungen anderer Abbaumethoden, insbesondere Hydrolyse und biologischen Abbau, begünstigen. Die höheren Transmissionsverluste und die kürzere Lebensdauer der Biofolien im Vergleich mit den PE-Folien ließe sich u.a. auf diese Weise erklären. Nach TZANKOVA DINTCHEVA et al. (2007), die Untersuchungen zur Wirkung von verschiedenen UV-Stabilisatoren auf die Mater-Bi-Folie NF01U durchführten, hatte Strahlung eine Zerstörung von Polymerketten und -verzweigungen zu Folge. Dieser Vorgang konnte durch die Zugabe von UV-Stabilisatoren zum Polymer gemindert

werden, die im selben Wellenlängenbereich wie Mater-Bi (290 - 310 nm) ein Absorptionsmaximum aufwiesen.

Die Vorteile verminderter Strahlungsdurchlässigkeit von transparenten Folien wird von verschiedenen Autoren in der Literatur behandelt. Die von SCARASCIA-MUGNOZZA et al. (2004) ermittelte geringere Durchlässigkeit für langwellige IR-Strahlung (LWIR) von 7500 – 12500 nm von bioabbaubaren Flachfolien macht diese effektiver um Wärmeverluste durch Abstrahlung zu verhindern, als die Folien der konventionellen Kontrolle (siehe Kap. 5.1.1). ELSNER (2005) führte als Vorteil einer verminderten UV-Durchlässigkeit von transparenten Folien die Hemmung der Orientierung von Schadinsekten im Kulturpflanzenbestand an, was ein positiver Nebeneffekt bei der Verwendung dieser Folienart wäre. Allerdings gilt gleiches auch für Nutzinsekten, wie z.B. Hummeln zur Bestäubung oder Schlupfwespen im biologischen Pflanzenschutz.

Der Einfluss der UV-Strahlung unter 300 nm auf Pflanzen ist nach ELSNER (2004b) ohnehin negativ zu bewerten, da die UV-C-Strahlung (< 280 nm), die normalerweise in der Atmosphäre absorbiert wird, die Pflanzen grundsätzlich schädigen würde und UV-B (280 – 315 nm) bei zu hoher Intensität ebenfalls Schäden verursachen würde. Die UV-A-Strahlung (315 – 380 nm) wirkt nur gering photosynthetisch und hat eher Auswirkungen auf das Wachstum von Kutikula und Blattdicke sowie die Anthocyanbildung der Blüten. Somit ist eine Ertragsminderung unter einer biologisch abbaubaren Flachfolie aus der Sicht der UV-Strahlungsdurchlässigkeit nicht zu erwarten. Ein wichtiges Merkmal der verwendeten biologisch abbaubaren Flachfolien war ihre Opazität. Diese mindert zwar die Gesamlichtdurchlässigkeit, hat aber nach ELSNER (2005) besonders bei Lichtüberschuss Vorteile für das Wachstum der Kulturpflanzen. Durch die vermehrte Lichtstreuung wird eine gleichmäßigere Lichtverteilung im Bestand erreicht, was zu einer Förderung des Wachstum und weniger Verbrennungen führen kann.

Eine weitere Möglichkeit der Minderung der Transmission ist eine Verschmutzung der entnommenen Folienproben. Trotz intensiver Reinigung mit Wasser, Alkohol und Aceton könnten sich weiterhin Schmutzpartikel auf der z.T. aufgerauhten Folienoberfläche befunden haben.

5.2.2 Attenuierte Total Reflexion

Bei den Untersuchungen der Folienoberflächen mittels ATR sollte festgestellt werden, inwieweit sich deren molekulare Zusammensetzung durch Bewitterung oder Kompostierung im Laufe der Expositionszeit verändert und ob diese Methode zur Bewertung des Abbaugrades der Biofolien herangezogen werden kann.

Betrachtet man die Absorptionsbanden der unbenutzten Folienproben, so wird der Unterschied zwischen den beiden Kunststoffarten deutlich. Während bei den PE-Folien wenige scharfe Banden im Bereich zwischen 3000 cm^{-1} bis 650 cm^{-1} zu erkennen waren, wurden bei den biologisch abbaubaren Folien eine Vielzahl schwer differenzierbarer Banden hauptsächlich im Fingerprintbereich festgestellt. Eine schwache Doppel-Bande bei 2359 cm^{-1} und 2337 cm^{-1} war bei allen durchgeführten Messungen zu erkennen und zeigte keine Beeinflussung durch die Expositionsdauer und -art der jeweiligen Proben. Sie könnte vom CO_2 stammen (HUMMEL, 1991), obwohl vor jeder Messung ein Referenzspektrum der Messumgebung zur Verrechnung erstellt wurde.

Die PE-Mulchfolie zeigte deutliche Absorptionen in den Wellenzahlbereichen der CH_2 - und CH_3 -Gruppen bei 2930 cm^{-1} , 2850 cm^{-1} , 1470 cm^{-1} und 720 cm^{-1} (GÜNZLER, 1998; FEUILLOLEY et al., 2005). Bei der EVA-Flachfolie kamen wahrscheinlich durch die Copolymerisation von Ethylen mit Vinylacetat noch einige Banden hinzu, etwa bei 1368 cm^{-1} und bei 1238 cm^{-1} , wo die Absorptionsbanden der Acetat-Gruppen zu finden sind (GÜNZLER, 1998). Die Peaks bei 1740 cm^{-1} und 1712 cm^{-1} wurden, ebenso wie 722 cm^{-1} , von BRIASSOULIS et al. (2004) und FEUILLOLEY et al. (2005) auf Carbonyl-Gruppen zurückgeführt, die das Ergebnis einer starken Oxidation von PE-Molekülketten durch UV-Strahlung sind. Bei den Biofolien könnte der bei 1712 cm^{-1} gemessene Peak auf die Carbonylgruppe vom Polycaprolacton zurückzuführen sein.

Der deutlichste Unterschied zwischen der PE-Mulchfolie und der EVA-Flachfolie war das Absinken der Basislinie im Fingerprintbereich bei der schwarzen PE-Mulchfolie. Dieses könnte auf einen hohen Brechungsindex der Probenoberfläche zurückzuführen sein, bedingt durch die Verwendung von Kohlenstoff als Farbpigment (ANONYMUS (C), 2008). Dieser Effekt war in abgeschwächter Ausprägung, auch bei den Biofolien zu erkennen

und wird von SCARASCIA-MUGNOZZA et al. (2006) mit einer Abnahme der Stärkegehalte in der Folienmatrix durch biologischen Abbau erklärt.

Auffällig bei den bioabbaubaren Folien war, dass zwischen den Spektren der schwarzen Mulch- und transparenten Flachfolien nur geringfügige Unterschiede feststellbar waren und zwischen den verwendeten Granulaten der Biofolien kein Unterschied erkennbar war.

Bei den Biofolien sind die Absorptionen der CH_2 - und CH_3 -Gruppen hauptsächlich im Fingerprint-Bereich bei 720 cm^{-1} zu finden, die PE-Doppelbande bei 2930 cm^{-1} und 2850 cm^{-1} ist nur ansatzweise zu erkennen und könnte nach BRIASSOULIS (2006a) vom auf LLDPE-Basis hergestellten Carbon Black Master-Batch KRITILEN BLACK (siehe Tabelle 3.1-2) stammen. Nicht ganz auszuschließen ist, dass die Reinigungsmittel der Folienproben, Propanon (Aceton) und Ethanol für zwei der Banden bei 1740 cm^{-1} und 1018 cm^{-1} mitverantwortlich sind. Eine andere Möglichkeit der Interpretation wären Stoffe, die bei der Folienproduktion verwendet wurden, wie z.B. UV-Stabilisatoren, Antioxidantien, oder Gleitmittel. BÜCHTEMANN et al. (1997) untersuchten die Absorptionsänderungen einer Stärkefolie infolge Wasseraufnahme des Materials durch Luftfeuchterhöhung. Die entsprechenden Banden lagen bei 3400 cm^{-1} , 1640 cm^{-1} und 700 cm^{-1} . Für die vorliegenden Messungen wurde der Feuchtegehalt der Proben bei der Lagerung nicht berücksichtigt. Es ist keine Übereinstimmung in den Messergebnissen zu finden, einzig die Bande bei 720 cm^{-1} , die aber bei allen Folienproben festgestellt wurde, liegt im näheren Bereich. Ob hier eine Beziehung zum Feuchtegehalt der Proben besteht, ist besonders für die PE-Folien, zweifelhaft.

Bei SCARASCIA-MUGNOZZA et al. (2006) wurde mittels ATR die Anwesenheit und über die Versuchsdauer die Abnahme von Stärke der Folienoberflächen im Wellenzahlbereich von 3200 cm^{-1} nachgewiesen. BASTIOLI (2005) hingegen gibt für die Schwingungen von Stärkeringen einen Bereich mit 960 cm^{-1} bis 920 cm^{-1} an. In beiden Bereichen zeigten alle unbenutzten biologisch abbaubaren Folien der vorliegenden Messungen entsprechende Banden, die möglicherweise darauf zurückzuführen sind.

GORDON et al. (2000) bestimmten in ihren Untersuchungen das IR-Spektrum von reinem Maisstärke-Pulver. Im dargestellten Ausschnitt von 1900 cm^{-1} bis 900 cm^{-1} sind deutliche Parallelen bei der Verteilung der Peaks zu den vorliegenden Ergebnissen zu erkennen. Daraus lässt sich die Annahme ableiten, dass die Plastifizierung von Maisstärke und die Copolymerisation molekular gesehen keine großen Änderungen

bewirken. DEMIRGÖZ et al. (2000) untersuchten chemisch modifizierte Stärke/ Polycaprolacton-Blends, geliefert von Novamont (Italien). Das ermittelte IR-Spektrum vom Ausgangspolymer weist einen starken Peak bei 3391 cm^{-1} (Streckungsschwingungen von Stärke-Hydroxyl-Gruppen) auf. Gleiches gilt für AVELLA et al. (2000), die das IR-Spektrum von reinem Polycaprolacton ermittelten, in dem bei 1736 cm^{-1} (Ester-Band) und 2900 cm^{-1} zwei starke Peaks zu erkennen sind. Diese werden mit Streckungsschwingungen von Hydroxyl-Gruppen erklärt. Diese Peaks sind in den eigenen Messungen nicht mal ansatzweise zu erkennen, trotz angeblich gleichem Versuchsmaterials (BRIASSOULIS, 2004). Nach diesen Informationen läßt sich das eigene Versuchsmaterial eher der reinen Stärke zuordnen, als einem Copolymer mit Polycaprolacton oder einem anderen petrochemischen Bestandteil. KOSIOR et al. (2006) geben die Inhaltsstoffe von Mater-Bi NF01U mit $>85\%$ Stärke und Copolyester als Beimischung an, was die eigenen Schlußfolgerungen unterstützt. Um diese Frage eindeutig zu klären müssten mehr Referenzmaterialien in die ATR-Messungen miteinbezogen werden, was im Rahmen dieser Arbeit nicht zu leisten war.

Bei der Betrachtung der Ergebnisgrafiken der ATR-Messungen fallen die mit fortschreitender Expositionsdauer zunehmenden und z.T. wieder abnehmenden Transmissionswerte auf, was auf Veränderungen der untersuchten Polymeroberflächen aller untersuchten Folienvarianten schließen läßt. Während die biologisch abbaubaren Folienproben des Bewitterungsversuches nach fünf Wochen Expositionszeit noch stabil waren, zeigten die kompostierten Proben bei ähnlichen Meßwerten zum selben Zeitpunkt starke Alterungserscheinungen mit z.T. deutlichen Materialverlusten und -instabilität. Bei den PE-Folien waren keine sichtbaren Veränderungen des Versuchsmaterials durch die beiden Expositionsarten festzustellen, trotz vergleichbarer Messergebnisse. Folglich müssten auf den Folienoberflächen Unebenheiten vorzufinden sein, die zu einer Reduzierung der Kontaktflächen der Proben zum ZnSe-Kristall und so verminderten Messergebnissen führten. Untersuchungen von MASSARDIER-NAGEOTTE et al. (2006) und SCARASCIA-MUGNOZZA et al. (2006) bestätigten durch elektronenmikroskopische Untersuchungen von Mater-Bi-Folien aus Freilandversuchen diese These. Dabei wurde eine zunehmende Mikro-Porosität der Folienoberflächen festgestellt, die wahrscheinlich auf einen selektiven Abbau von Stärkemolekülen durch Bodenmikroorganismen zurückzuführen war, die auf der Folienoberfläche in abgegrenzten Arealen zu finden waren und zuerst einem Abbau unterlagen. Bei KUUTTI

et al. (1998), wo die Alterung von Folien aus thermoplastischer Hafer- und Gerstestärke ebenfalls elektronenmikroskopisch untersucht wurde, wurden Änderungen der Folienoberflächenstrukturen festgestellt, die auf eine Phasentrennung der Stärke-Glycerin-Wasser-Matrix im Kunststoff zurückgeführt wurde. Das Glycerin diffundiert in diesem Fall an die Kunststoffoberfläche und erzeugt dort Bereiche unterschiedlicher Oberflächenstruktur, wo ein Materialverlust durch Abbau eher möglich war.

In der Literatur finden sich weitere Berichte über Untersuchungen von Folienoberflächen mittels ATR. CARVALHO et al (2005) konnte chemische Oberflächenreaktionen von Folien aus thermoplastischer Stärke mittels ATR nicht nachweisen, ebenso, wie MASSARDIER-NAGEOTTE et al. (2006), wo keine signifikanten Veränderungen der Oberflächen von Mater-Bi-Folien nachgewiesen werden konnten, trotz des o.g. selektiven Abbaues von Stärkemolekülen auf der Polymeroberfläche.

Auch bei PE-Folien ist eine Veränderung der Oberfläche bereits nach einer kurzen Expositionszeit denkbar. Nach BRIASSOULIS (2004) ist dieses bei den Bewitterungsproben aufgrund der relativen Empfindlichkeit der PE-EVA-Folien gegenüber der UV-Strahlung möglich. VAN DER ZEE (2005) weist auf einen langsamen Bioabbau von LD-PE zu CO₂ von 0,35 % in 2,5 Jahren hin. FEUILLOLEY et al. (2005) nennt eine Abbaurrate von 3 % pro Jahr von PE ohne Additive, wobei UV-Strahlung die Abbauprozessrate verdoppeln kann. Die Veränderungen der Folienoberflächen sind bei den PE-Folien sicherlich wesentlich geringer, als bei den bioabbaubaren Folien, was bei den vorliegenden Messergebnissen für die hohe Sensibilität der Oberflächenanalyse mittels ATR spricht. Aufgrund der Tatsache, daß bei den PE-Folien dieselben Effekte festgestellt und bei den bewitterten Folienproben zum Versuchsende wieder abnehmende Transmissionswerte gemessen wurden, führt zu der Schlussfolgerung, dass mit ATR als alleiniger Messmethode lediglich Veränderungen an Folienoberflächen festgestellt werden können. Rückschlüsse auf den Abbaugrad oder die Stabilität der Folienproben sind nach den Erkenntnissen der vorliegenden Untersuchung nicht möglich.

Ein weiterer Erklärungsansatz für den „Erholungseffekt“ ist in den Untersuchungen von TOCHETTO et al. (2001) beschrieben. Dort wurden bei bewitterten schwarzen HDPE-Mulchfolien nach Versuchsbeginn zunächst ansteigende Werte bei der Reißfestigkeit festgestellt, die dann zum Ende der Expositionszeit wieder abnahmen, was auf Reorganisation stark vernetzter Polymerketten in Bereichen erhöhter Kristallinität der Folienmatrix zurückgeführt wurde. Die Ergebnisse zu den mechanischen Eigenschaften

der vorliegenden Versuchsfolien ließen keine Hinweise in diese Richtung erkennen (BRIASSOULIS, 2006a), zumal LLDPE-Folien verwendet wurden und die Möglichkeit der Übertragung auf die bioabbaubaren Folien fraglich ist.

Die untersuchten Proben aus dem Freilandversuch 2003 zeigten im Vergleich zu den unbenutzten Folienproben nur geringe Unterschiede in der Transmission. Da die Proben ausschließlich von der Beetmitte entnommen wurden und zusätzlich während der Kulturzeit für 4 Wochen durch eine Flachfolie bedeckt waren, ist die geringe Zunahme der Transmission, d.h. der geringe Abbau der Folienoberflächen, nachvollziehbar. Hinzu kommt noch der andere Winkel zur Sonneneinstrahlung, da die bewitterten Folien im Herbst in einem 45 °-Winkel zur Sonneneinstrahlung exponiert wurden und die Beete im Frühsommer eine horizontale Ausrichtung hatten. Die Folienunterseite kann nur einen sehr geringen Bodenkontakt an der Messstelle gehabt haben, da die durch die Kulturmaßnahmen (Düngung, Bewässerung) bewirkten Bedingungen unter der Mulchfolie einen biologischen Abbau erwarten ließen.

In weiterführenden Arbeiten müsste eine Analyse der quantitativen Zusammensetzung der Folienoberfläche erfolgen und zusammen mit einer elektronenmikroskopischen Untersuchung der Oberflächen in die Betrachtung mit einbezogen werden. Hilfreich wären auch wesentlich dickere Untersuchungsmaterialien ($>100 \mu\text{m}$), da es dann möglich wäre, längere Kompostierungsversuche als in der vorliegenden Arbeit durchzuführen und die Folienproben einer stärkeren mechanischen Aufbereitung zu unterziehen. Ohnehin wäre eine andere Art der Probenaufbereitung überlegenswert, um eventuelle Fehler der vorliegenden Arbeit bei der Probenreinigung auszuschließen. Für Folienproben aus Freilandversuchen wäre eine Untersuchung der gesamten Folienbreite aufschlussreich, damit auch die Bereiche mit Bodenkontakt einer Messung unterzogen werden können. Für eine statistische Auswertung müsste ein Versuchsansatz gewählt werden, der eine höhere Anzahl von Proben und Messwiederholungen aufweist, als dies in der vorliegenden Untersuchung der Fall war.

5.2.3 Wasserdampfdurchlässigkeit

Die Untersuchungen zur Wasserdampfdurchlässigkeit der Versuchsfolien wurden unter simulierten Freilandbedingungen in einem Kühlraum durchgeführt. Ziel war es die WDD der Folien zu den verschiedenen Tageszeiten zu ermitteln und auf Unterschiede zu prüfen. Dabei wurde von einer höheren WDD der biologisch abbaubaren Folien im Vergleich zu den konventionellen Folien ausgegangen.

Ausschlaggebend war ein Versuchsbericht des Projektpartners CEMAGREF aus Montpellier/Frankreich, wo im Versuchsjahr 2003 von geringeren Erträgen bei einer Wassermelonenkultur auf den Parzellen mit bioabbaubarer Folie im Vergleich zur konventionellen Kontrolle berichtet wurde. Als Begründung wurde eine geringere Wasserversorgung angeführt, da die Bewässerungssteuerung durch Bodenfühlern unter einer PE-Parzelle erfolgte (FEUILLOLEY, 2003). In den eigenen Freilandversuchen wurde die Bewässerung nach der Wasserspannung der Nullparzellen (ohne Folienverwendung) gesteuert und somit konnte von einer ausreichenden Wasserversorgung unter den Folienparzellen ausgegangen werden.

In den durchgeführten Messungen wurden für die Biofolien erwartungsgemäß höhere Wasserdampfdurchlässigkeiten ermittelt, als für die PE-Folien. Zusätzlich ist eine höhere Streuung der Tageswerte bei den Messwerten der schwarzen Mulchfolien festzustellen. Das lässt auf den Einfluss der Einstrahlung auf die schwarzen Versuchsmaterialien schließen. Eine Erhöhung der WDD schwarzer Versuchsmaterialien durch Erwärmung wird auch in der Literatur beschrieben (TOCHETTO et al., 2001). So lassen sich möglicherweise auch die nicht nachweisbaren funktionellen Zusammenhänge der Permeationskoeffizienten bei den Mulchfolien erklären. Im Gegensatz dazu sind bei den transparenten Flachfolien bei allen untersuchten Permeationskoeffizienten funktionelle Zusammenhänge erkennbar gewesen.

Die transparenten bioabbaubaren Materialien wiesen eine höhere WDD auf, als die schwarzen, bzw. grünen, was nach HESLER (2007) auf den Mulchfolien Master-Batch zurückzuführen ist, der zu einer Minderung der WDD führt. Einen Unterschied in der WDD zwischen den beiden verwendeten Granulaten NF803(/P) und NF01U(/P) konnte nicht festgestellt werden.

In Tabelle A-2 im Anhang sind einige Wasserdampfdurchlässigkeiten aus der Literatur aufgelistet. Diese Werte sind nach den jeweils gültigen DIN-53122-1, ISO 2528:1995, bzw. ASTM E-96 Normen ermittelt worden. Bei der DIN-53122-1 z.B. wird die zu untersuchende Folie luftdicht über einem mit Trocknungsmittel gefüllten Behälter gespannt. Dabei sollte die Luftfeuchte in der Schale, bedingt durch das darin enthaltene Trocknungsmittel Calciumchlorid oder Silikagel, unter 1 % liegen. Im Verdampfungsraum werden verschiedene Temperaturen (z.B. 25 ± 1) °C und relative Luftfeuchten (z.B. 75 ± 2 %) eingestellt und die Gewichtszunahme des Probenbehälters nach bestimmten Zeitspannen (z.B. 24 h oder 48 h) durch Wägung bestimmt.

Bei den eigenen Versuchen lag die relative Luftfeuchte im Versuchsraum bei durchschnittlich 54 % und in der Probenschale bei angenommenen 100 %. Daraus lässt sich folgern, dass die maximale WDD der Versuchsfolien durch das wesentlich höhere Wasserdampfsättigungsdefizit eher mit der DIN-Methode ermittelt werden kann, als mit der vorliegenden Messmethode. So lassen sich im Vergleich zur Literatur niedrigen WDD der Biofolien erklären.

Vergleicht man die gemessenen Werte von PE mit denen aus der Literatur, so sind die selbst ermittelten Permeationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Foliendicke etwas höher. Dies ist wahrscheinlich auf Undichtigkeiten bei der Befestigung der Folien auf der Wasserschale zurückzuführen, da in der Tagphase ein Nachlassen der Folienspannung bei den PE-Folien festgestellt wurde, sodaß die schwarzen PE-Folien im laufenden Versuch erneut eingespannt werden mussten. Bei den Biofolien wurde keine nachlassende Materialspannung auf den Wasserschalen festgestellt.

Die WDD ist nach BERTUZZI et al. (2007) von den Faktoren Temperatur, Foliendicke und dem Gehalt an Weichmachern abhängig. Durch höhere Temperaturen steigen die Diffusions- und Lösungskoeffizienten von Polymeren für Gase und Wasserdampf. Dies liegt an der bei höheren Temperaturen verstärkten Anregung der Polymersegmente und auch am höheren Energiegehalt der durchtretenden Moleküle. NENTWIG (2006) beschreibt ergänzend den Einfluß der chemischen Struktur des Polymers und die Verwandtschaft zum diffundierenden Stoff als Faktoren der Durchlässigkeit. Je geringer die Kristallinität eines Kunststoffes, desto höher ist die Permeabilität, da die amorphen Bereiche eine höhere Wanderungsgeschwindigkeit der diffundierenden Stoffe zulassen.

In welcher Höhe die Gradienten der Luftzustände zwischen Versuchsaufbau und der Umgebung vorlagen, kann nicht mit absoluter Sicherheit gesagt werden, da sich keine

Messeinrichtung in der Wasserschale befand. Für die Berechnungen wurde von der Annahme der Wassersättigung in der Schale, bezogen auf eine Temperaturmessung am äußeren unteren Schalenrand, ausgegangen. Kontrollmessungen der Foliendicke wurden in den eigenen Versuchen nicht vorgenommen, jedoch wurden von BRIASSOULIS (2006b) Abweichungen der Foliendicke bei Versuchsfolien desselben Projektes von den angegebenen Werten festgestellt. Außerdem ist die genaue stoffliche Zusammensetzung der Biofolien, also auch Gehalt und Art der Weichmacher, nicht bekannt. Für die Untersuchungen zur WDD wurden ausschließlich unbenutzte Folienproben verwendet, die zum Zeitpunkt der Durchführung Mitte 2005 bis zu drei Jahre alt waren. Unterschiedliche Lagerbedingungen und -zeiten könnten die Barriereigenschaften verändert haben, zumal bei der in zwei Freilandversuchen verwendeten bioabbaubaren Mulchfolie M4 nach einem Jahr Lagerung Unterschiede in der Elastizität festgestellt wurden (siehe Kap. 5.2.1).

Die gelochten Flachfolien zeigten erwartungsgemäß eine höhere WDD, als die ungelochten Vergleichsfolien. Die Unterschiede fielen bei den bioabbaubaren Folien geringer aus, als bei den EVA-Folien, bedingt durch die höhere Materialdurchlässigkeit der Biofolien.

Bei den Versuchen zur Wasserdampfdurchlässigkeit wäre es hilfreich gewesen, zusätzlich Messungen in Anlehnung an die DIN Norm 53 122 (Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit) durchzuführen. Damit wären direkte Vergleiche mit Literaturwerten möglich und eine Interpretation der vorliegenden Messung wäre leichter gewesen. Zusätzliche Messungen der WDD von benutzten Folienteilen hätten Aussagen über den Einfluss der Alterung und des biologischen Abbaues möglich gemacht und wären ein interessanter Ansatz für zukünftige Versuche.

Der gewählte Versuchsansatz und der vorliegende Versuchsaufbau beinhalten eine Vielzahl von Störgrößen, die eine Interpretation der Messergebnisse nur sehr eingeschränkt zulassen. Da die Waagen sehr empfindlich auf Luftbewegungen reagierten, wurden deren Messergebnisse durch die Vielzahl der Lüfter (Netzteile, Peltier-Element-Kühler) auf dem Messtisch beeinflusst. Hier wären für zukünftige Messungen nach derselben Methode Nachbesserungen notwendig. Gleiches gilt für die Einspannvorrichtung der Versuchsfolien auf der Messschale.

Im Rahmen der Datenauswertung wurde festgestellt, dass der verwendete Kühlraum wider Erwarten nicht aussentemperaturunabhängig war. Dies führte dazu, dass die

einzelnen Messtage für eine statistische Auswertung nicht als Wiederholungen herangezogen werden konnten. Zusätzlich schlossen technische Gründe eine Verlängerung der Versuchsdauer und damit die Wiederholung von Messungen aus und machten eine statistische Auswertung nicht möglich.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In der vorliegenden Arbeit wurden neue biologisch abbaubare Mulch- und Flachfolien aus Mater-Bi in vier gemüsebaulichen Freilandversuchen mit einer konventionellen PE-Folienkombination und einer Nullparzelle verglichen. Vor dem Hintergrund hoher Materialpreise der biologisch abbaubaren Kunststoffe wurden die Folienstärken der Biofolien von Versuch zu Versuch reduziert, um die dünnstmögliche Folie mit akzeptablen Eigenschaften herauszufinden. Schwerpunkte der Untersuchungen in den Freilandversuchen waren die Einflüsse auf die Wachstumsparameter (Bodentemperatur, Bodenfeuchte, Luftzustände und Einstrahlung unter Flachfolie), sowie der Frischmasseertrag und die Haltbarkeit der Biofolien. In zusätzlichen Labormessungen wurden die Auswirkungen von Alterung und biologischem Abbau auf die spektrale Durchlässigkeit und die Folienoberflächen der Versuchsvarianten ermittelt. Messungen zur Wasserdampfdurchlässigkeit dienten der Ermittlung der Barriereigenschaften.

In den Freilandversuchen konnten z.T. signifikante Erhöhungen der Wachstumsparameter und der Erträge der Folienkombinationen gegenüber dem unbedeckten Boden festgestellt werden. Die verwendeten biologisch abbaubaren Folienkombinationen zeigten keine signifikanten Unterschiede in den gemessenen Parametern zu den konventionellen PE-Kontrollen, obwohl die Werte der konventionellen Folien häufig höher waren. In den Laborversuchen wurden z.T. deutliche Unterschiede zwischen den Versuchsmaterialien festgestellt. Bei den Messungen der Strahlungsdurchlässigkeit wurden materialspezifische Unterschiede zwischen den Folienvarianten gemessen. Transparente Mater-Bi-Folien zeigten, im Gegensatz zu PE-Flachfolien, unterhalb von 300 nm eine vollständige Absorption der Strahlung und über die Expositionszeit abnehmende Transmissionsraten. Bei allen schwarzen Mulchfolien war keine Strahlungsdurchlässigkeit im UV- und PAR-Bereich feststellbar, Unterschiede waren lediglich im Bereich der Durchlässigkeit für IR-Strahlung vorhanden. Die Messungen zur Wasserdampfdurchlässigkeit ergaben eine höhere WDD der biologisch abbaubaren Folien, wobei keine Abhängigkeiten von der Materialdicke und dem Ausgangsgranulat ermittelt werden konnten.

Ferner wurde mittels der attenuierten Totalreflexion festgestellt, dass molekulare Veränderungen der Folienoberflächen aller untersuchten Folienarten, sowohl durch Alterung, als auch durch Biodegradation, gleichermaßen schnell einsetzen. Die Ursachen hierfür sind bei den bioabbaubaren Folien im Materialaufbau zu finden, der amorphe und kristalline Bereiche enthält, von denen die amorphen Bereiche einer schnelleren selektiven Degradation unterliegen. Gleiches wurde auch für die Oberflächen der LLDPE-Folien festgestellt, wobei die Veränderungen hier, wie auch in den Freilandversuchen, nicht zu einem Verlust an Reißfestigkeit führten (BRIASSOULIS, 2006a).

Ein Unterschied zwischen den beiden zur Folienherstellung verwendeten bioabbaubaren Granulaten konnte in den durchgeführten Untersuchungen nicht festgestellt werden. Nach den Herstellerangaben liegen die Unterschiede der beiden verwendeten Granulate in den unterschiedlichen Haltbarkeiten in bestimmten Klimaten (GUERRINI, 2004).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die bioabbaubaren Folien auch bei reduzierter Materialdicke die in den durchgeführten Freilandversuchen gestellten Anforderungen hinsichtlich der Haltbarkeit und der Funktionalität erfüllten. Somit scheint eine Substitution von konventionellen Kunststofffolien in gemüsebaulichen Kulturen durch biologisch abbaubare Folien prinzipiell möglich. Allerdings müssen die Materialeigenschaften der Biofolien bei dieser Bewertung mit berücksichtigt werden. Mit abnehmender Foliendicke wurde bei den Biofolien eine zunehmende Empfindlichkeit gegen mechanische Belastungen festgestellt.

Ein großer Nachteil war die festgestellte Neigung der Biofolien bei der gleichzeitigen Verwendung als Mulch- und Flachfolie an den Kontaktflächen miteinander zu verkleben. Diese durch Niederschlagseinwirkung und anschließender Trocknung hervorgerufene Reaktion war wahrscheinlich auf Quell- und Schrumpfvorgänge der hydrophilen Stärkekomponente der Biofolien zurückzuführen. Eine gleichzeitige Verwendung von Mulch- und Flachfolie aus Mater-Bi ist, bedingt durch diese Eigenschaft, nicht zu empfehlen.

Ausblick

Biologisch abbaubare Polymere haben in den Bereichen Landwirtschaft und Gartenbau ihren Einzug erhalten, weil dort die biologische Abbaubarkeit den eigentlichen technischen Nutzen darstellt. Eine Einführung in Verwendungsbereichen, wo eine Konkurrenz zu über lange Zeiträume optimierten und spezialisierten synthetischen Kunststoffen be-

steht, bedarf einiger Anstrengungen, da die technischen Anforderungen schwer erfüllbar zu sein scheinen. Gute Barriereigenschaften gegenüber Gasen (O₂, CO₂, etc.) und Wasserdampf stehen den konkurrierenden Eigenschaften Hydrophobie und biologischer Abbaubarkeit gegenüber (FRITZ et al., 1994).

Tab. 6-1: Ernteverfrühung bei Gemüse, Spargel und Erdbeeren (Angaben in ha) in Deutschland von 2000 bis 2004 (KTBL E.V., 2007)

Jahr				Spargel		Erdbeeren	Mulchfolie
	Folie	Vliese	Doppel-abdeckung	transparen-te Folie	schwarze Folie	Folien/Vlies	
2000	2324	7440	1825	1858	3818	1680	3870
2002	2516	8645	2048	2960	6203	2026	3714
2004	2002	9467	1669	1595	11104	2829	3843

(Angaben beruhen auf einer bundesweiten Befragung von Beratern der deutschen Anbauggebiete)

Anhand der in Tabelle 6-1 aufgezeigten Flächen der Ernteverfrühung in Deutschland lässt sich ein steigendes Interesse an der Verwendung von Kunststoffen im Gartenbau ableiten und auch die Menge an substituierbare Kunststoffmenge abschätzen. Die in Abb. 6-1 dargestellte Entwicklung des Rohölpreises zeigt seit dem Jahr 2004 im Jahresdurchschnitt einen deutlichen Anstieg. Beide Entwicklungen können die Einsatzchancen von biologisch abbaubaren Kunststoffen im Gartenbau positiv beeinflussen, da auf diese Art eine Annäherung der Produktpreise beider Materialklassen (siehe Kap. 1.2) zu erwarten ist. Allerdings muss hierbei berücksichtigt werden, dass die verwendeten Mater-Bi Granulate zum Teil aus petrochemischen Rohstoffen bestehen, also nicht vollständig aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt sind. Somit spielt der Ölpreis auch für die Preisentwicklung dieser Mater-Bi-Klassen eine Rolle.

Die Vorteile von Polymeren aus nachwachsenden Rohstoffen liegen in der Schonung der fossilen Rohstoffvorräte und in der CO₂-Neutralität des Anteils nachwachsender Rohstoffe bei der Verbrennung (BASTIOLI, 1998; GROOT et al. 2000). Ein weiterer Vorteil ist die Müllvermeidung durch Kompostierung und somit Schonung der vorhandenen Deponiekapazitäten. Allerdings hat dieser Aspekt durch die Einführung von Kunststoff-Recycling-Kreisläufen und Gesetzen zur thermischen Vorbehandlung von Deponie-Müll an Bedeutung verloren (PATEL, 2005).

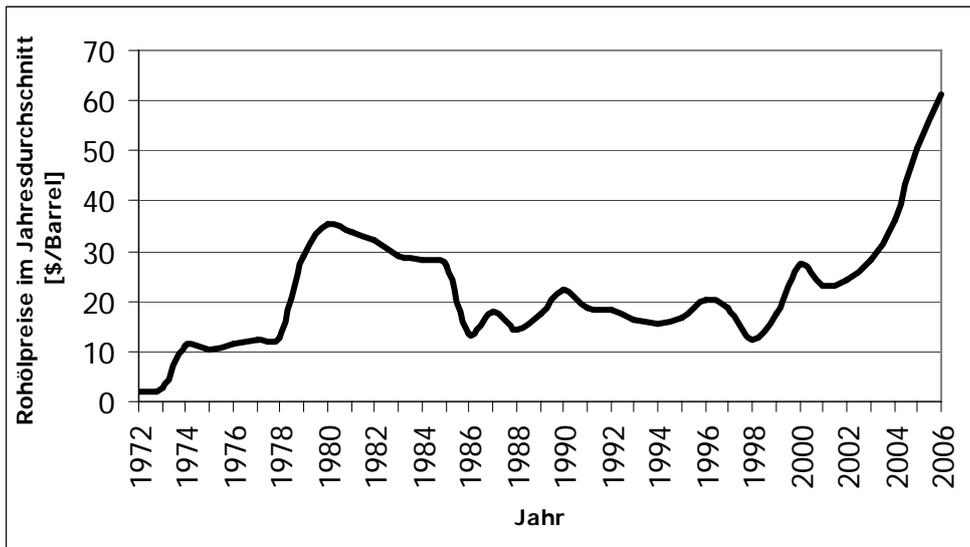


Abb. 6-1: Jahresdurchschnittspreise vom OPEC-Rohöl im Zeitraum von 1972 bis 2006 (MINERALÖLWIRTSCHAFTSVERBAND E.V. (2008))

Im Gartenbau sind, neben der Nutzung als Mulch- oder Flachfolie, eine Vielzahl weiterer Einsatzbereiche für bioabbaubare Kunststoffe denkbar (GROOT et al, 2000). Untersuchungen zur Eignung biologisch abbaubarer Pflanztöpfe zur Verwendung im Gartenbau wurden am selben Institut intensiv durchgeführt. Ein zusätzlicher möglicher Verwendungszweck wären Bewässerungsschläuche aus bioabbaubaren Kunststoffen, die unter der Mulchfolie verlegt, zusammen mit dieser nach Kulturende durch Einarbeitung in die Fläche entsorgt werden könnten.

Weiterentwicklungen, bzw. Modifikationen der biologisch abbaubaren Materialien könnten die Biofolien für weitere Anwendungen im Gartenbau konkurrenzfähiger machen. SCHETTINI et al. (2007) testeten eine bioabbaubare Sprühmulchfolie im Vergleich mit einer Mater-Bi-Folie und einer konventionellen Kontrolle. Dabei zeigte die Sprühfolie zwar schlechtere Barriere-Eigenschaften, als die herkömmlichen Polymerfolien, aber Vorteile gegenüber dem unbedeckten Boden waren vorhanden.

Eine andere Möglichkeit der Modifikation bioabbaubarer Kunststoffe ist die Zugabe von Naturfasern, wie Hanf, Flachs, Jute oder *Miscanthus giganteus*. WOLLENDORFER et al. (1998) und JOHNSON et al. (2005) stellten dabei erhöhte Reißfestigkeiten bioabbaubarer Folien fest. Ein weiterer Ansatz zur Erhöhung der Widerstandsfähigkeit bioabbaubarer Kunststoffe ist bei YOSHII et al. (2003) beschrieben. Dort konnte mittels eines Elektronenstrahles die Vernetzung von polyfunktionellen Monomeren und der Polymeroberfläche durchgeführt werden, was eine leichte Reduktion der biologischen Abbaubarkeit zur

Folge hatte. MOHANTY et al. (2002) halten Verbundstoffe von Naturfasern mit biologisch abbaubaren oder konventionellen Kunststoffen als Ersatz für glasfaserverstärkte Kunststoffe für möglich, was Chancen für die Verwendung in der Industrie aufzeigt.

GROSS et al. (2002) stellen die Möglichkeiten der Gentechnik zur zukünftigen Herstellung von Monomeren oder Polymeren durch Enzyme, Mikroben oder Pflanzen als eine besonders saubere, preisgünstige und effiziente Möglichkeit dar. An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass zur Herstellung von Mater-Bi keine gentechnisch veränderten Rohstoffe verwendet wurden (GUERRINI, 2004).

Die Frage, inwieweit bioabbaubare Kunststoffe bezüglich Umweltgesichtspunkten Vorteile gegenüber konventionellen Kunststoffen bieten, wurde von PATEL (2005) erörtert. Dieser hat bei einer Auflistung von Life-Cycle-Assessment-Untersuchungen (LCA) keine Vorteile von Stärke-Kunststoffen (Mater-Bi Z-Klasse) im Vergleich zu petrochemischen Kunststoffen finden können. Sie wurden nur als nützlicher verglichen mit den petrochemischen Kunststoffen bewertet. Da aber die einzelnen LCAs nicht einheitliche Faktoren berücksichtigten, kann keine eindeutige Schlussfolgerung erfolgen. Die „grünen Kunststoffe“ werden oft mit der Eigenschaft „Fühlen sich an, wie existierende Produkte“ angepriesen. Es wäre wichtig, dass Biopolymere bei ihrer Entwicklung und Vermarktung eine eigene Identität entwickeln, die die speziellen Eigenschaften dieser Materialien beinhaltet und hervorhebt (GROSS et al., 2002).

7 LITERATUR

- ANONYMUS (A)** (1999): User Manual ThetaProbe Type ML2x-UM-1.21. Delta-T Devices Ltd, 128 Low Road, Burwell, Cambridge CB5 0EJ, U.K.
www.delta.t.co.uk
- ANONYMUS (B)** (1998): Perkin Elmer - Horizontal ATR accessory - User's Guide.
www.perkinelmer.com
- ANONYMUS (C)** (2008): Distinguishing release agents on o-rings using ATR spectroscopy. Applications note No.60201. Harrick scientific products, 141 Tompkins Ave, Pleasantville, NY 10570, USA. www.harricksci.com
- ANONYMUS (D)** (2009): AgChem_2008_RoundupUltraMax_Wirksamkeit.pdf.
<http://www.roundup.de/infomaterial/infomaterial.php>
- ANONYMUS (E)** (2006): Sartorius AG, Göttingen : sartoriusAC_LC.pdf. Online verfügbar unter www.sartorius.de.
- AROLD, G.** (2003): Keine gesicherten Ertragsunterschiede durch abbaubare Mulchfolien im Vergleich zur praxisüblichen Mulchfolie bei Einlegegurken. Versuche im Deutschen Gartenbau - Gemüsebau. Verband der Landwirtschaftskammern (Hg.). Bonn: Rheinischer Landwirtschaftsverlag (15).
- AROLD, G.** (2004): Auch im zweiten Anbaujahr keine gesicherten Ertragsunterschiede durch unterschiedliche Mulchfolien bei Einlegegurken. Versuche im Deutschen Gartenbau - Gemüsebau. Verband der Landwirtschaftskammern (Hg.). Bonn: Rheinischer Landwirtschaftsverlag (16).
- AROLD, G.** (2005): Auch im dritten Anbaujahr keine gesicherten Ertragsunterschiede durch unterschiedliche Mulchfolien bei Einlegegurken. Versuche im Deutschen Gartenbau - Gemüsebau. Verband der Landwirtschaftskammern (Hg.). Bonn: Rheinischer Landwirtschaftsverlag (17).
- AVELLA, M.; ERRICO, M.E.; LAURIENZO, P.; MARTUSCELLI, E.; RAIMO, M.; RIMEDIO, R.** (2000): Preparation and characterisation of compatibilised polycaprolactone/starch composites. Polymer, Nr. 41, S. 3875-3881.

- BASTIOLI, C.** (1998): Properties and applications of Mater-Bi starch-based materials. *Polymer Degradation and Stability*, Nr. 59, S. 263–272.
- BASTIOLI, C.** (2005): Starch-Based Technology. *Handbook of Biodegradable Polymers*, S. 257–285. Rapra Technology Ltd. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, SY4 4NR, UK.
- BATES, D.; SARKAR, D.** (2007): lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and syntax. R package version 0.99875-0.
- BEAUREPAIRE, O. DE; MOUREAU, J.-J.** (2003): Fully degradable mulch film: results of two years of experience. *Biodegradable Materials and Natural Fibre Composites*. KTBL-Schrift 414, Jg. 2003, S. 67–70.
- BERTUZZI, M.A.; CASTRO VIDAURRE, ARMADA M.; GOTTIFREDI, J.C.** (2007): Water vapour permeability of edible starch based films. *Journal of food engineering*, Nr. 80, S. 972–978.
- BRAUN, J.** (2007): Mündliche Mitteilung von Frau Juliane Braun, Baumschulberatung, Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein.
- BRIASSOULIS, D.** (2004): An overview on the mechanical behaviour of biodegradable agricultural films. *Journal of Polymers and the Environment*, Jg. 12, Nr. 2, S. 65–81.
- BRIASSOULIS, D.; ARISTOPOULOU, A.; BONORA, M.; VERLODT, I.** (2004): Degradation characterisation of agricultural low-density polyethylene films. *Biosystems Engineering*, Nr. 88 (2), S. 131–143.
- BRIASSOULIS, D.** (2006a): Mechanical behaviour of biodegradable agricultural films under real field conditions. *Polymer Degradation and Stability*, Nr. 91, S. 1256–1272.
- BRIASSOULIS, D.** (2006b): Mechanical performance and design criteria of biodegradable low-tunnel films. *Journal of Polymers and the Environment*, Nr. 14, S. 289–307.
- BÜCHTEMANN, A.; DIETEL, R.** (1997): FTIR techniques for surface characterization. MÜLLER, E.H.; MEHNERT, W. (Hg.): *Particle and Surface Characterization Methods*. Medpharm Scientific Publishers, Stuttgart. S. 129 – 157.

- BVSE (BUNDESVERBAND SEKUNDÄRROHSTOFFE UND ENTSORGUNG E.V.)** (2007): Plasticker News: Marktberichte Altkunststoffe. Markt für Primärkunststoffe.
www.plasticker.de.
- CARLOWITZ, B.** (1995): Kunststoff-Tabellen. 4. Auflage München, Wien:
HanserVerlag.
- CARVALHO, A.; CURVELO, A.; GANDINI, A.** (2005): Surface chemical modification of thermoplastic starch: reactions with isocyanates, epoxy functions and steaoryl chloride. *Industrial Crops and Products*, Nr. 21, S. 331–336.
- DEGLI-INNOCENTI, F.** (2005): Biodegradation Behaviour of Polymers in the Soil. *Handbook of Biodegradable Polymers*, S. 57–102. Rapra Technology Ltd. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, SY4 4NR, UK.
- DEMIRGÖZ, D.; ELVIRA, C.; MANO, J.F.; CUNHA, A.M.; PISKIN, E.; REIS, R.L.** (2000): Chemical modification of starch based biodegradable polymeric blends: effects on water uptake, degradation behaviour and mechanical properties. *Polymer Degradation and Stability*, Nr. 70, S. 161–170.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG** (2001):, DIN 53122 - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DILARA, P.A.; BRIASSOULIS, D.** (2000): Degradation and stabilization of low-density polyethylene films used as greenhouse covering materials. *Journal of agricultural Engeneering and Research*, Nr. 76, S. 309–321.
- EBERT, G.** (1993): Biopolymere: Struktur und Eigenschaften. 1. Aufl. Stuttgart:
Teubner Verlag.
- ELSNER, B. VON** (1986): Problemlösungen für die Luftfeuchte im Gewächshaus. *Gärtnerbörse und Gartenwelt*, Jg. 86, Nr. 36, S. 1318–1336.
- ELSNER, B. VON** (2004a): Strahlungsdurchlässigkeit von Gewächshaus-Bedachungen. *Zierpflanzenbau*, Jg. 104, Nr. 6, S. 34–36.

- ELSNER, B. VON** (2004b): Photosensitive und farbige Gewächshausbedachungen. Die gartenbautechnische Bewertung der optischen Strahlungsdurchlässigkeit von Gewächshausbedachungen und Schattierungen. KTBL-Manuskriptdruck, Nr. 0282, S. 15–26.
- ELSNER, B. VON** (2005): Folien-Bedachungen für Gewächshäuser. Gartenbau Report, Nr. 3, S. 25–30.
- FEUILLOLEY, P.** (2003): Versuchsergebnisse einer Melonenkultur. Heraklion, Griechenland. mündlich.
- FEUILLOLEY, P.; CESAR, G.; BENGUIGUI, L.; GROHENS, Y.; PILLIN, I.; HILAIRE, B.; LEFAUX, S.; JAMAL, M.** (2005): Degradation of polyethylene designed for agricultural purposes. *Journal of Polymers and the Environment*, Vol. 13, No. 4, S. 349-355.
- FRITZ, H.; WIDMANN, B.** (1994): Biologisch abbaubare Kunststoffe - Möglichkeiten und Grenzen. Universität Stuttgart (Studium Generale).
- GIMENEZ, C.; OTTO, R.F.; CASTILLA, N.** (2002): Productivity of leaf and root vegetable crops under direct cover. *Scientia Horticulturae*, Nr. 94, S. 1–11.
- GOLDBERG, D.** (1995): A review of the biodegradability and utility of poly(caprolactone). *Journal of Environmental Polymer Degradation*, Jg. 3, Nr. 2, S. 61–67.
- GONZALES, A.; FERNANDEZ, J.; MARTIN, P.; RODRIGUEZ, R.; LOPEZ, J.; BANON, S.; FRANCO, J.** (2003): Behaviour of biodegradable film for mulching in open-air melon cultivation in south-east Spain. *Biodegradable Materials and Natural Fibre Composites*. KTBL-Schrift 414, S. 71–77.
- GORDON, S.H.; IMAM, S.H.; JAMES, C.** (2000): A method for measuring degradation of individual components in multicomponent biodegradable plastics by fourier transform infrared spectrometry. *Journal of Polymers and the Environment*, Jg. 8, Nr. 3, S. 125–134.
- GOTTWALD, W.; WACHTER, G.** (1997): IR-Spektroskopie für Anwender. Die Praxis der instrumentellen Analytik. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH.

- GRIMA, S.; BELLON-MAURET, V.; FEUILLOLEY, P.; SILVESTRE, F.** (2000): Aerobic biodegradation of polymers in solid-state conditions: A Review of Environmental and Physicochemical Parameter Settings in Laboratory Simulations. *Journal of Polymers and the Environment*, Vol. 8, Nr.4.
- GROOT, L.; PARUSCHKE, K.; SCHÜSSELER, P.; WEBER, C.; ZABELTITZ, C. VON** (2000): Biologisch abbaubare Werkstoffe im Gartenbau. Darmstadt: KTBL e.V. (386).
- GROSS, R.A.; KALRA, B.** (2002): Biodegradable polymers for the environment. *Science*, Nr. 297, S. 803–807.
- GUERRINI, S.** (2004): Mündliche Mitteilung von Frau Sara Guerrini, Agricultural Trials Manager von Novamont SpA., Novara Italien. Hannover.
- GÜNZLER, H.; GREMLICH, H.-U.** (1998): IR-Spektroskopie. 4. Aufl. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH.
- HELLERICH, W.; HARSCH, G.; HAENLE, S.** (2001): Werkstoff-Führer Kunststoffe. 8. Aufl. München, Wien: Carl Hanser Verlag.
- HESLER, F. VON** (2007): Persönliches Gespräch mit Herrn Dr. Friedrich von Hesler, Novamont GmbH, Eschborn.
- HUMMEL, D.; SCHOLL, F.** (1991): Atlas der Polymer- und Kunststoffanalyse. 2. Aufl. 3 Bände. München, Wien: Carl Hanser Verlag.
- JOHNSON, M.; TUCKER, N.; BARNES, S.; KIRWAN, K.** (2005): Improvement of the impact performance of a starch based biopolymer via the incorporation of *Miscanthus giganteus* fibres. *Industrial Crops and Products*, Nr.22, S 175-186.
- KAUFMANN, H.** (1991): Grundlagen der organischen Chemie. 9. Aufl. Basel: Birkhäuser Verlag.
- KELL, K.** (2001): Gute Erfahrungen mit neuer Biomulchfolie bei Kopfsalat im Sommeranbau. Versuche im Deutschen Gartenbau - Gemüsebau. Verband der Landwirtschaftskammern (Hg.). Bonn: Rheinischer Landwirtschaftsverlag (13).

- KELL, K.; JACKSCH, T.** (2003): Mehr Ertragssicherheit bei Knollenfenchel mit abbaubaren Mulchfolien. Versuche im Deutschen Gartenbau - Gemüsebau. Verband der Landwirtschaftskammern (Hg.). Bonn: Rheinischer Landwirtschaftsverlag (15).
- KELL, K.; JACKSCH, T.** (2005): Auswirkung verschiedenfarbiger biologisch abbaubarer Mulchfolien auf Kopfsalatanbau im Sommer. Versuche im Deutschen Gartenbau - Gemüsebau. Verband der Landwirtschaftskammern (Hg.). Bonn: Rheinischer Landwirtschaftsverlag (17).
- KOSIOR, E.; BRAGANCA, R.M.; FOWLER, P.** (2006): Lightweight compostable packaging: literature review. Milestone Report, Project Code: INN 0033/26. (Hg.) The Waste & Resources Action Programme (WRAP), The Old Academy, 21 Horse Fair, Banbury, Oxon OX16 0AH.
- KRUG, H.** (Hg.) (1991): Gemüseproduktion. Berlin, Hamburg: Paul Parey.
- KTBL E.V.** (2007): Ernteverfrühung, Folien, Vliese und Netze bei Gemüse und Erdbeeren. Online verfügbar unter www.ktbl.de/gkl.
- KUUTTI, L.; PELTONEN, J.; MYLLÄRINEN, P.; TELEMAN, O.; FORSELL, P.** (1998): AFM in studies of thermoplastic starches during ageing. Carbohydrate Polymers, Nr. 37, S. 7–12.
- LAUN, N; POSTWEILER, K.** (2003): Einsatz von Mulchfolie im ökologischen Anbau von Kohlrabi positiv. Versuche im Deutschen Gartenbau - Gemüsebau. Verband der Landwirtschaftskammern (Hg.). Bonn: Rheinischer Landwirtschaftsverlag (15).
- LAUN, N; POSTWEILER, K.; NAAB, B.** (2006): Bioabbaubare Mulchfolie auch für Frühlkulturen im Gewächshaus einsetzbar. Versuche im Deutschen Gartenbau - Gemüsebau. Verband der Landwirtschaftskammern (Hg.). Bonn: Rheinischer Landwirtschaftsverlag (18).
- LOCHER, J.; OMBODI, A.; KASSAI, T.; DIMENY, J.** (2005): Influence of coloured mulches on soil temperature and yield of sweet pepper. European Journal of Horticultural Science, Jg. 3, Nr. 70, S. 135–141.

- MARTIN-CLOSAS, L.; SOLER, J.; PELACHO, A.** (2003): Effect of different biodegradable mulch materials on an organic tomato production system. *Biodegradable Materials and Natural Fibre Composites*. KTBL-Schrift 414, S. 78–85.
- MASSARDIER-NAGEOTTE, V.; PESTRE, C.; CRURARD-PRADET, T.; BAYARD, R.** (2006): Aerobic and anaerobic biodegradability of polymer films and physico-chemical characterization. *Polymer Degradation and Stability*, Nr. 91, S. 620–627.
- MILES, C.; BECKER, G.; KOLKER, K.; ADAMS, C.; NICKEL, J.; NICHOLSON, M.** (2004): alternatives to plastic mulch for organic vegetable production.
<http://agsyst.wsu.edu>
- MILES, C.; REED, J.; KLINGLER, E.; NELSON, L.; SMITH, T.; KOLKER, K.; CROSS, C,** (2006): Alternatives to plastic mulch in vegetable production systems.
<http://vegetables.wsu.edu/MulchReport06.pdf>
- MINERALÖLWIRTSCHAFTSVERBAND E.V.** (2008); www.mwv.de
- MINUTO, G.; FARACHI, F.; GUERRINI, S.; GARIBALDI, A.** (2003): Weed control with biodegradable mulch in vegetable crops. *Biodegradable Materials and Natural Fibre Composites*. KTBL-Schrift 414, S. 101–105.
- MOHANTY, A.K.; MISRA, M.; DRZAL, L.T.** (2002): Sustainable bio-composites from renewable resources: opportunities and challenges in the green materials world. *Journal of Polymers and the Environment*, Vol. 10, Nr.1/2, S. 19-26.
- MYLLÄRINEN, P.; PARTANEN, R.; SEPPÄLÄ, J.; FORSSELL, P.** (2002): Effect of glycerol on behaviour of amylose and amylopectin films. *Carbohydrate Polymers*, Nr. 50, S. 355-361.
- NENTWIG, J.** (2006): *Kunststoff-Folien. Herstellung - Eigenschaften - Anwendung*. 3. Aufl. München, Wien: Carl Hanser Verlag.
- OBERBACH, K.** (1998): *Kunststoff Taschenbuch*. 27. Ausgabe München, Wien: Carl Hanser Verlag.
- PATEL, M.** (2005): *Environmental Life Cycle Comparisons of Biodegradable Plastics*. *Handbook of Biodegradable Polymers*, S. 431–484. Rapra Technology Ltd. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, SY4 4NR, UK.

- PIEPENBROCK, O.; FRICKE, A.; STÜTZEL, H.** (2003a): Reduktion des Blattlausbefalls durch verschiedenfarbiges Mulch. Versuche im Deutschen Gartenbau - Gemüsebau. Verband der Landwirtschaftskammern (Hg.). Bonn: Rheinischer Landwirtschaftsverlag (15).
- PIEPENBROCK, O.; FRICKE, A.; STÜTZEL, H.** (2003b): Verschiedenfarbiges Vliesmaterial beeinflusst Entwicklung und Ertrag bei Brokkoli. Versuche im Deutschen Gartenbau - Gemüsebau. Verband der Landwirtschaftskammern (Hg.). Bonn: Rheinischer Landwirtschaftsverlag (15).
- POSTWEILER, K.; LAUN, N.** (2003): Einsatz von Mulchfolie im ökologischen Anbau von Kohlrabi positiv. Versuche im Deutschen Gartenbau - Gemüsebau. Verband der Landwirtschaftskammern (Hg.). Bonn: Rheinischer Landwirtschaftsverlag (15).
- POSTWEILER, K.; LAUN, N.; ANDRAE, S.** (2004a): Einsatz biologisch abbaubarer Mulchfolie im ökologischen Anbau von Blumenkohl zeigte keine Vorteile. Versuche im Deutschen Gartenbau - Gemüsebau. Verband der Landwirtschaftskammern (Hg.). Bonn: Rheinischer Landwirtschaftsverlag (16).
- POSTWEILER, K.; LAUN, N.; ANDRAE, S.** (2004b): Einsatz von biologisch abbaubarer Mulchfolie im ökologischen Anbau von frühem Kopf- und Eissalat positiv. Versuche im Deutschen Gartenbau - Gemüsebau. Verband der Landwirtschaftskammern (Hg.). Bonn: Rheinischer Landwirtschaftsverlag (16).
- POSTWEILER, K.; LAUN, N.; ANDRAE, S.** (2004c): Einsatz von biologisch abbaubarer Mulchfolie im ökologischen Anbau von Kohlrabi mit wechselndem Erfolg. Versuche im Deutschen Gartenbau - Gemüsebau. Verband der Landwirtschaftskammern (Hg.). Bonn: Rheinischer Landwirtschaftsverlag (16).
- POSTWEILER, K.; LAUN, N.; ANDRAE, S.** (2005a): Einsatz von biologisch abbaubarer Mulchfolie im ökologischen Anbau von Kohlrabi auch im zweiten Versuchsjahr mit wechselndem Erfolg. Versuche im Deutschen Gartenbau - Gemüsebau. Verband der Landwirtschaftskammern (Hg.). Bonn: Rheinischer Landwirtschaftsverlag (17).

- POSTWEILER, K.; ANDRAE, S.** (2005b): Einsatz biologisch abbaubarer Mulchfolie bringt im ökologischen Anbau von Knollenfenchel Vorteile. Versuche im Deutschen Gartenbau - Gemüsebau. Verband der Landwirtschaftskammern (Hg.). Bonn: Rheinischer Landwirtschaftsverlag (17).
- POSTWEILER, K.; LAUN, N.; ANDRAE, S.** (2005c): Einsatz biologisch abbaubarer Mulchfolie im ökologischen Anbau von Kopf- und Eissalat auch im zweiten Jahr positiv. Versuche im Deutschen Gartenbau - Gemüsebau. Verband der Landwirtschaftskammern. Bonn: Rheinischer Landwirtschaftsverlag (18).
- POSTWEILER, K.; LAUN, N.; ANDRAE, S.** (2005d): Einsatz biologisch abbaubarer Mulchfolie im ökologischen Anbau von Blumenkohl zeigte auch im zweiten Jahr keine Vorteile. Versuche im Deutschen Gartenbau - Gemüsebau. Verband der Landwirtschaftskammern. Bonn: Rheinischer Landwirtschaftsverlag (18).
- R DEVELOPMENT CORE TEAM** (2007): R. A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Online verfügbar unter <http://www.R-project.org>.
- RICHTER, G.** (1988): Stoffwechselphysiologie der Pflanzen. 5. Aufl. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- SCARASCIA-MUGNOZZA, G.; SCHETTINI, E.; VOX, G.** (2004): Effects of solar radiation on the radiometric properties of biodegradable films for agricultural applications. *Biosystems Engineering*, Jg. 4, Nr. 87, S. 479–487.
- SCARASCIA-MUGNOZZA, G.; SCHETTINI, E.; VOX, G.; MALINCONICO, M.; IMMIRZI, B.; PAGLIARA, S.** (2006): Mechanical properties decay and morphological behaviour of biodegradable films for agricultural mulching in real scale experiment. *Polymer Degradation and Stability*, Nr. 91, S. 2801–2808.
- SCHETTINI, E.; VOX, G.; LUCIA, B. DE** (2007): Effects of the radiometric properties of innovative biodegradable mulching materials on snapdragon cultivation. *Scientia Horticulturae*, Vol. 112(4), S. 456-461.
- SCHMITZ, M.; KUYPER, M.C.** (1998): Soil moisture sensors in field application - A comparative study. *Zeitschrift für Bewässerungswirtschaft*, Jg. 33, Nr. 1, S. 87–102.

- SCHMITZ, M.; SOURELL, H.** (2000): Variability in soil moisture measurements. *Irrigation Science*, Nr. 19, S. 147–151.
- SCHREYER, L.** (2003): Widersprüchliche Ergebnisse beim Einsatz von Bio-Folie: Mindererträge 2003. Versuche im Deutschen Gartenbau - Gemüsebau. Verband der Landwirtschaftskammern (Hg.). Bonn: Rheinischer Landwirtschaftsverlag (15).
- SCHÜSSELER, P.** (2000): Einsatz biologisch abbaubarer Werkstoffe im Gemüsebau. *Gemüse*, Nr. 4, S. 25–28. Stuttgart: Ulmer Verlag.
- SCHÜSSELER, P.; ZABELTITZ, C. VON** (2004): Umweltgerechte Techniken in der Pflanzenproduktion. Stuttgart: Ulmer Verlag.
- SEITZ, P.** (1985): Folien und Vliese für den Gartenbau. 2. Aufl. Stuttgart: Ulmer Verlag.
- SPORY, K.; SAUER, H.** (2003): Abbaubare Mulchfolie in Bezug auf Frühzeitigkeit und Pflanzengesundheit mit PE-Folie vergleichbar. Versuche im Deutschen Gartenbau - Gemüsebau. Verband der Landwirtschaftskammern (Hg.). Bonn: Rheinischer Landwirtschaftsverlag (15).
- STRUZINA, A.** (1990): Der Einfluß von Mulch auf bodenphysikalische Wachstumsfaktoren. Dissertation. Bonn. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Institut für Landtechnik.
- STUART, B.; GEORGE, W.; MCINTYRE, P.** (1996): *Modern Infrared Spectroscopy*. 1. Aufl. Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons, Ltd. (Analytical Chemistry by Open Learning).
- TÄNZER, W.** (2000): *Biologisch abbaubare Polymere*. Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.
- TOCHETTO, R.S.; BENSON, R.S.; DEVER, M.** (2001): Outdoor weathering evaluation of carbon-black-filled, biodegradable copolyester as substitute for traditionally used, carbon-black-filled, nonbiodegradable, HDPE mulch films. *Journal of Polymers and the Environment*, Jg. 9, Nr. 2, S. 57–62.
- TZANKOVA DINTCHEVA, N.; LA MANTIA, F.P.** (2007): Durability of a starch-based biodegradable polymer. *Polymer Degradation and Stability*, S. 1–5.

- VAN DER ZEE, M.** (2005): Biodegradability of Polymers - Mechanisms and Evaluation Methods. Handbook of Biodegradable Polymers, S. 1–31. Rapra Technology Ltd. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, SY4 4NR, UK.
- VOX, G.; SCHETTINI, E.; SCARASCIA-MUGNOZZA, G.** (2005): Radiometric properties of biodegradable films for horticultural protected cultivation. Acta Horticulturae, Nr. 691, S. 575-582.
- WALTER, J.** (2001): Bio-Folien sparen Arbeitszeit. DeGa, Nr. 37, S. 28–29.
- WEBER, C.** (2000): Biologisch abbaubare Mulchfolien: Auf die Eigenschaften kommt es an. Gemüse, Nr. 5, S. 21–23. Stuttgart: Ulmer Verlag.
- WEBER, C.** (2003): Suitability tests for biodegradable mulching films in fennel production. biodegradable materials and natural fibre composites. KTBL-Schrift 414, S. 86–91.
- WIEBE, H.-J.** (1971): Wasserspannung und Sellerieertrag auf zwei verschiedenen Böden. Gartenbauwissenschaft, Jg. 18, Nr. 36, S. 297–302.
- WOLF, O.** (Hg.) (2005): Techno-economic feasibility of largescale production of bio-based polymers in europe. Technical Report EUR 22103 EN. European Comission DG Joint Research Centre. Sevilla, Spanien.
- WOLLENDORFER, M.; BADER, H.** (1998): Influence of natural fibres on the mechanical properties of biodegradable polymers. Industrial Crops an Products. Nr. 8, S. 105-112.
- YOSHII, F.; SUHARTINI, M.; NAGASAWA, N.; MITOMO, H.; KUME, T.** (2003): Modification of biodegradable polymers by radiation crosslinking technique with polyfunctional monomers. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, Nr. 208, S. 370-373.
- ZANON, M.** (2004): Mündliche Mitteilung von Herrn Maurizio Zanon/PATI SPA, Italien.

8 ANHANG

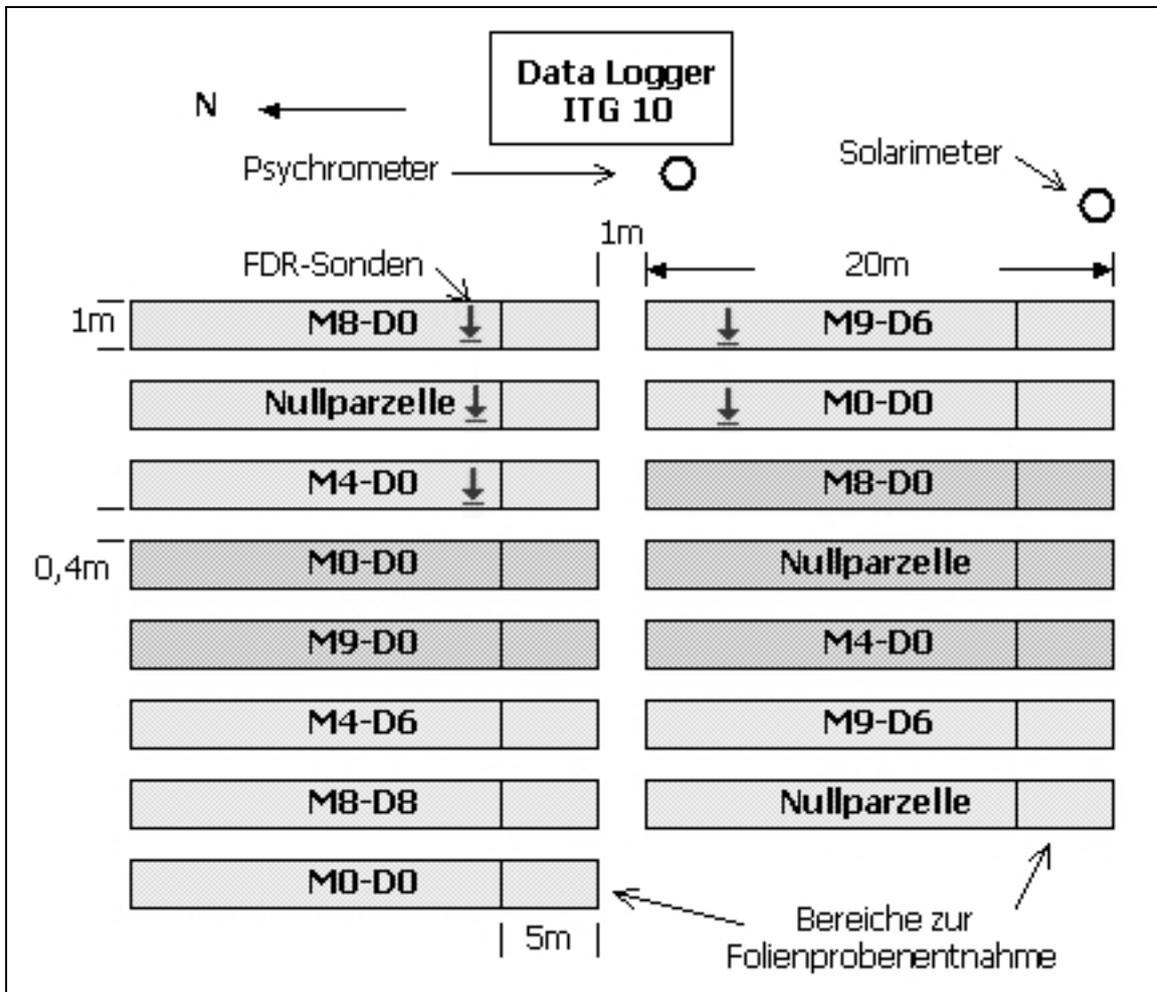


Abb.A-1: Schematischer Aufbau des Freilandversuches 2004 mit der Verwendung der Folienkombinationen

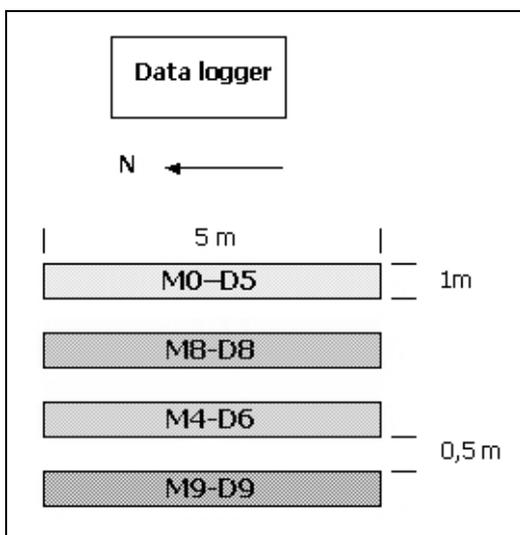


Abb. A-2: Schematischer Aufbau des Klimaversuches 2004

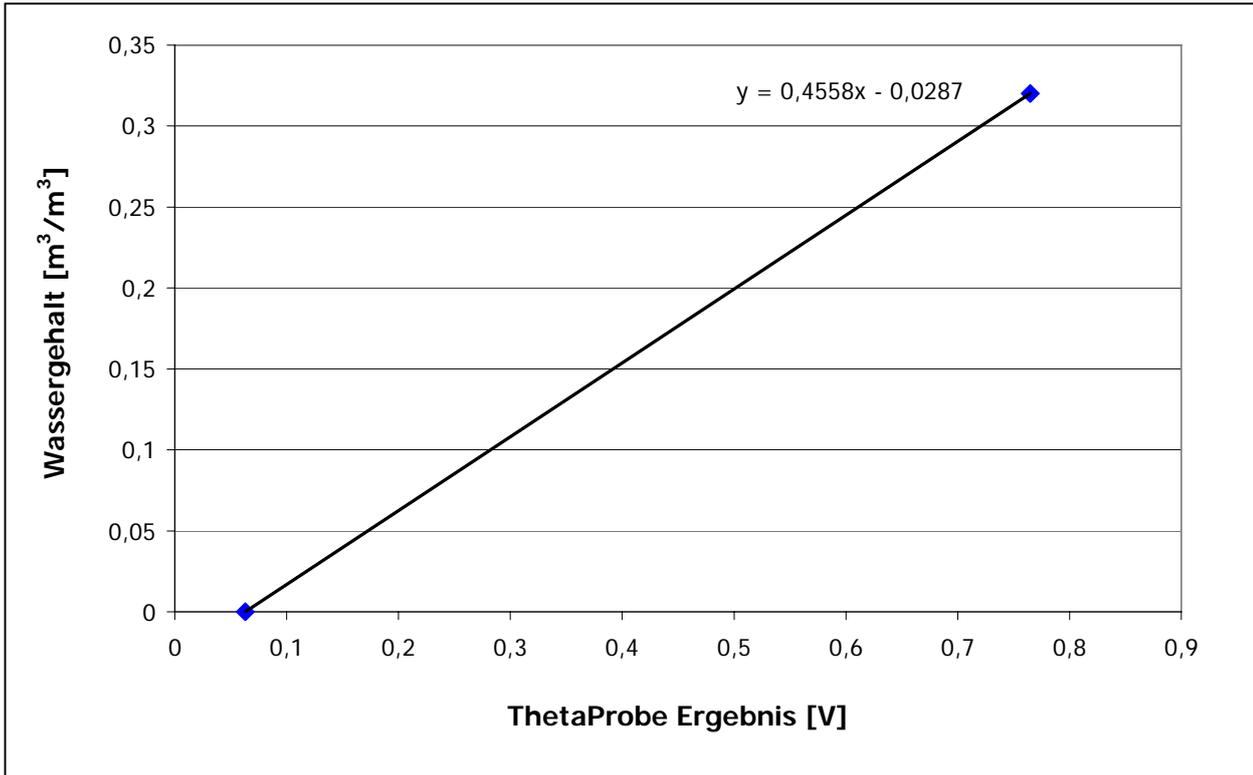


Abb. A-3: Lineare FDR-Eichfunktion für den Boden der Versuchsfläche zur Umrechnung der Meßwerte von [mV] in [Vol.-%] nach ANONYMUS (A) (1999)

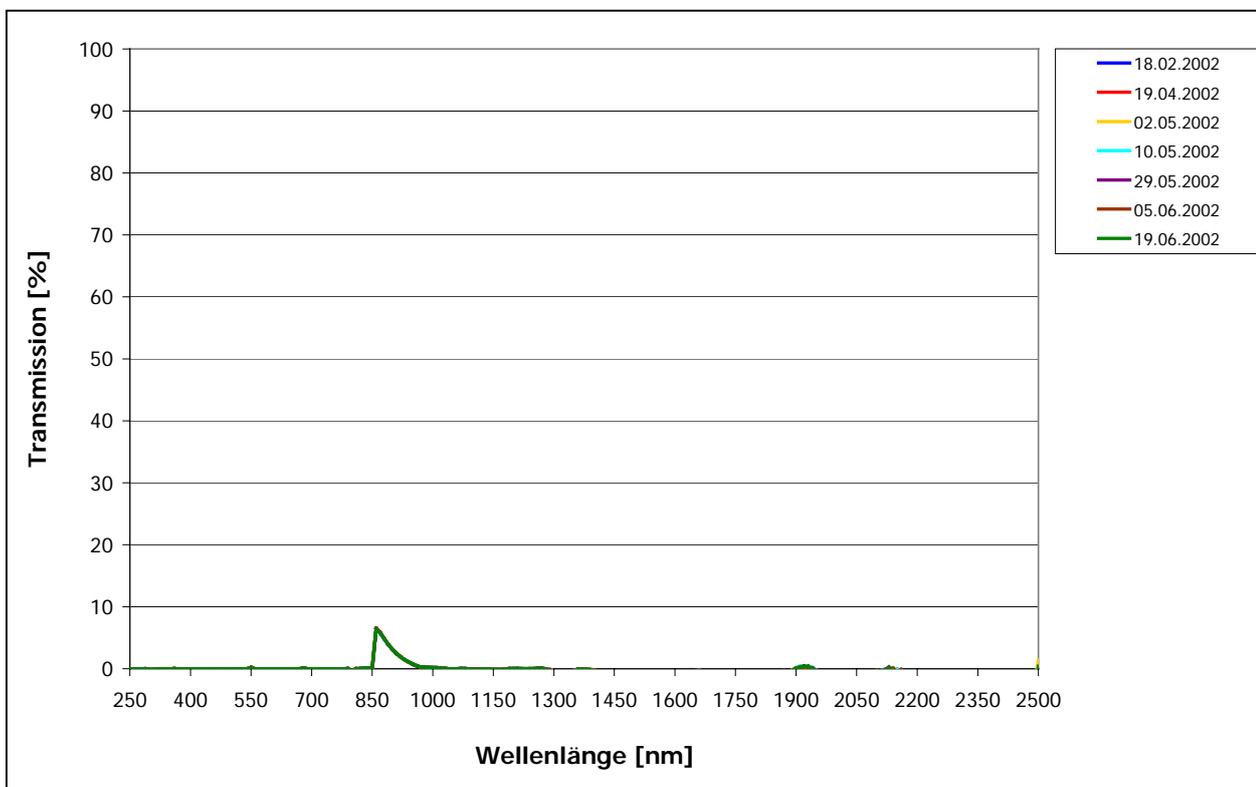


Abb. A-4: Transmission [%] der konventionellen Mulchfolie M0-LLDPE-50b-02 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum Frühjahr 2002

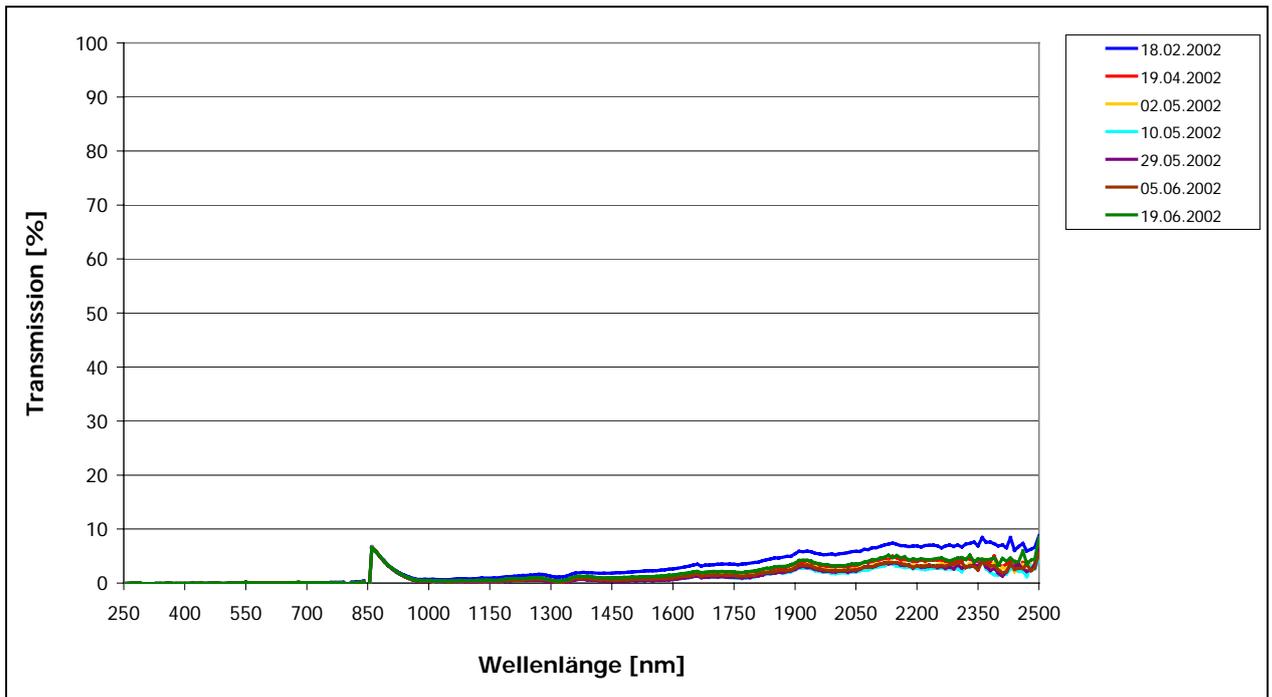


Abb. A-5: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M1-NF803/P-20b-02 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum Frühjahr 2002

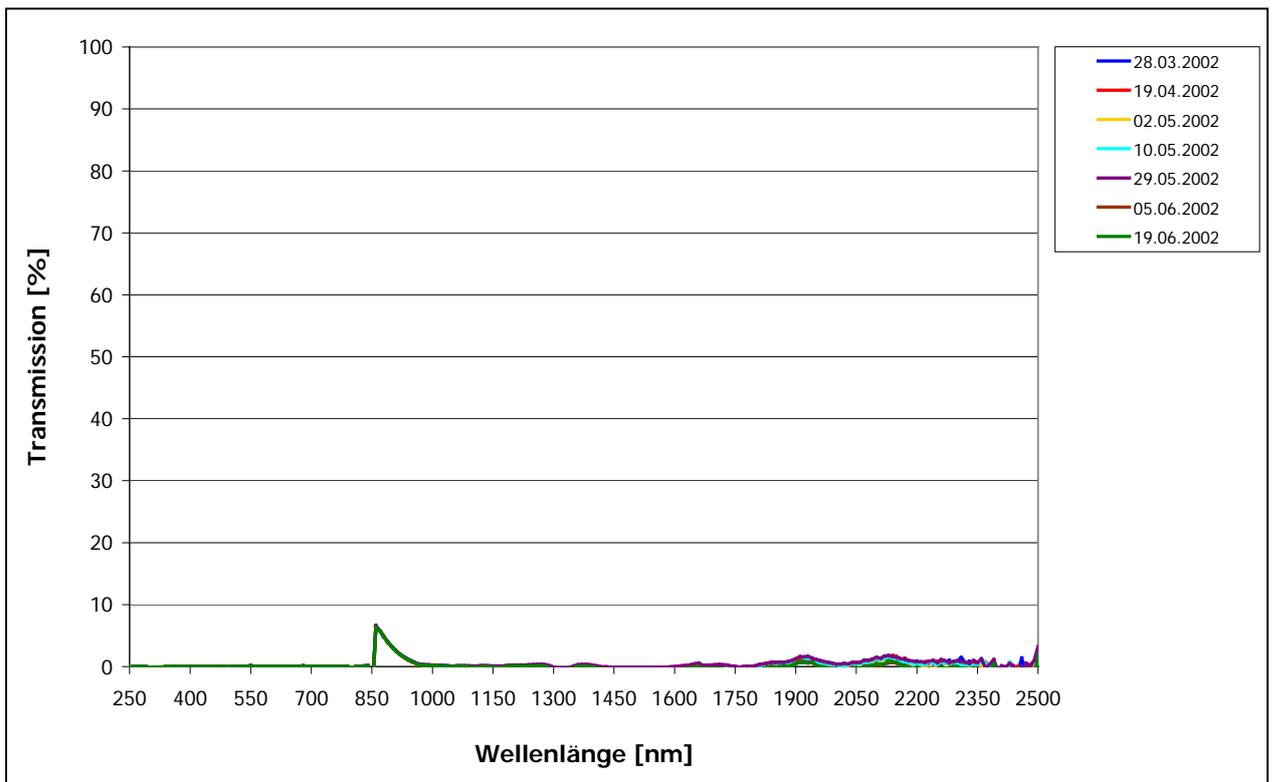


Abb. A-6: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M2-NF01U/P-20b-02 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum Frühjahr 2002

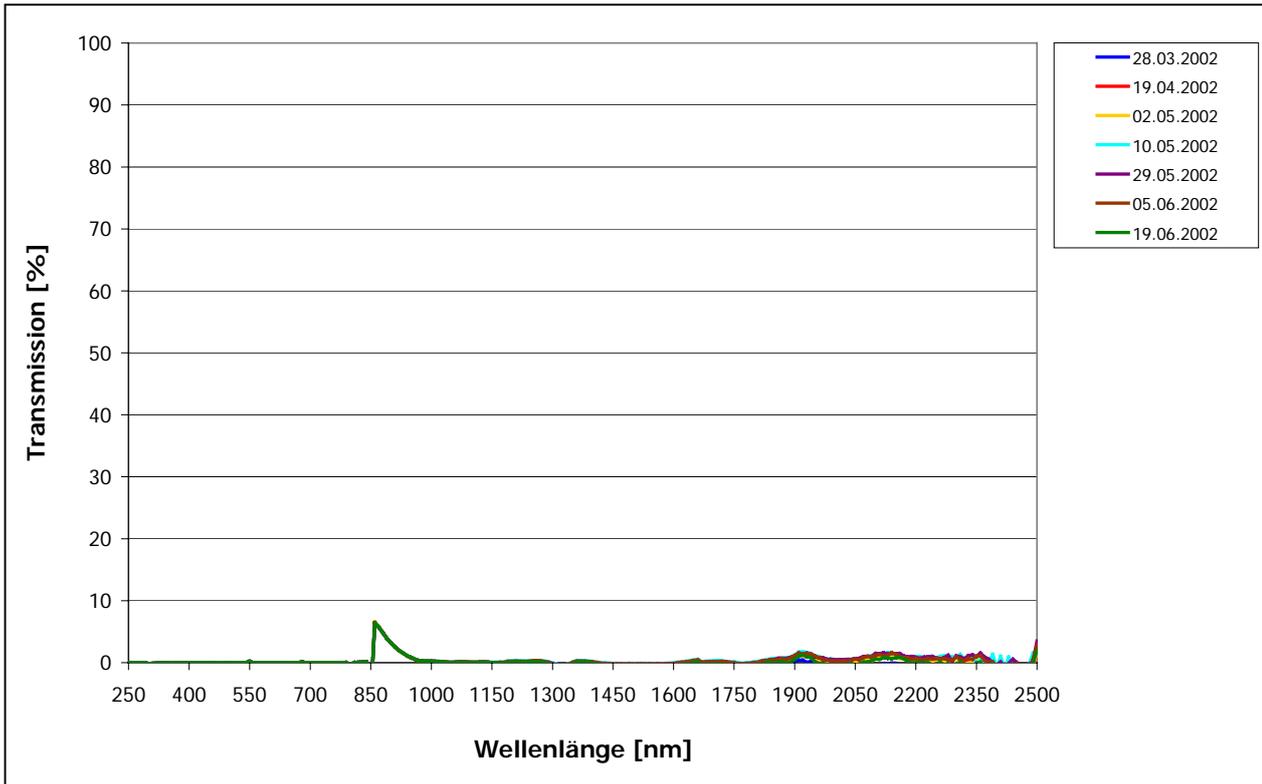


Abb. A-7: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M3-NF01U/P-25b-02 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum Frühjahr 2002

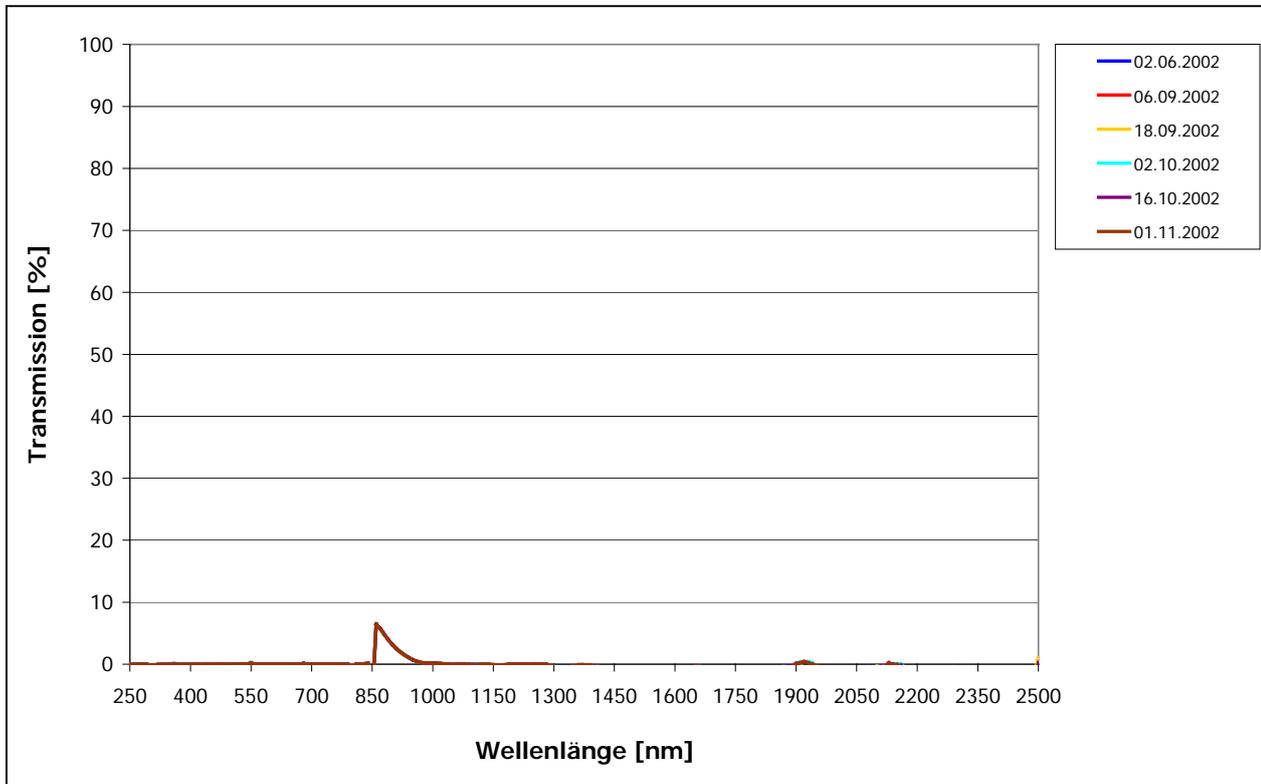


Abb. A-8 Transmission [%] der konventionellen Mulchfolie M0-LLDPE-50b-02 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum Sommer 2002

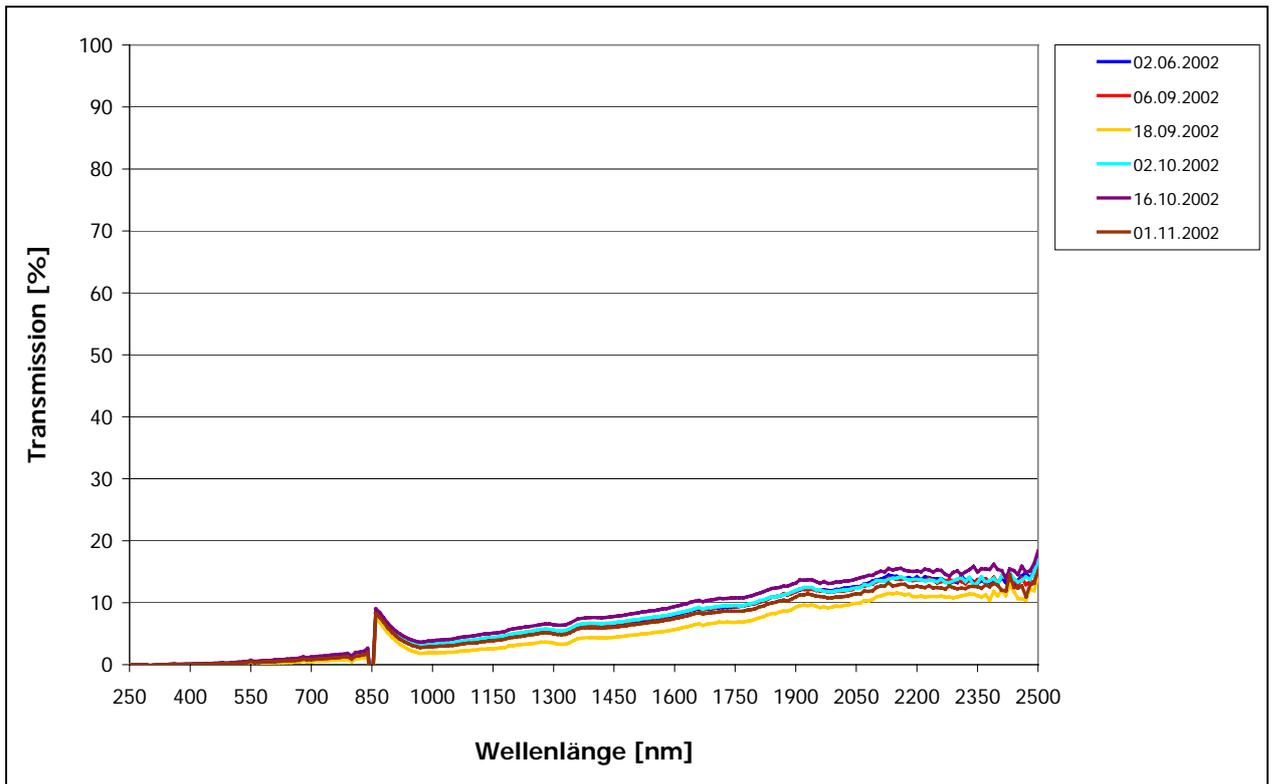


Abb. A-9: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M1-NF803/P-20b-02 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum Sommer 2002

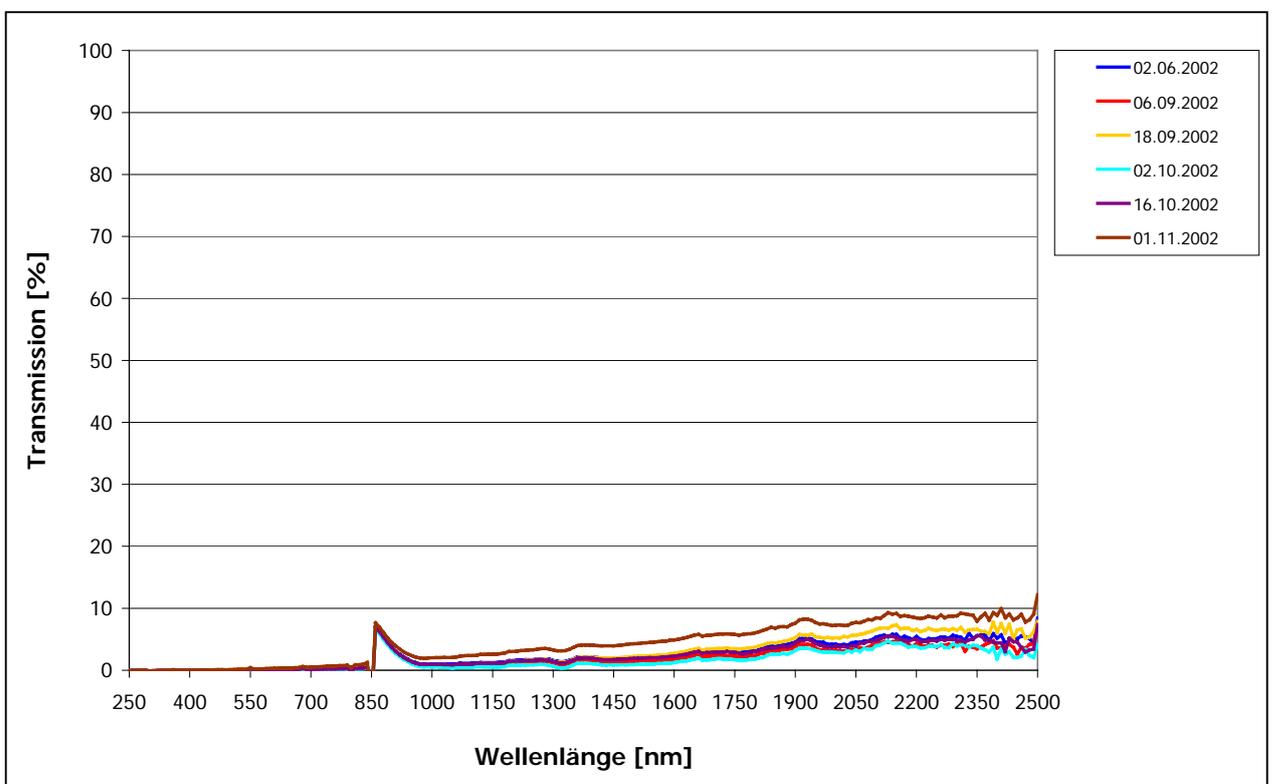


Abb. A-10: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M2-NF01U/P-20b-02 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum Sommer 2002

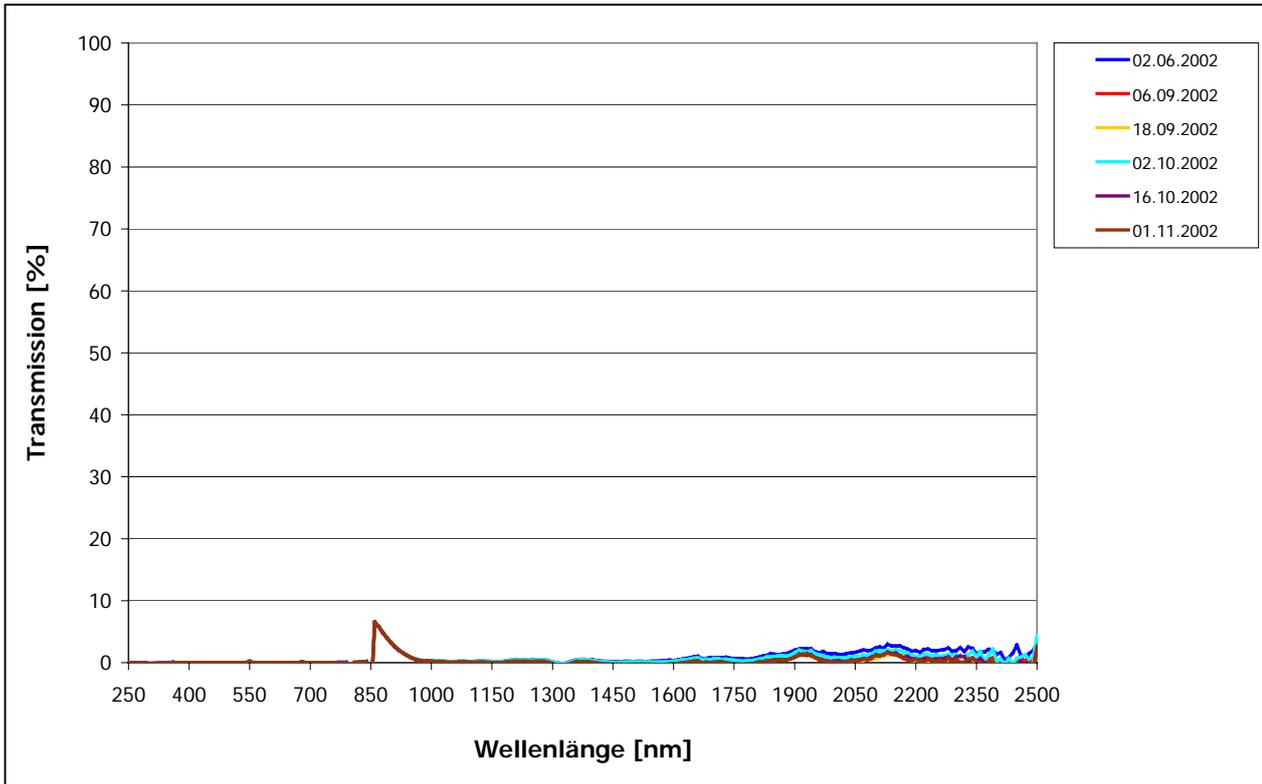


Abb. A-11: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M3-NF01U/P-25b-02 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum Sommer 2002

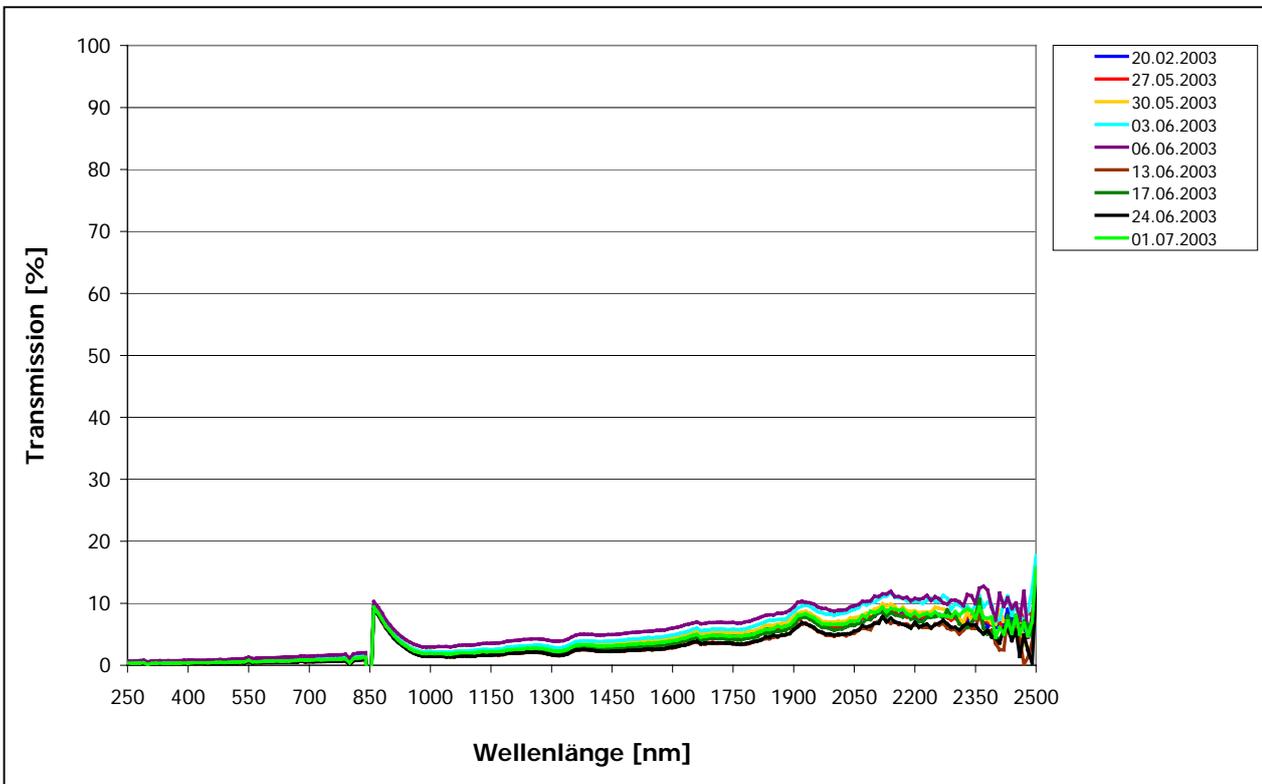


Abb. A-12: Transmission [%] der konventionellen Mulchfolie M0-LLDPE-20b-03 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2003

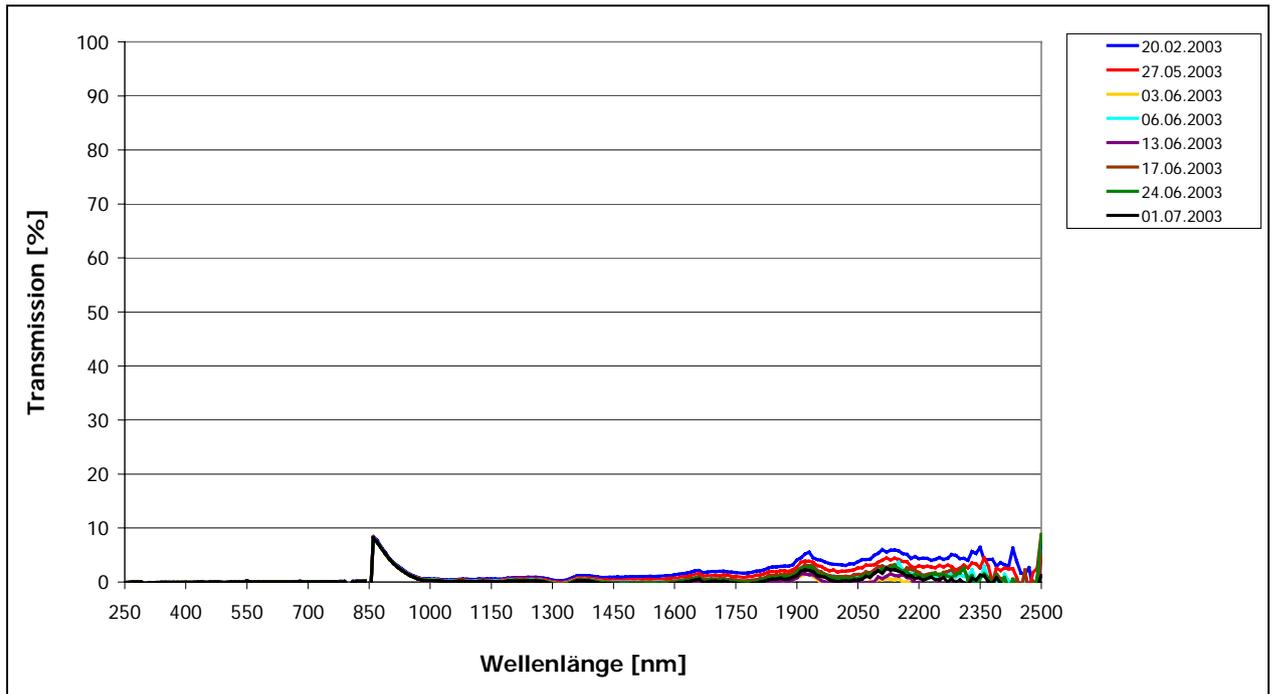


Abb. A-13: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M4-NF803/P-15b-03 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2003

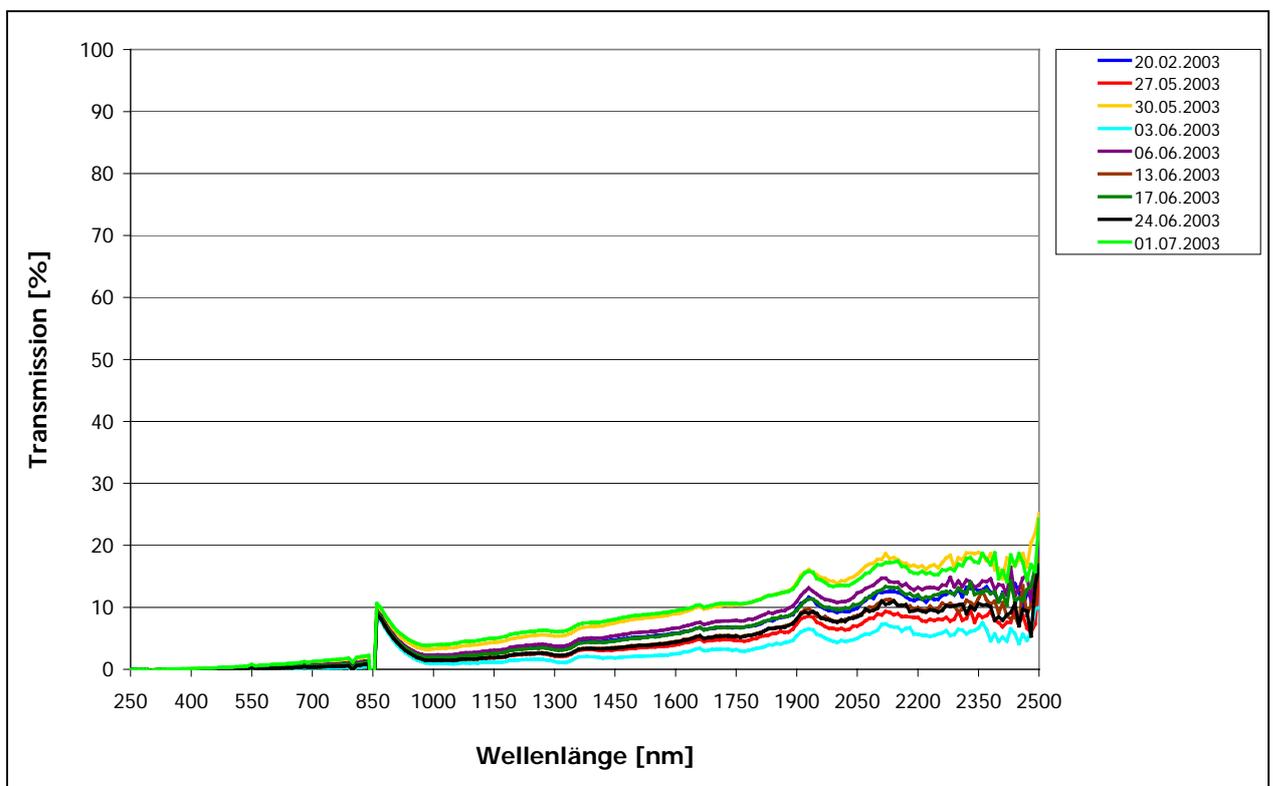


Abb. A-14: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M5-NF01U/P-15b-03 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2003

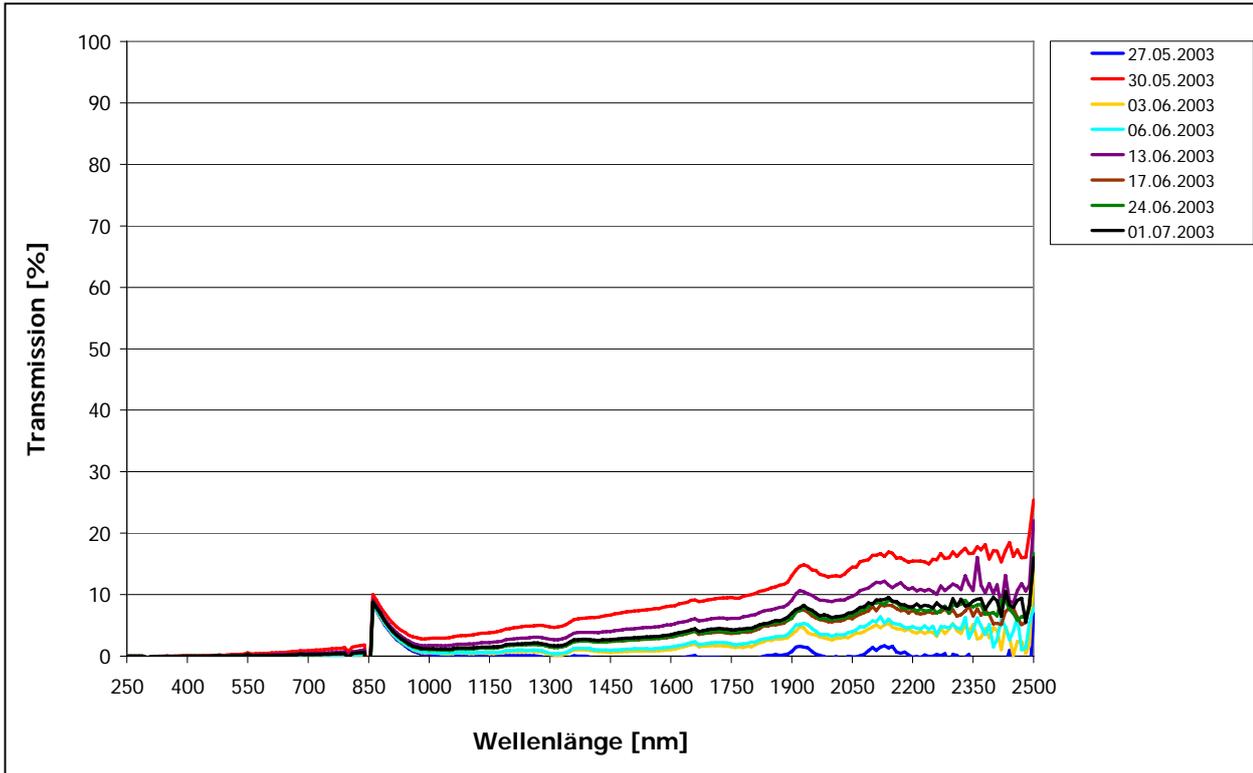


Abb. A-15: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M6-NF01U/P-20b-03 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2003

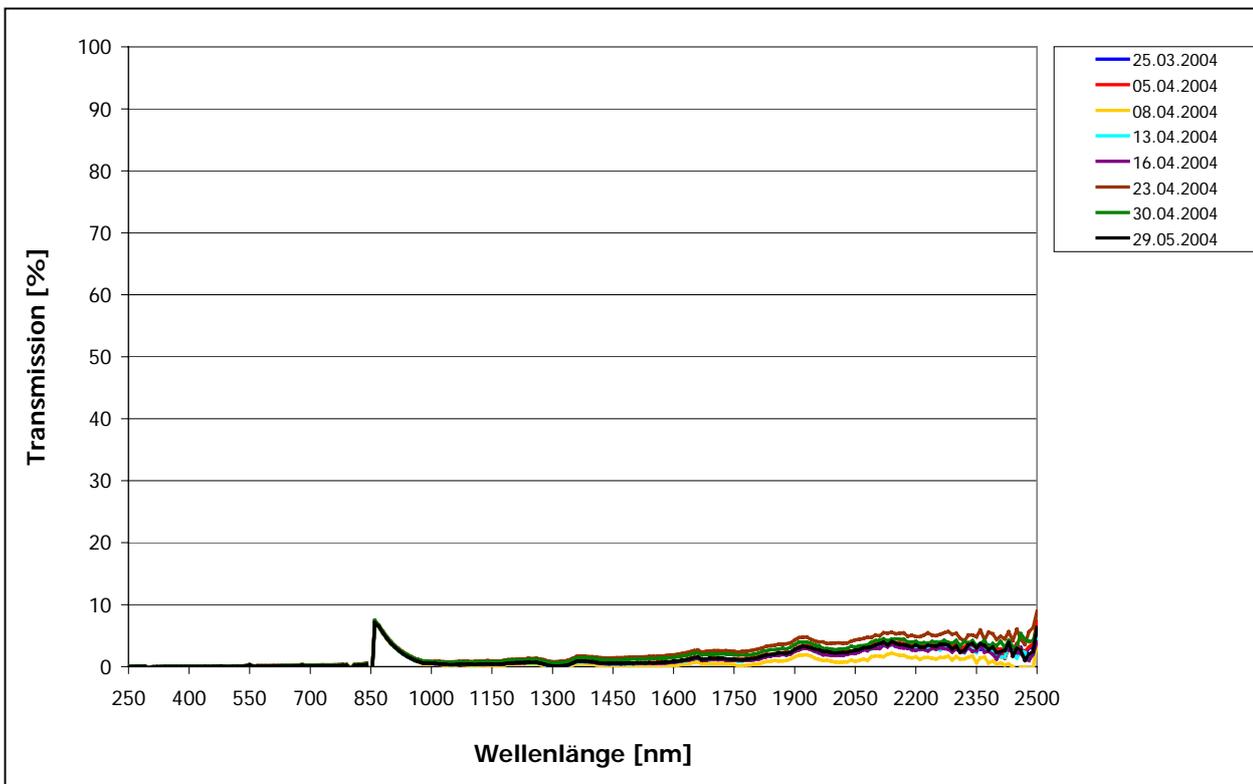


Abb. A-16: Transmission [%] der konventionellen Mulchfolie M0-LLDPE-20b-04 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2004

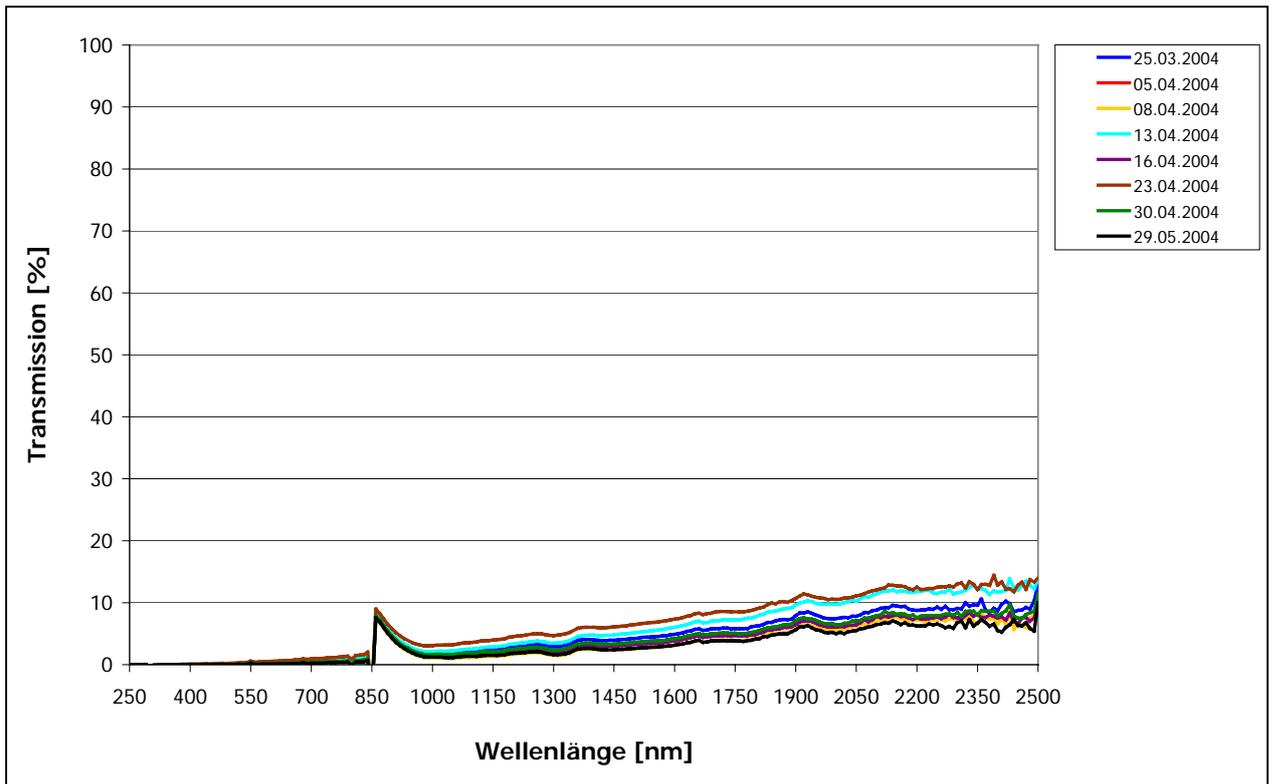


Abb. A-17: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M4-NF803/P-15b-03 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2004

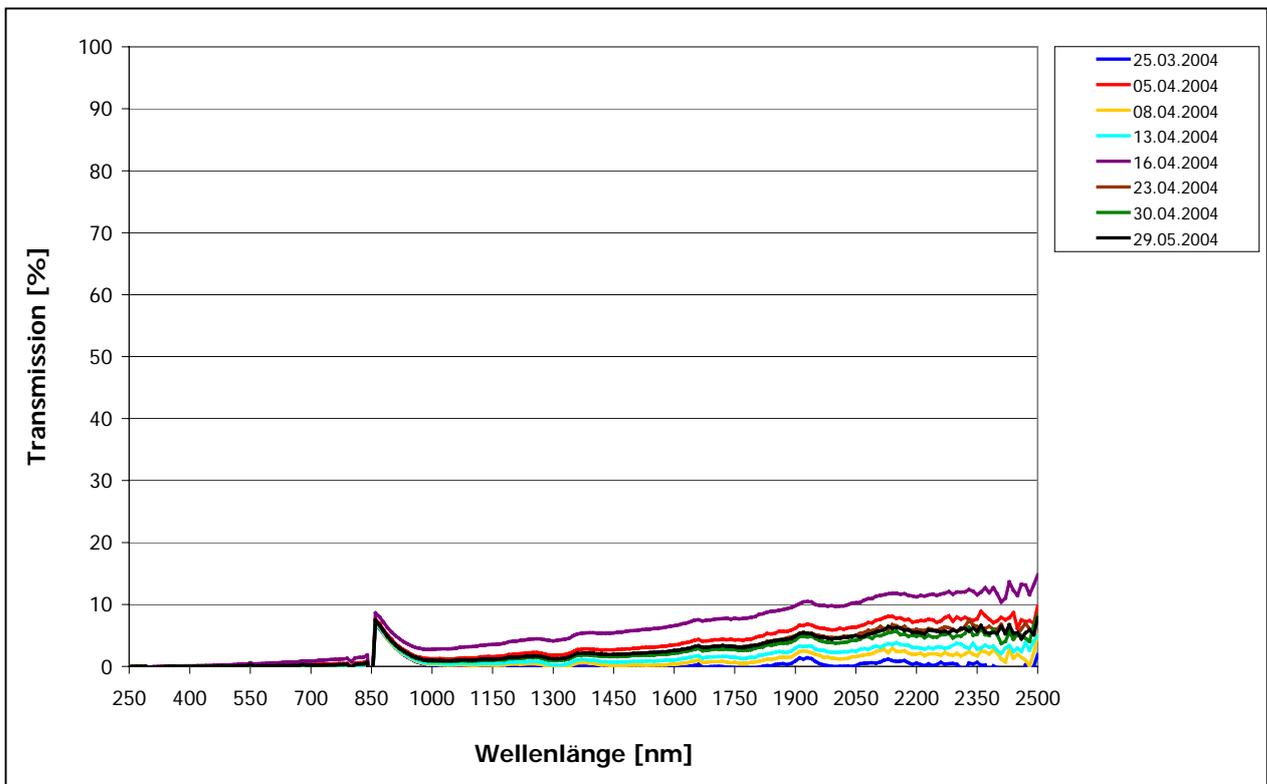


Abb. A-18: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M8-NF01U/P-12b-04 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2004

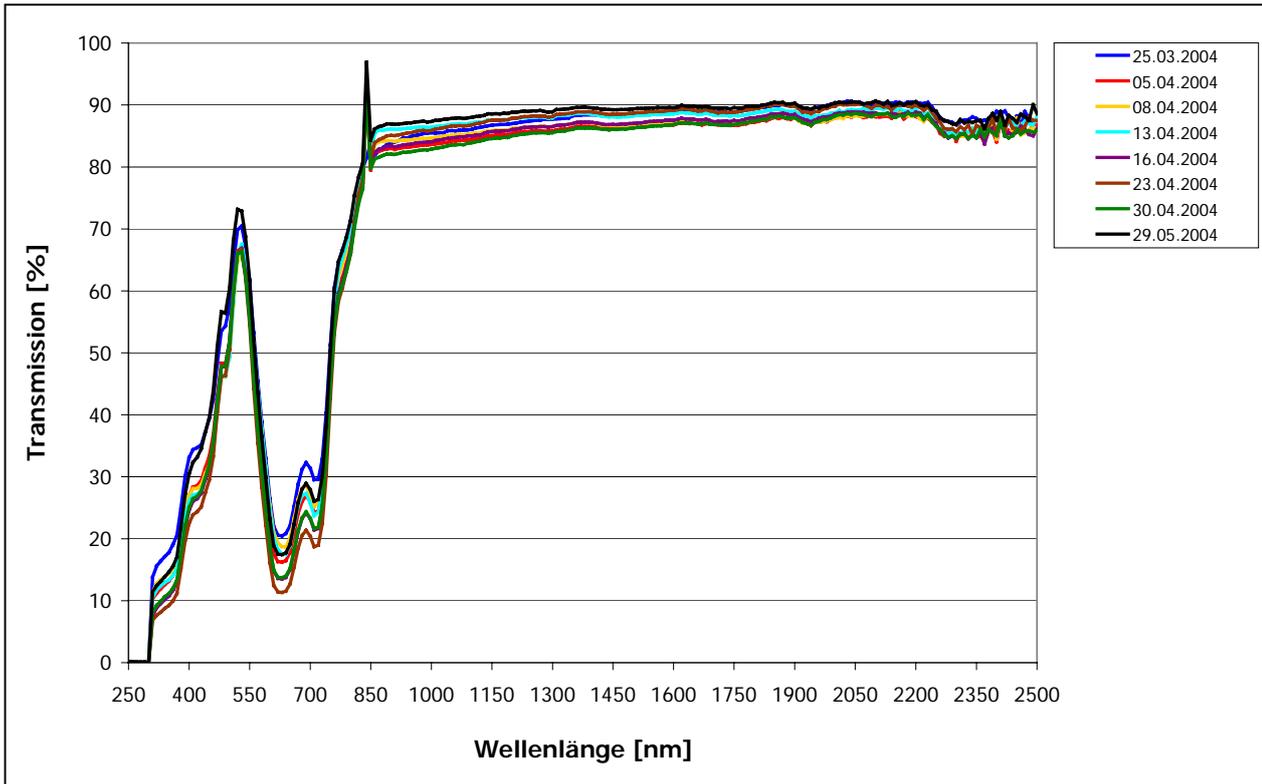


Abb. A-19: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Mulchfolie M9-NF01U/P-20c-04 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2004

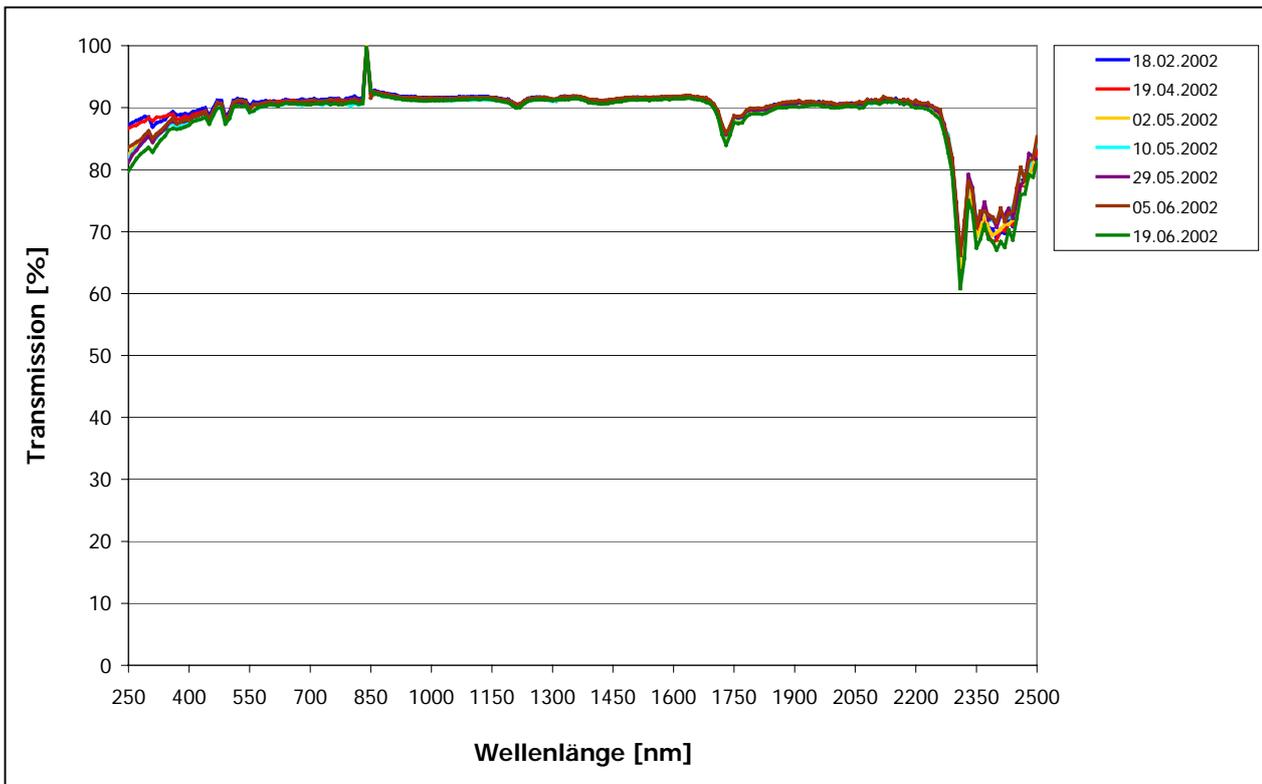


Abb. A-20: Transmission [%] der konventionellen Flachfolie D0-EVA-50s-02 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2002

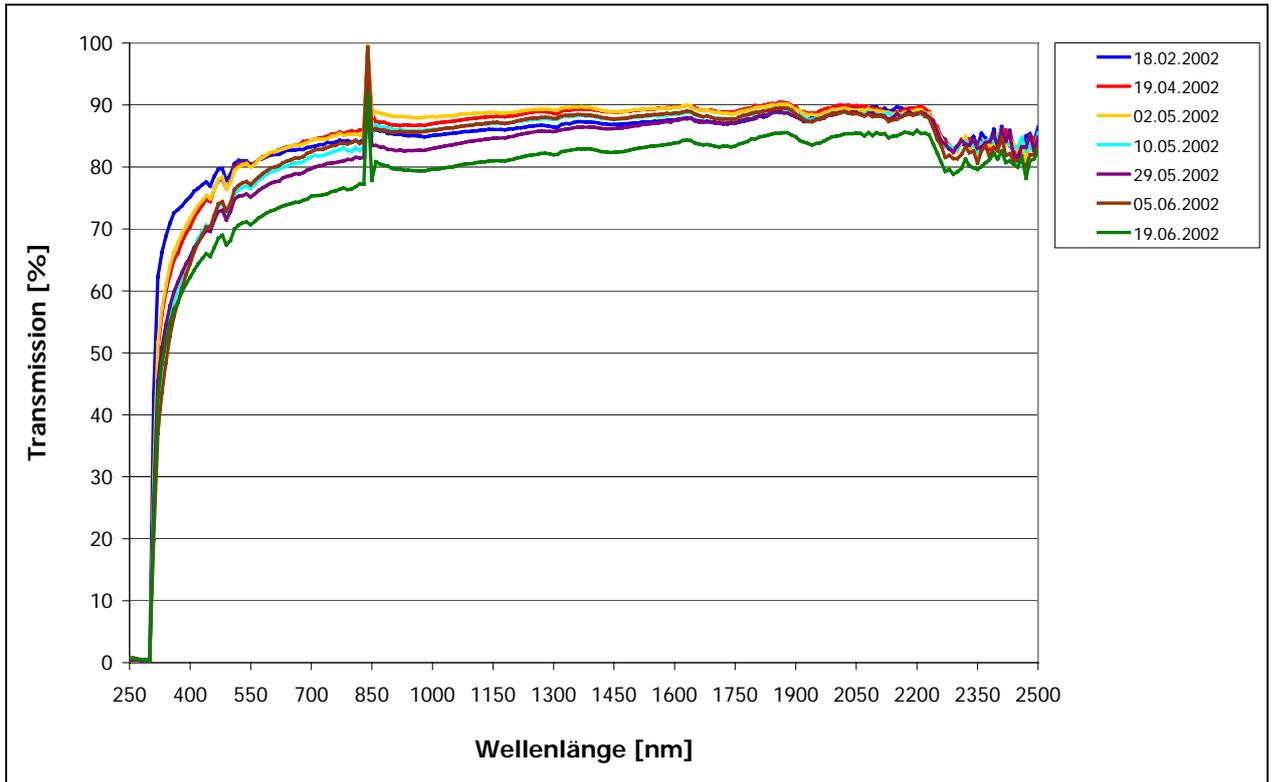


Abb. A-21: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D1-NF803-20-02 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2002

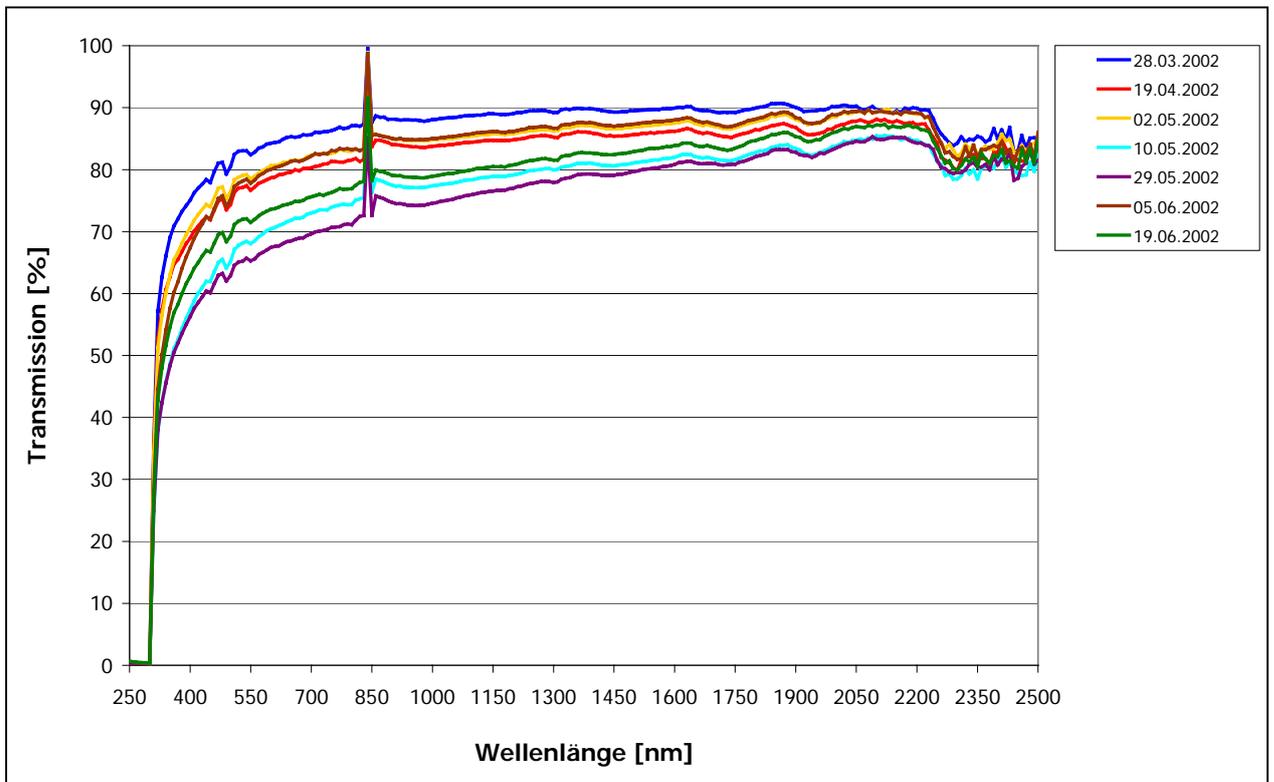


Abb. A-22: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D2-NF803-20s-02 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2002

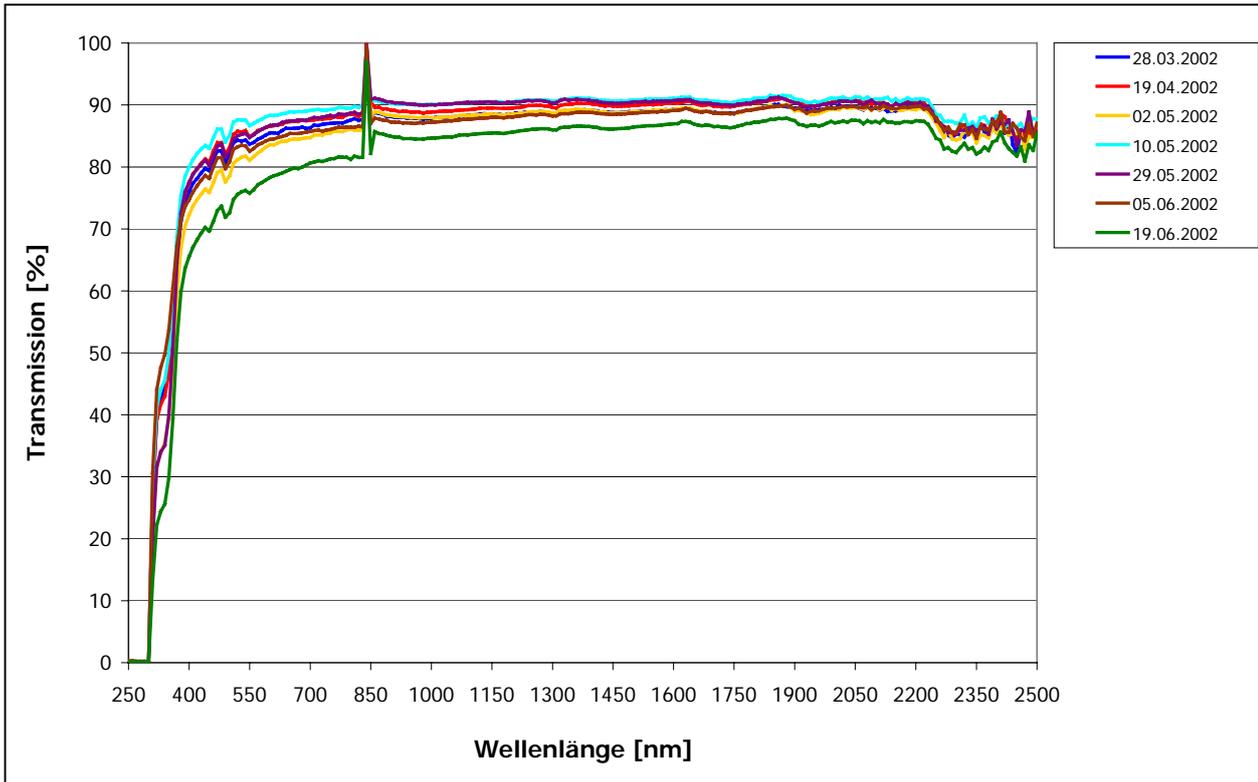


Abb. A-23: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D3-NF803-20s-02 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2002

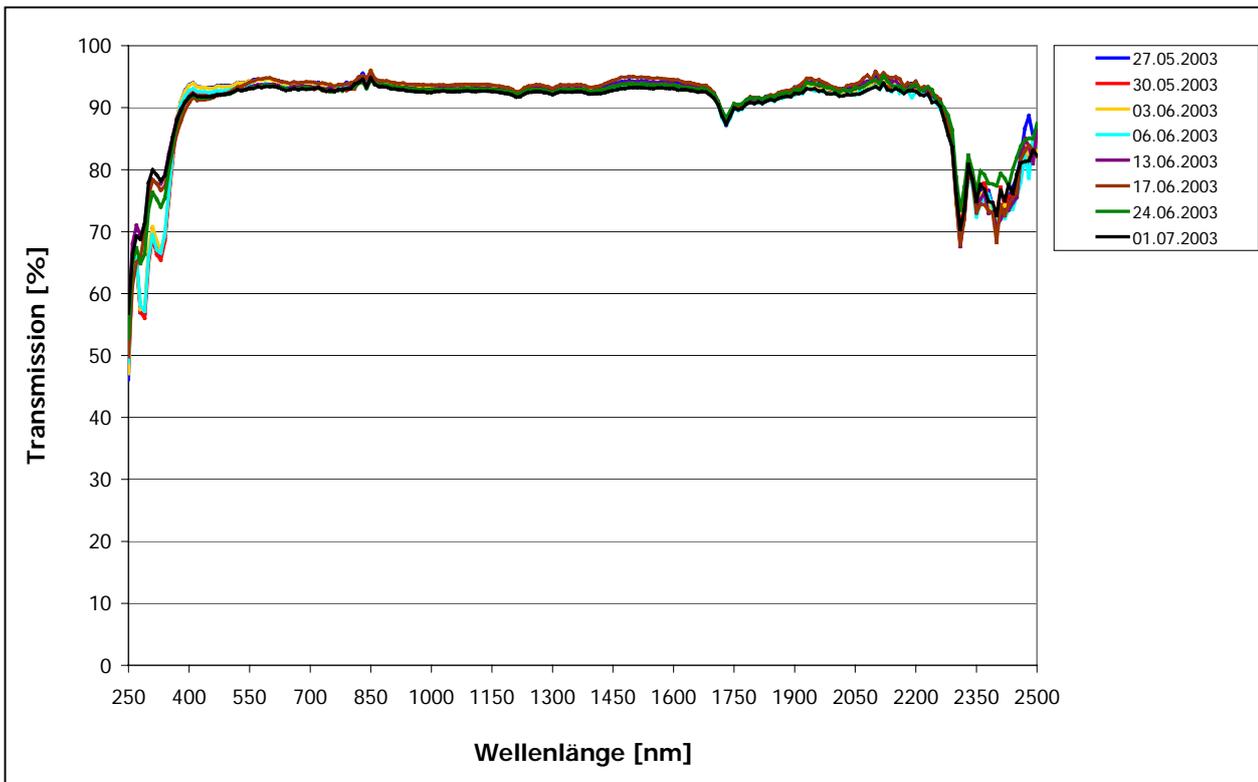


Abb. A-24: Transmission [%] der konventionellen Flachfolie D0-EVA-50s-03 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2003

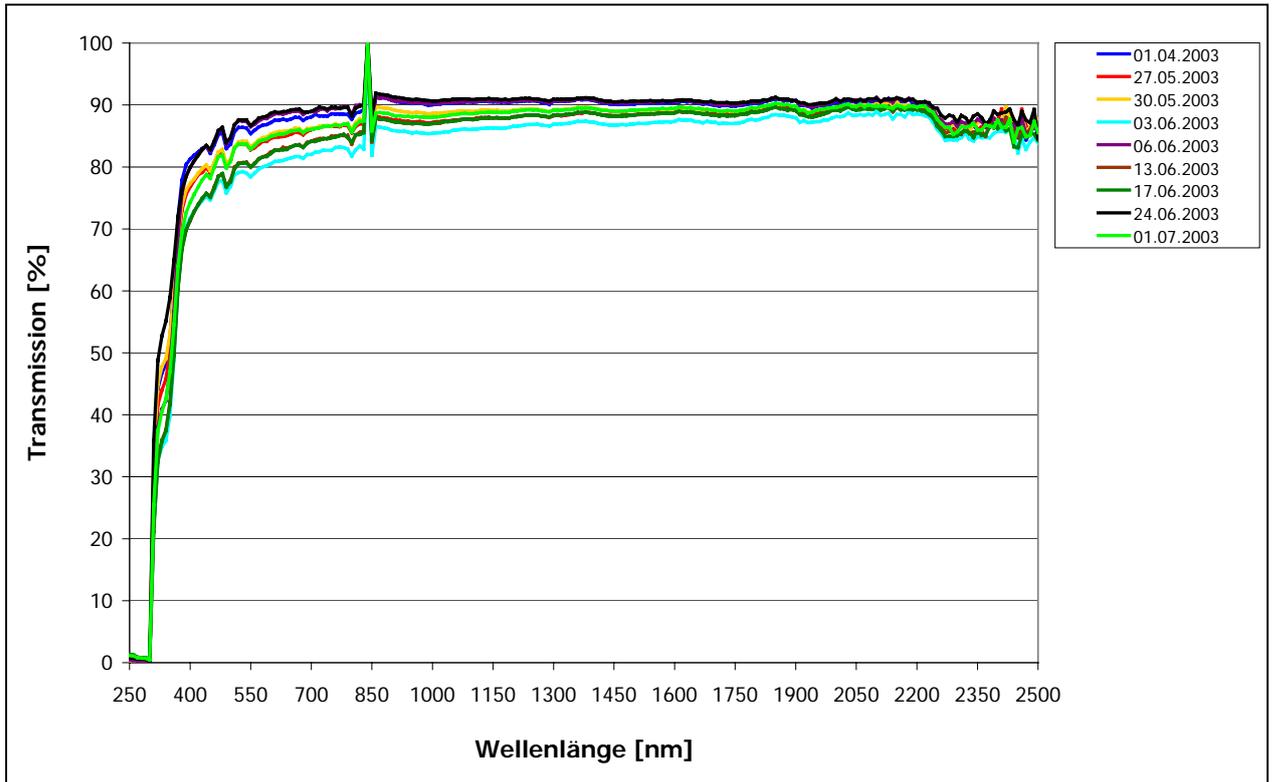


Abb. A-25: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D4-NF803-15-03 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2003

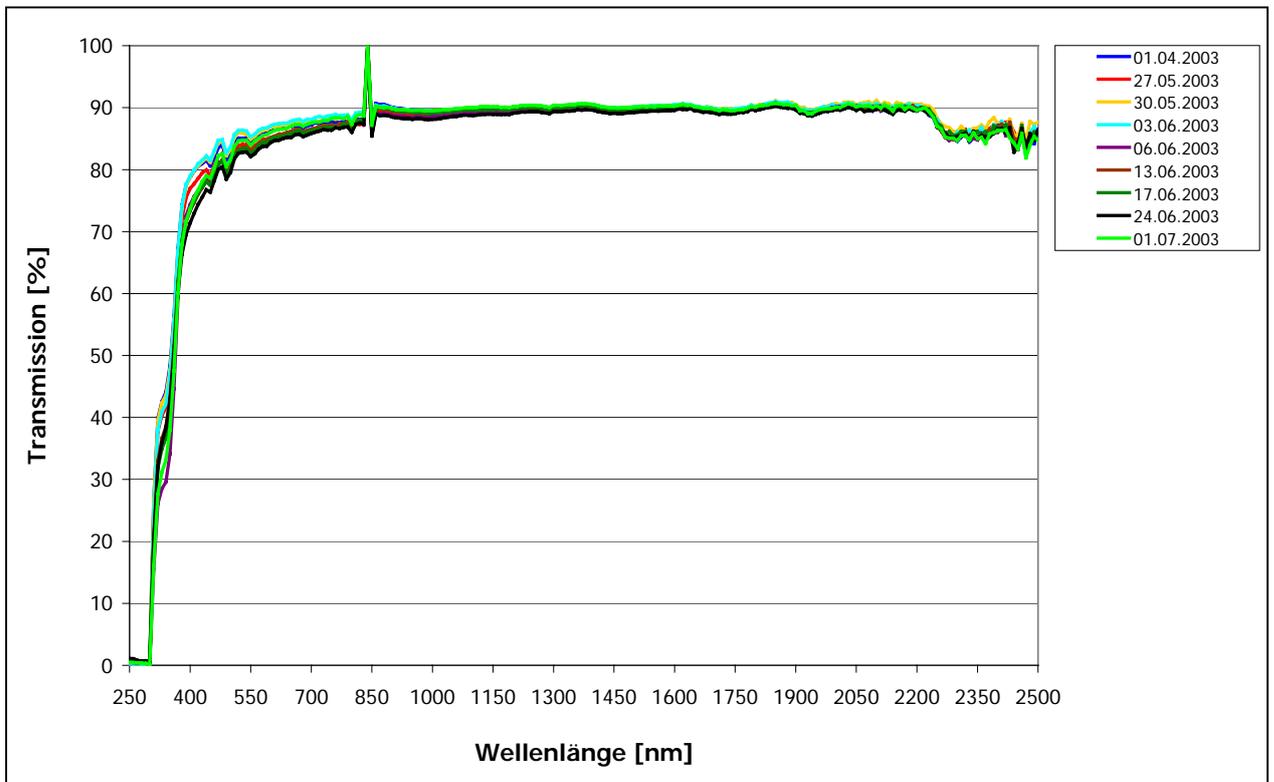


Abb. A-26: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D5-NF01U-20-03 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2003

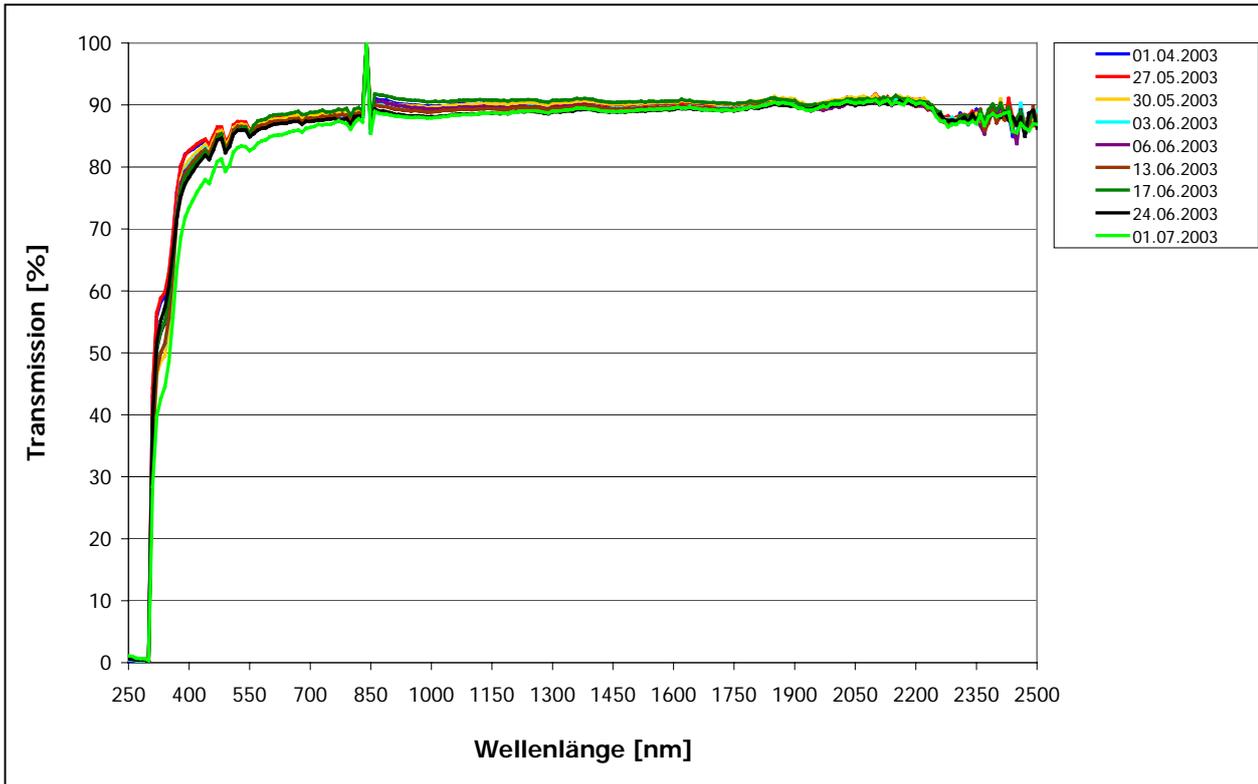


Abb. A-27: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D6-NF803-12-03 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2003

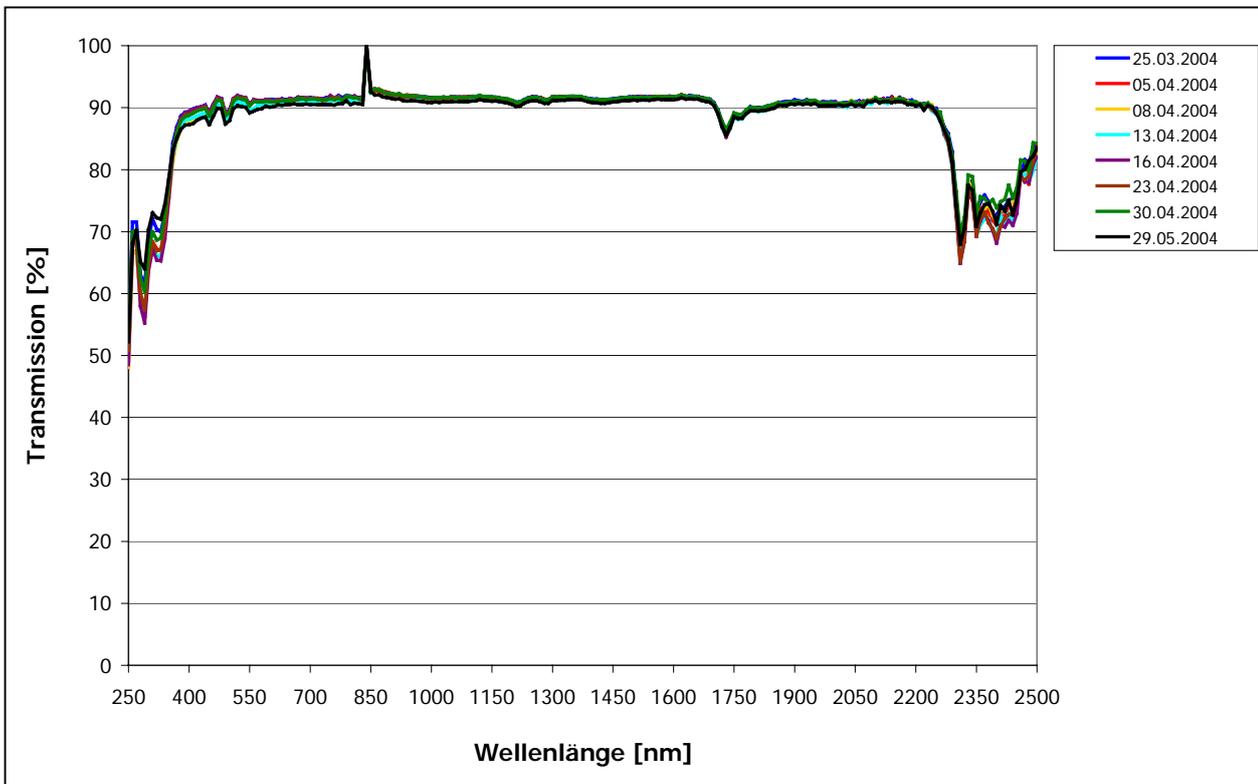


Abb. A-28: Transmission [%] der konventionellen Flachfolie D0-EVA-50s-04 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2004

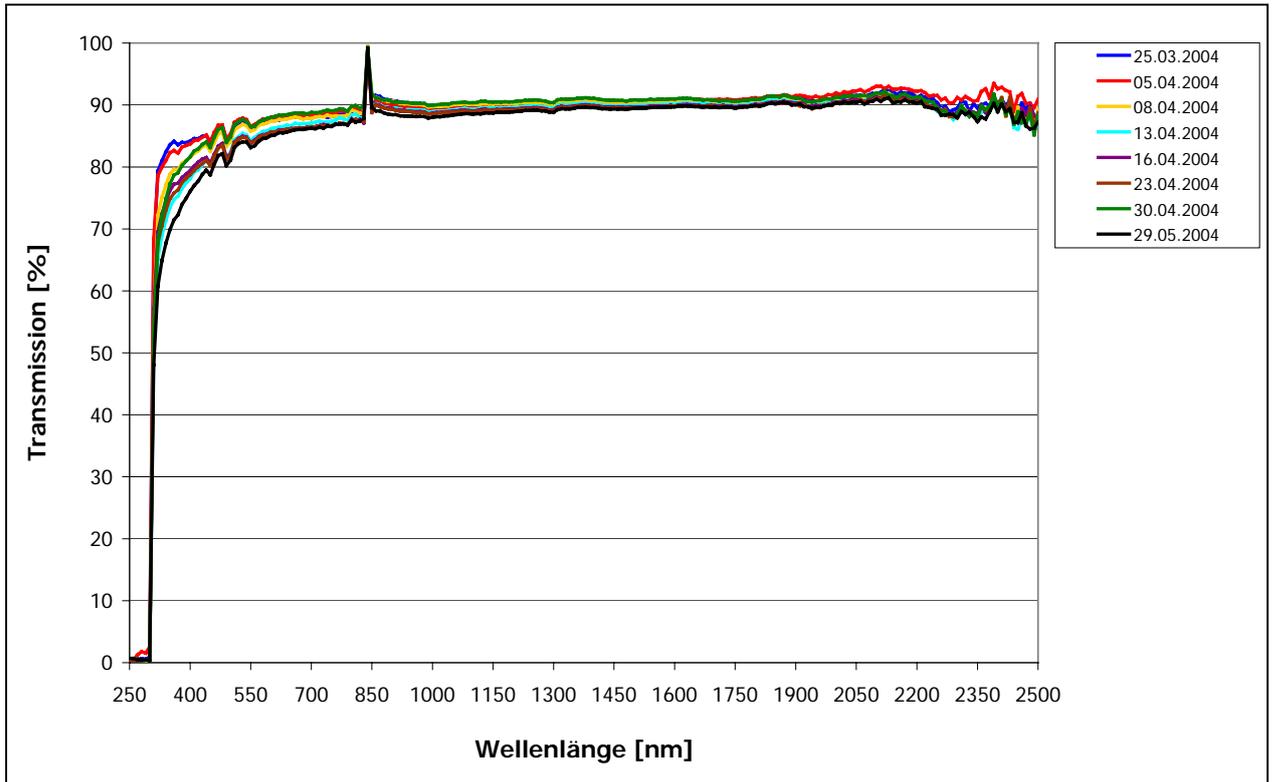


Abb. A-29: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D7-NF803-12-04 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2004

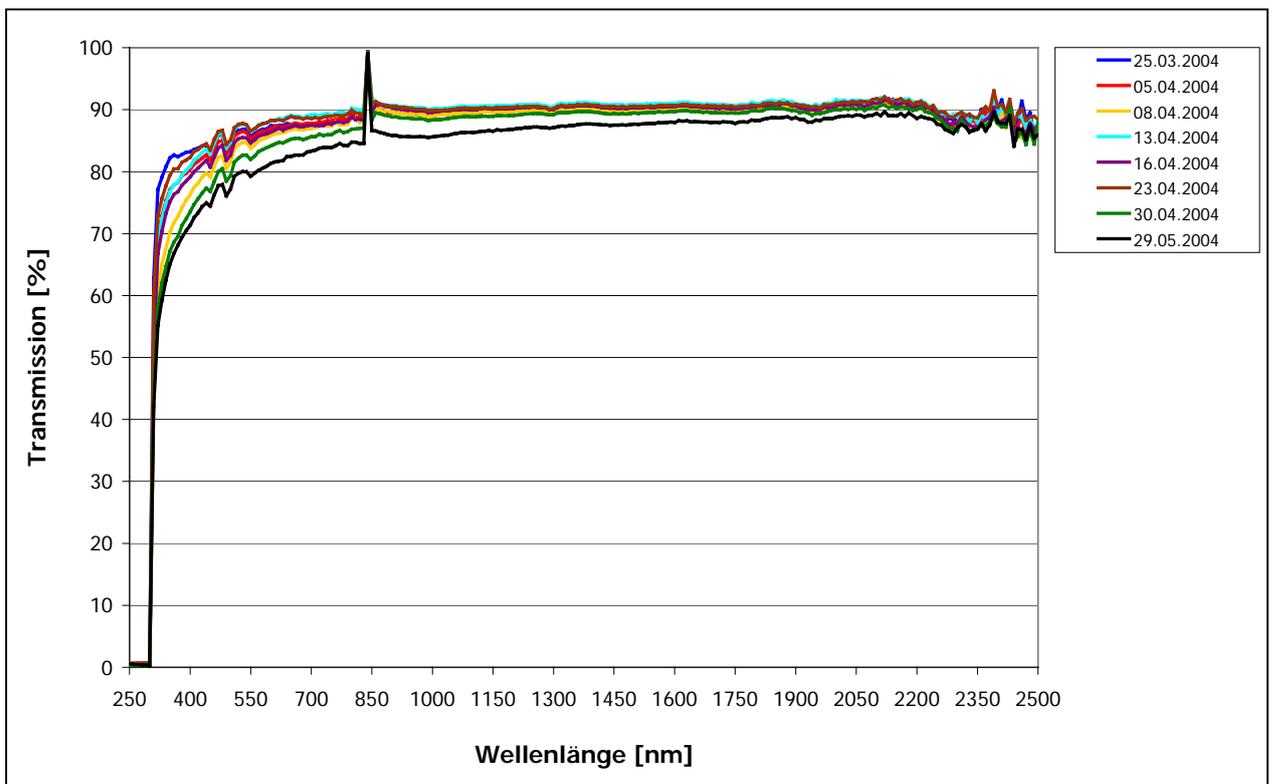


Abb. A-30: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D8-NF01U-12-04 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2004

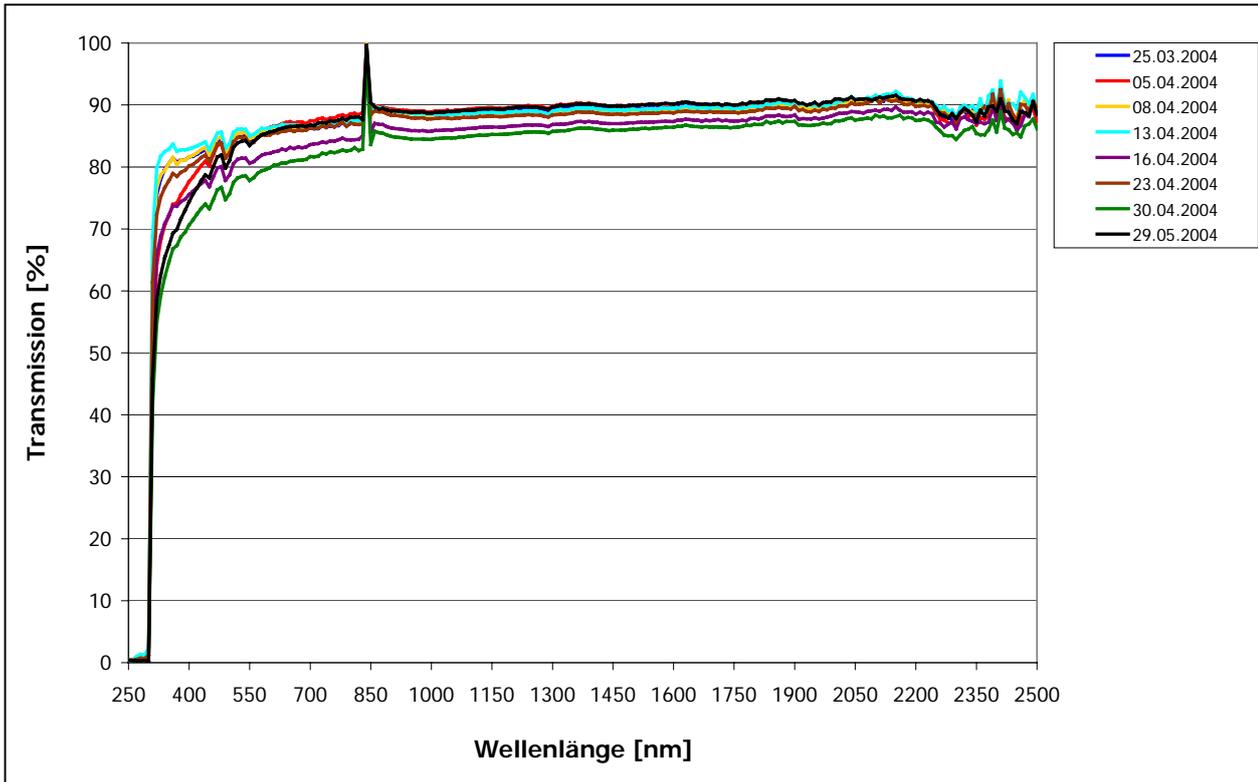


Abb. A-31: Transmission [%] der biologisch abbaubaren Flachfolie D9-NF803-10-04 im Wellenlängenbereich 250-2500 nm im Versuchszeitraum 2004

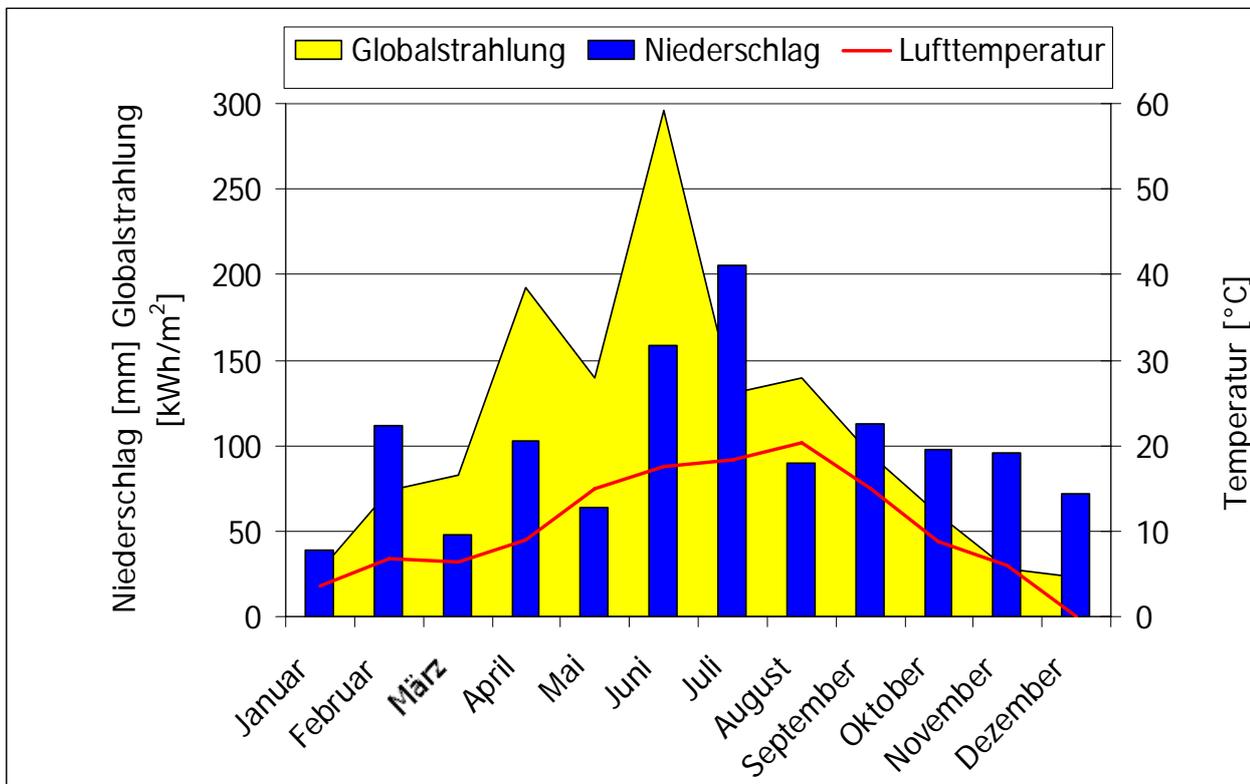


Abb. A-32: Durchschnittliche Lufttemperatur, Niederschlagsmenge und Einstrahlung im Jahr 2002 in Hannover

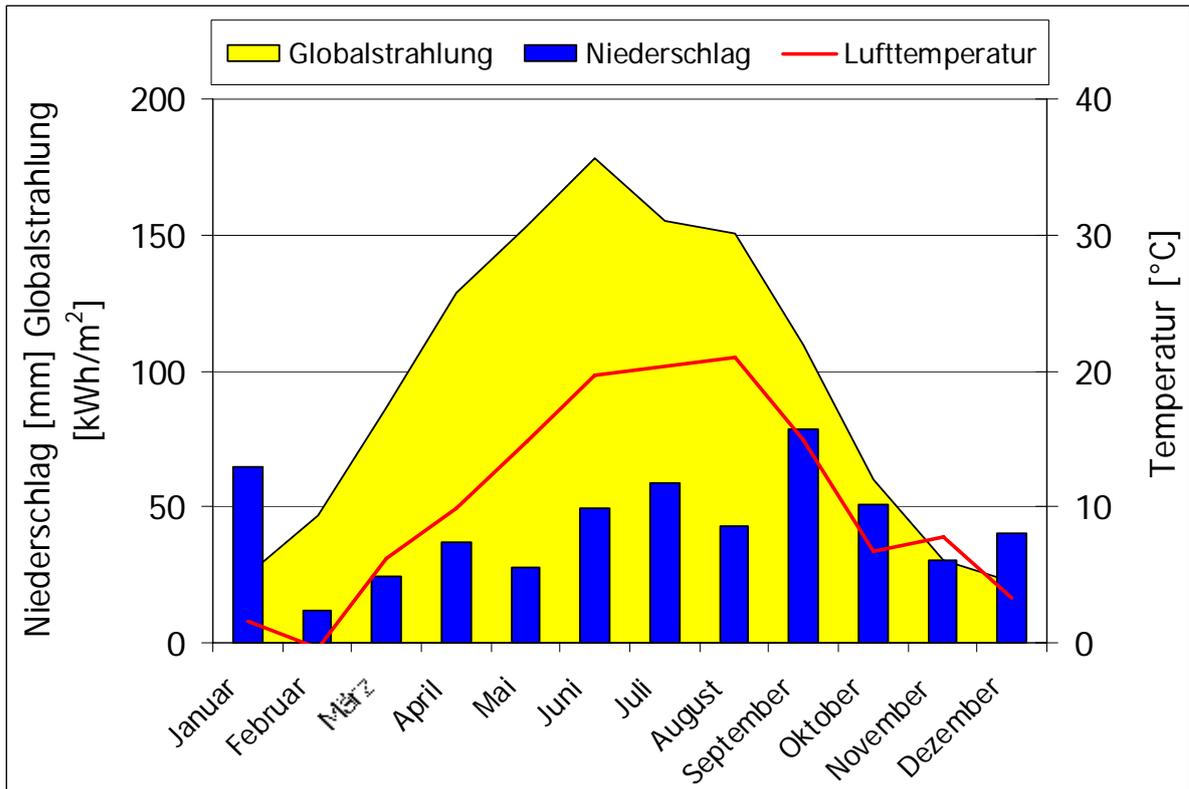


Abb. A-33: Durchschnittliche Lufttemperatur, Niederschlagsmenge und Einstrahlung im Jahr 2003 in Hannover

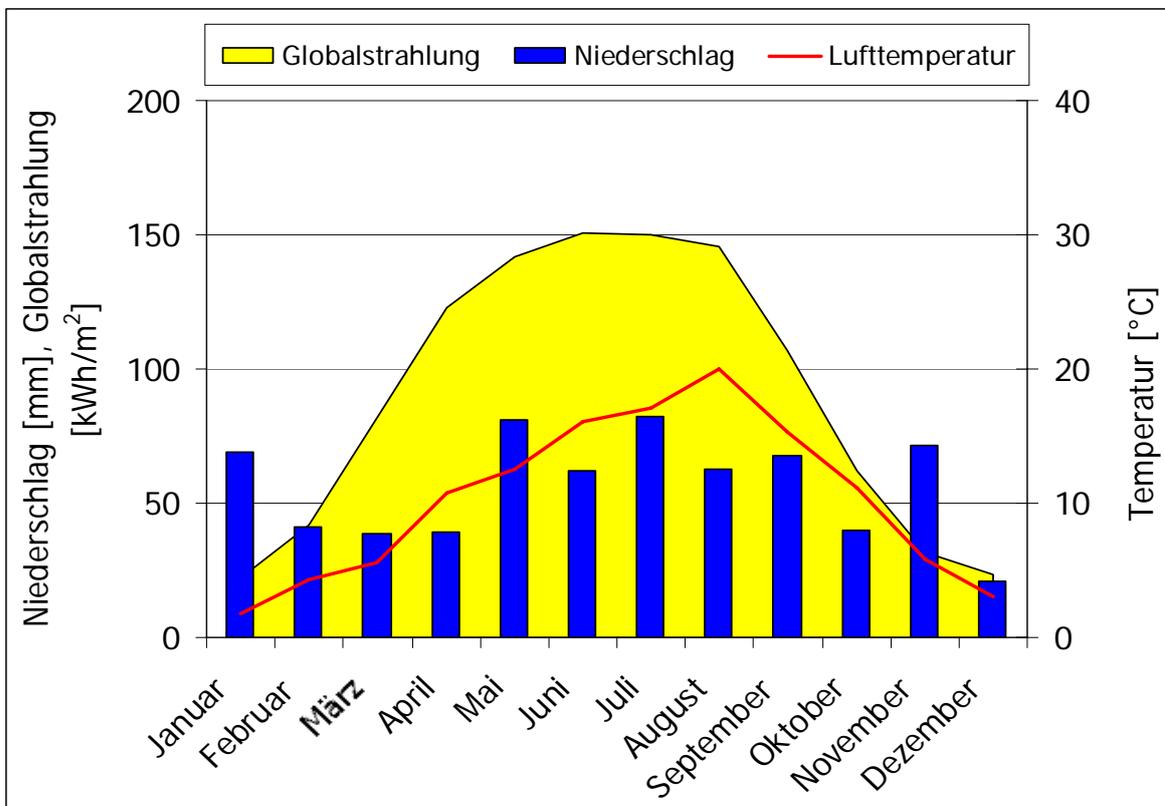


Abb. A-34: Durchschnittliche Lufttemperatur, Niederschlagsmenge und Einstrahlung im Jahr 2004 in Hannover

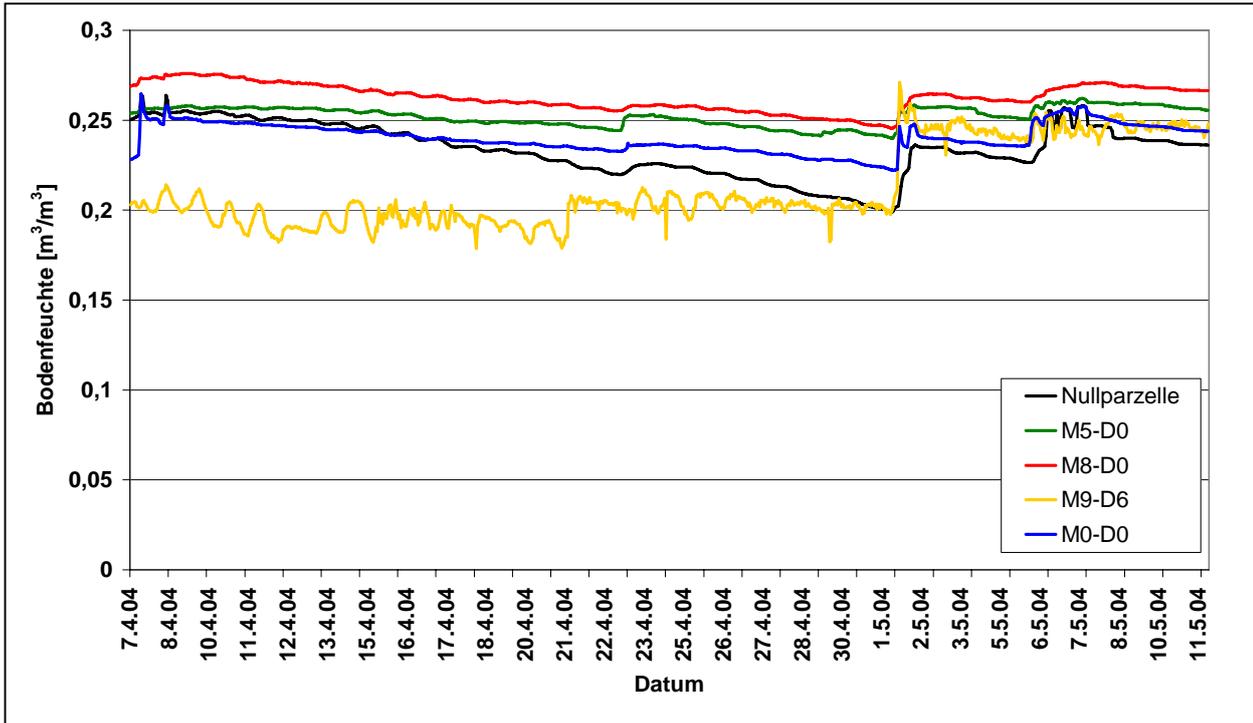


Abb. A-35: Stundenmittelwerte der Bodenfeuchte im Freilandversuch 2004

Tab. A-1: Technische Angaben zu den Herstellungsverfahren der Produktion der biologisch abbaubaren Versuchsfolien (verkürzt nach BRIASSOULIS (2006a))

Prozeßparameter	Schema A/ PATI	Schema B/ Plastika Kritis
Extruderdurchmesser [mm]	80	100/150/100
Kopfdurchmesser [mm]	300	800
Schraubentemperaturprofil [°C]	130, 140, 145, 145	110 - 120
Blaskopftemperaturprofil [°C]	145, 145, 145, 145	110 - 120

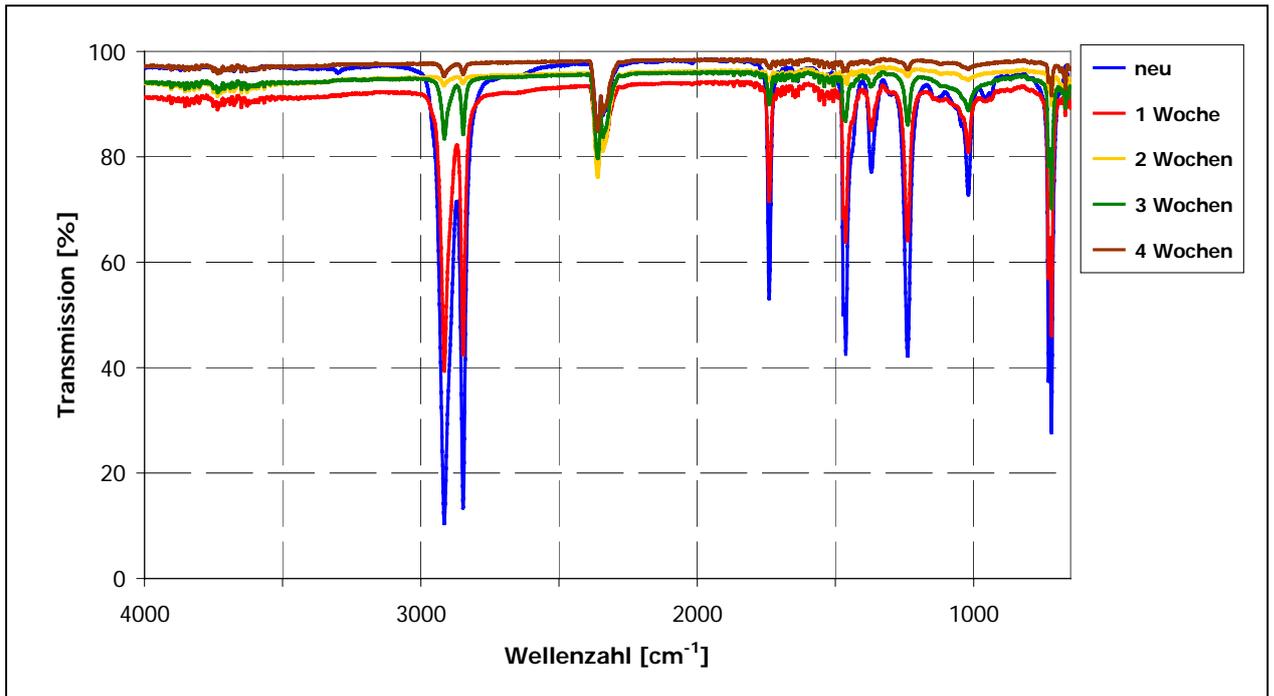


Abb. A-36: ATR-Spektren vom Kompostierungsversuch der konventionellen Flachfolie D0-EVA-50s-03

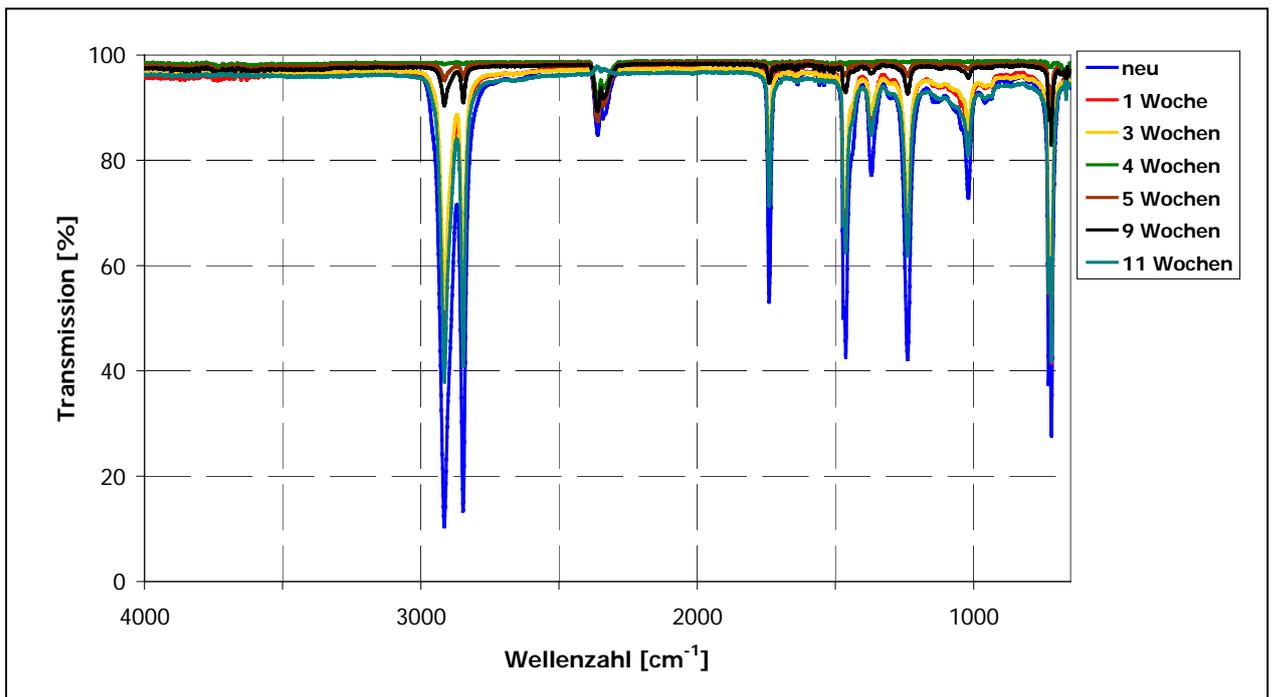


Abb. A-37: ATR-Spektren vom Bewitterungsversuch der konventionellen Flachfolie D0-EVA-50s-03

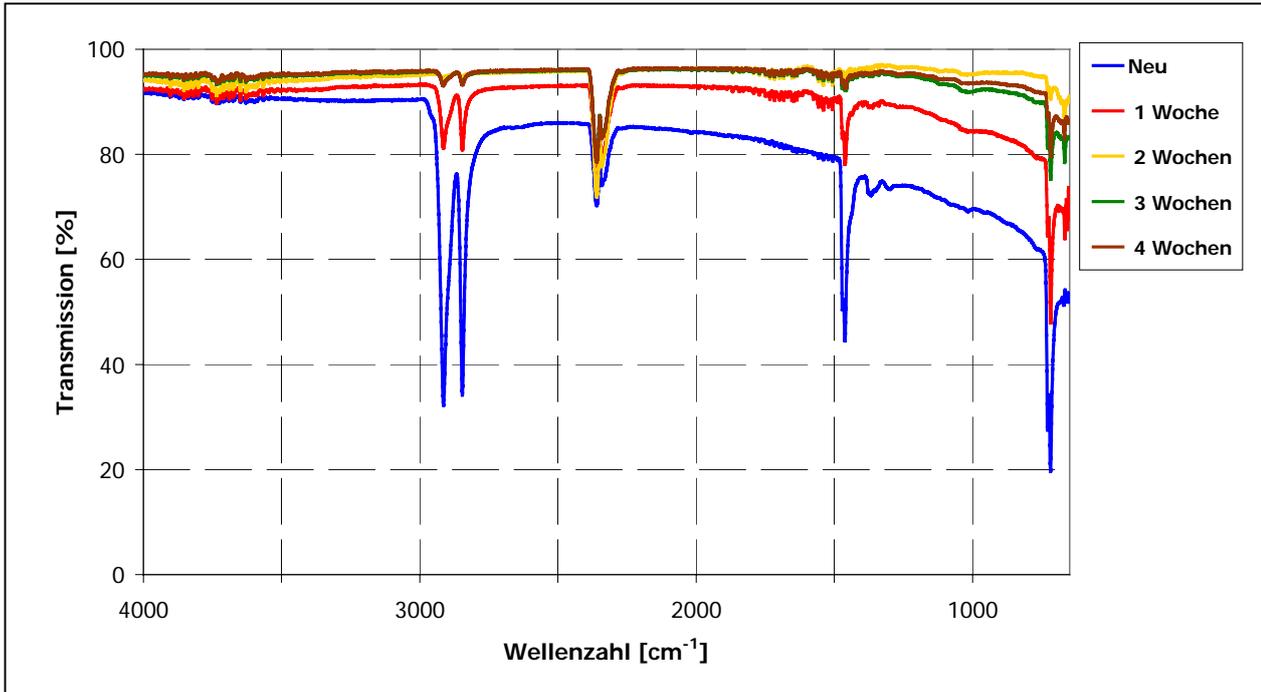


Abb. A-38: ATR-Spektren vom Kompostierungsversuch der konventionellen Mulchfolie MO-LLDPE-20b-03

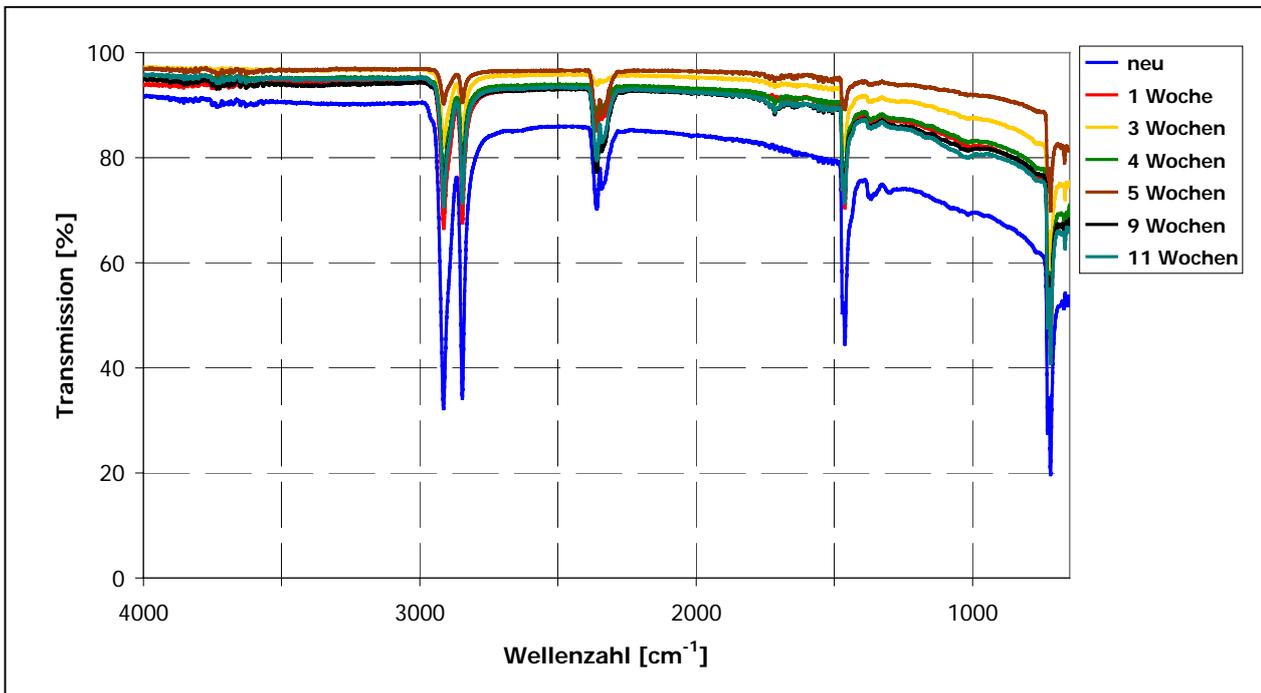


Abb. A-39: ATR-Spektren vom Bewitterungsversuch der konventionellen Mulchfolie MO-LLDPE-20b-03

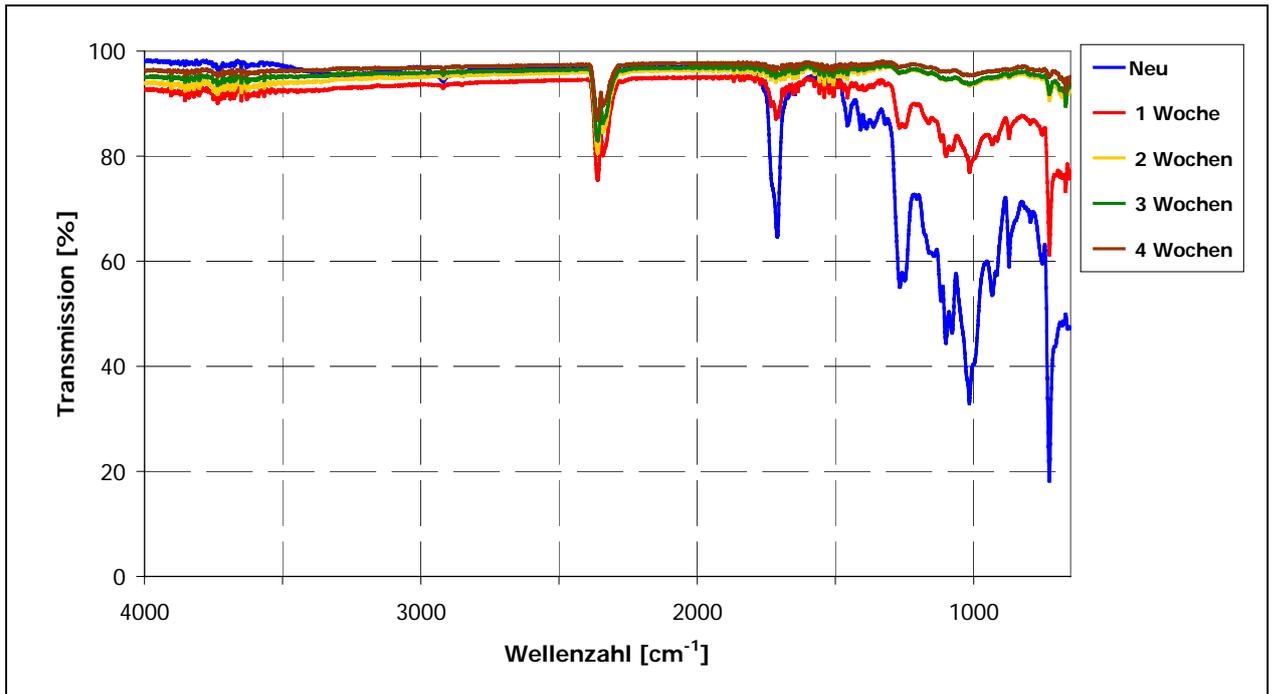


Abb. A-40: ATR-Spektren vom Kompostierungsversuch der biologisch abbaubaren Flachfolie D4-NF803-15-03

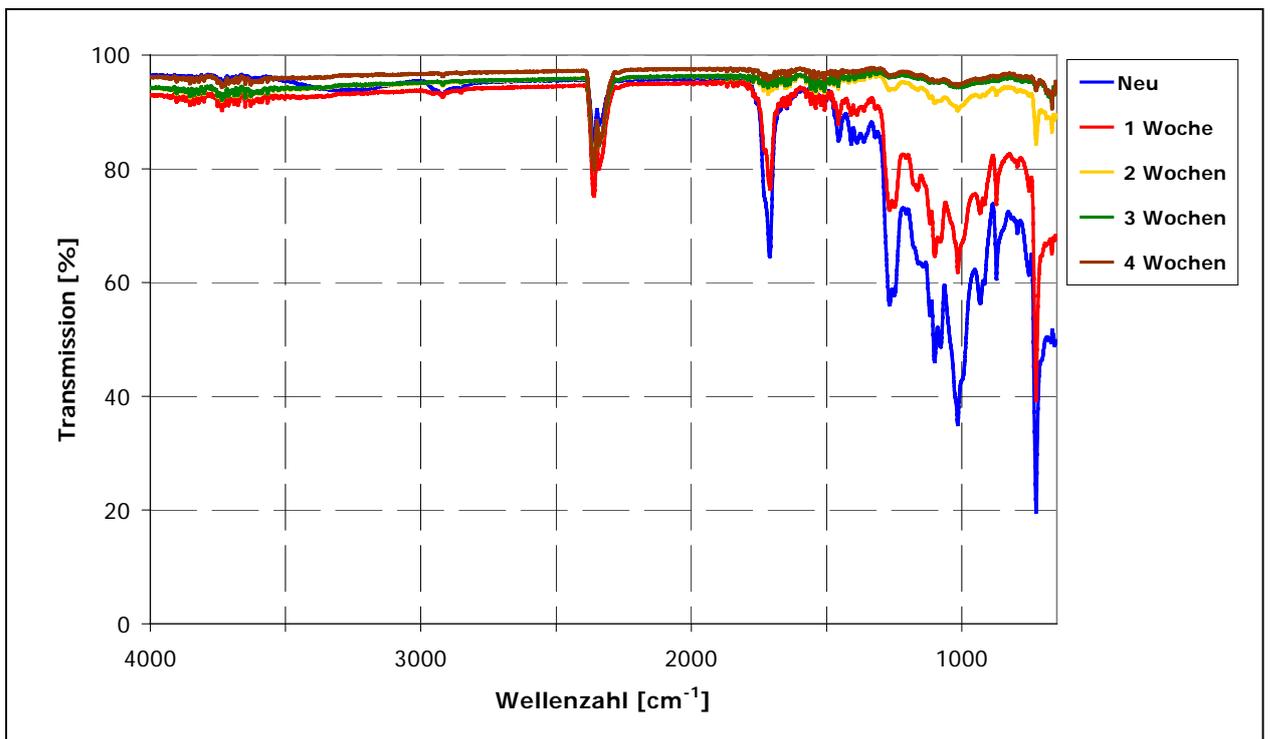


Abb. A-41: ATR-Spektren vom Bewitterungsversuch der biologisch abbaubaren Flachfolie D4-NF803-15-03

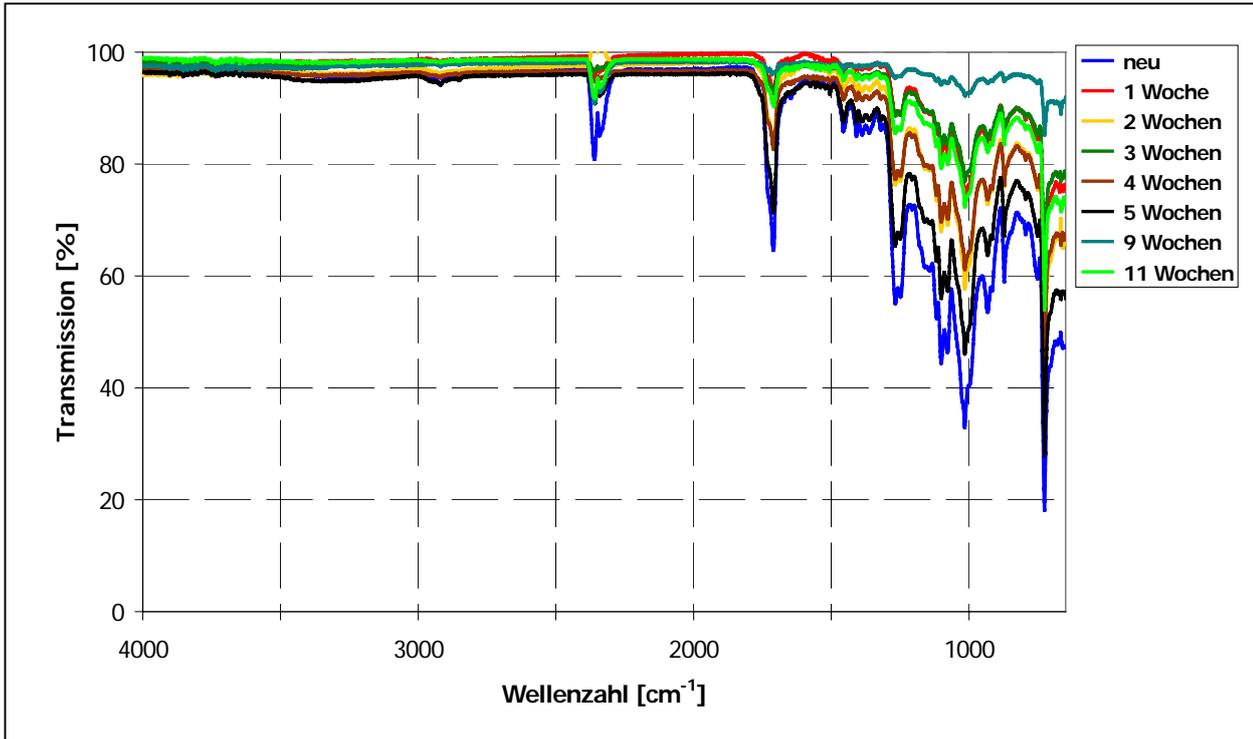


Abb. A-42: ATR-Spektren vom Kompostierungsversuch der biologisch abbaubaren Flachfolie D5-NF01U-20-03

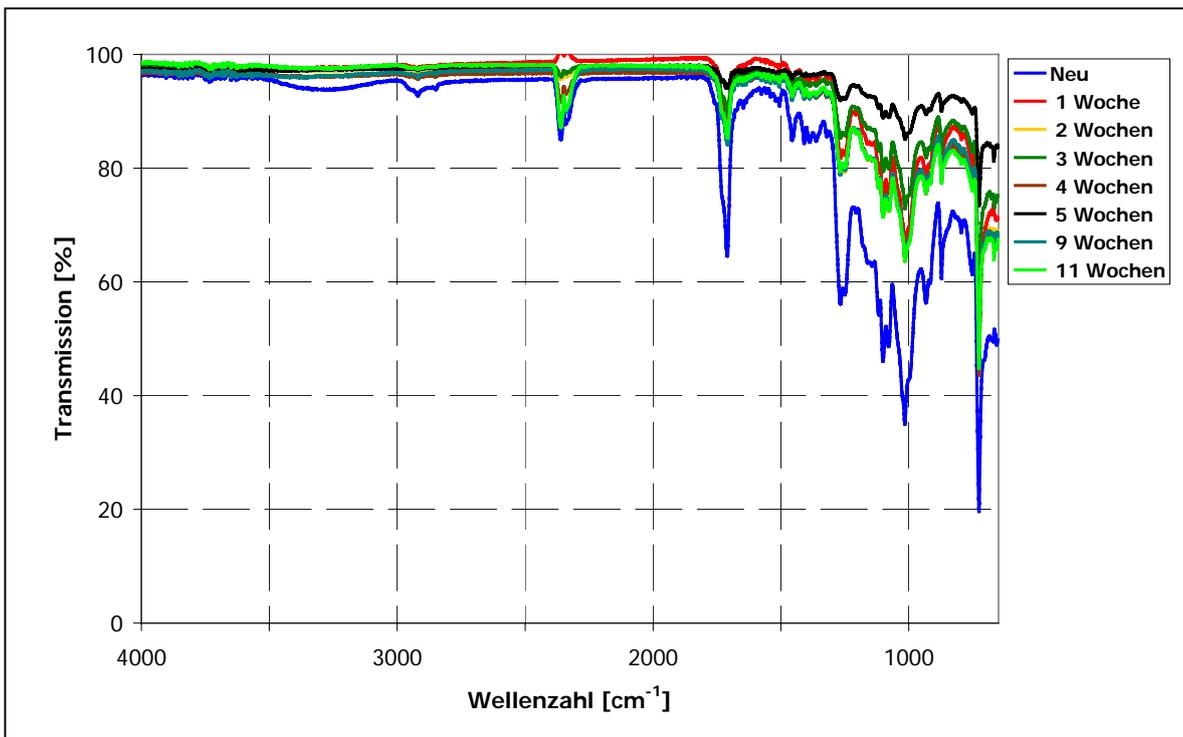


Abb. A-43: ATR-Spektren vom Bewitterungsversuch der biologisch abbaubaren Flachfolie D5-NF01U-20-03

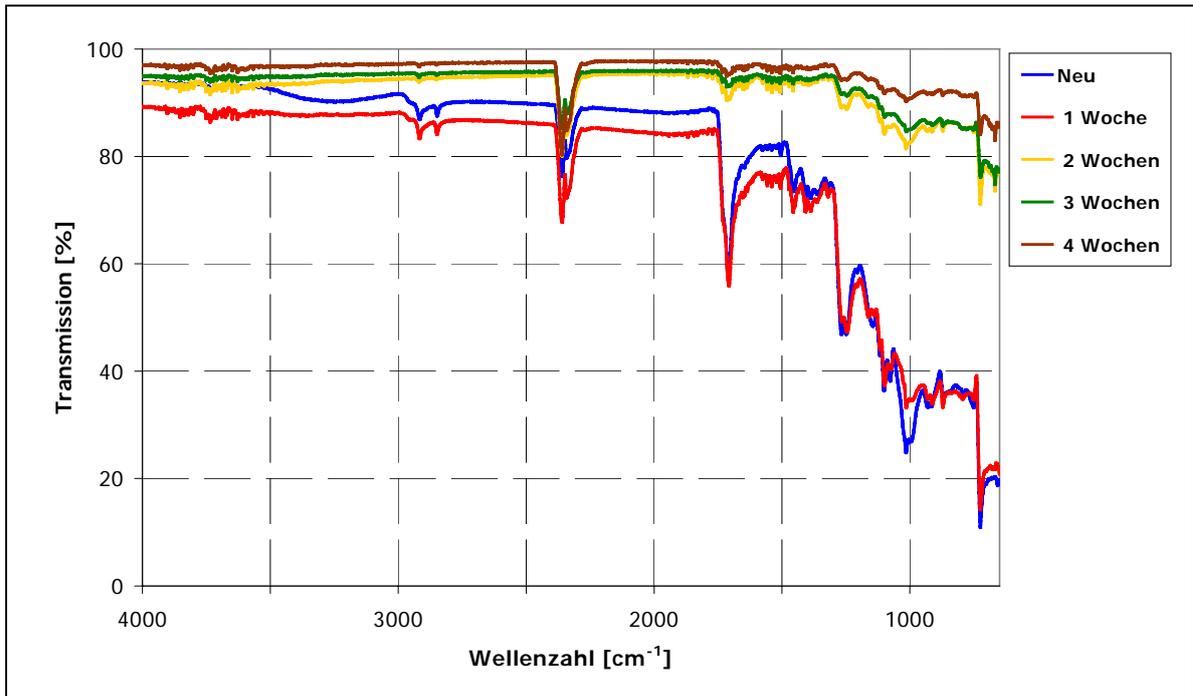


Abb. A-44: ATR-Spektren vom Kompostierungsversuch der biologisch abbaubaren Mulchfolie M4-NF803/P-15b-03

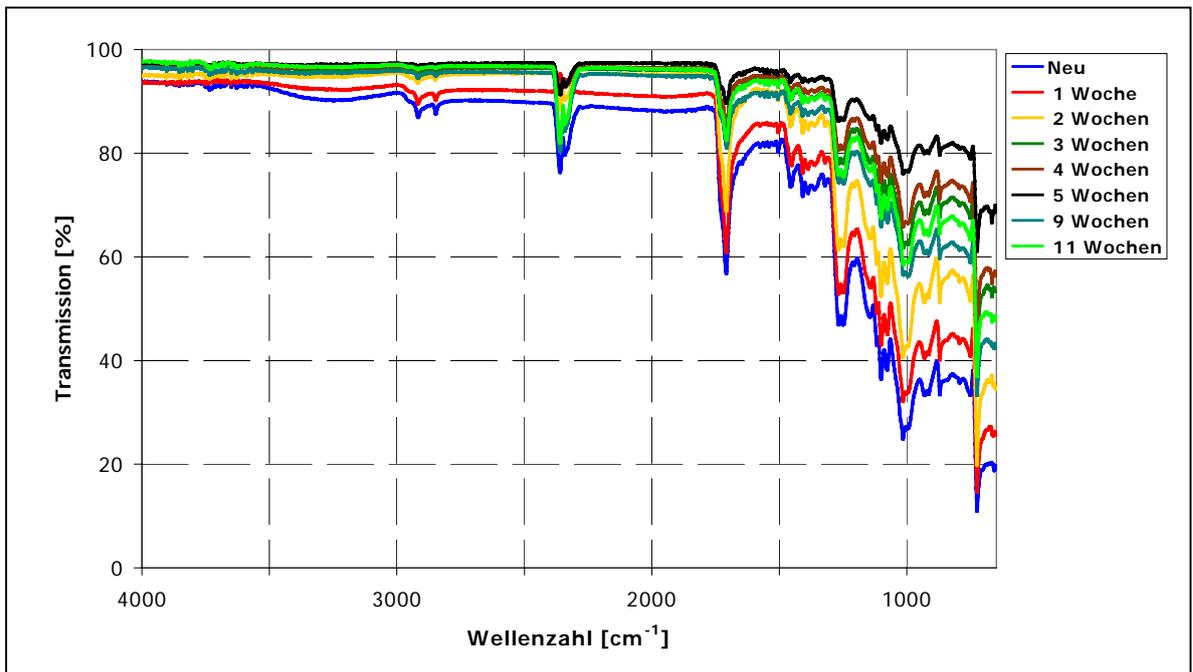


Abb. A-45: ATR-Spektren vom Bewitterungsversuch der biologisch abbaubaren Mulchfolie M4-NF803/P-15b-03

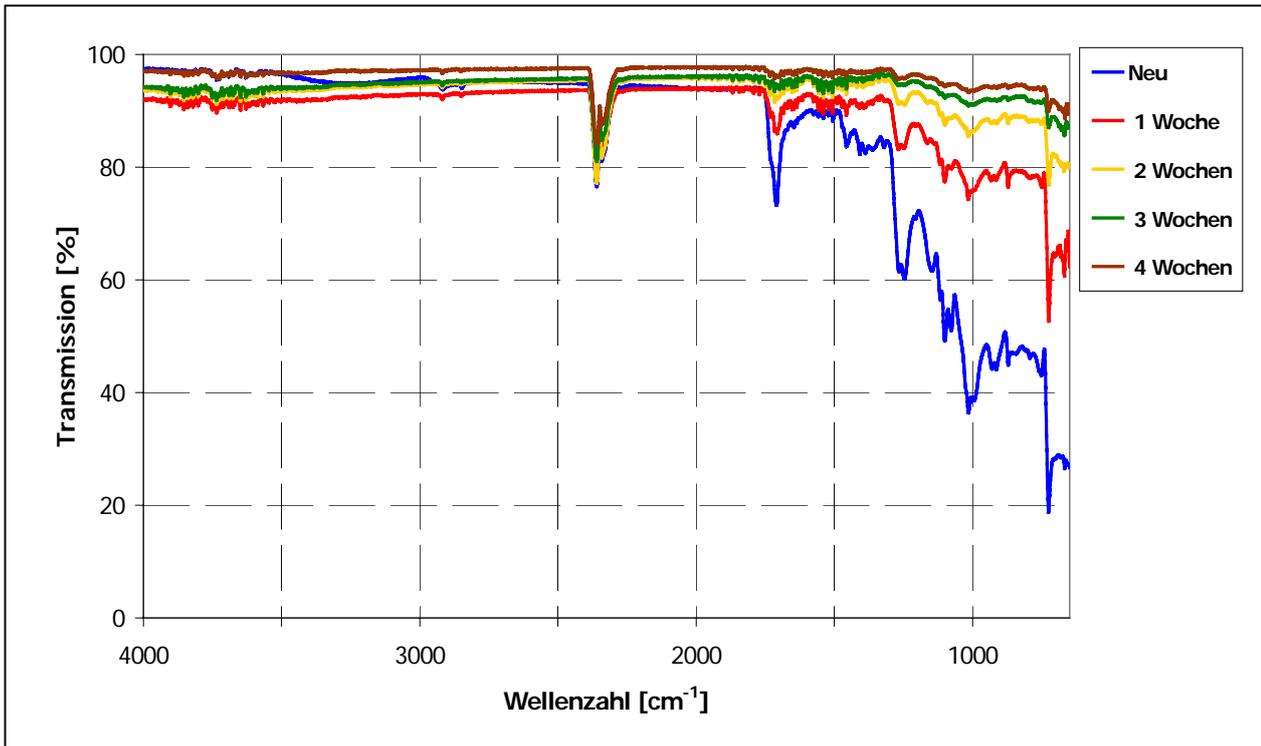


Abb. A-46: ATR-Spektren vom Kompostierungsversuch der biologisch abbaubaren Mulchfolie M5-NF01U/P-15b-03

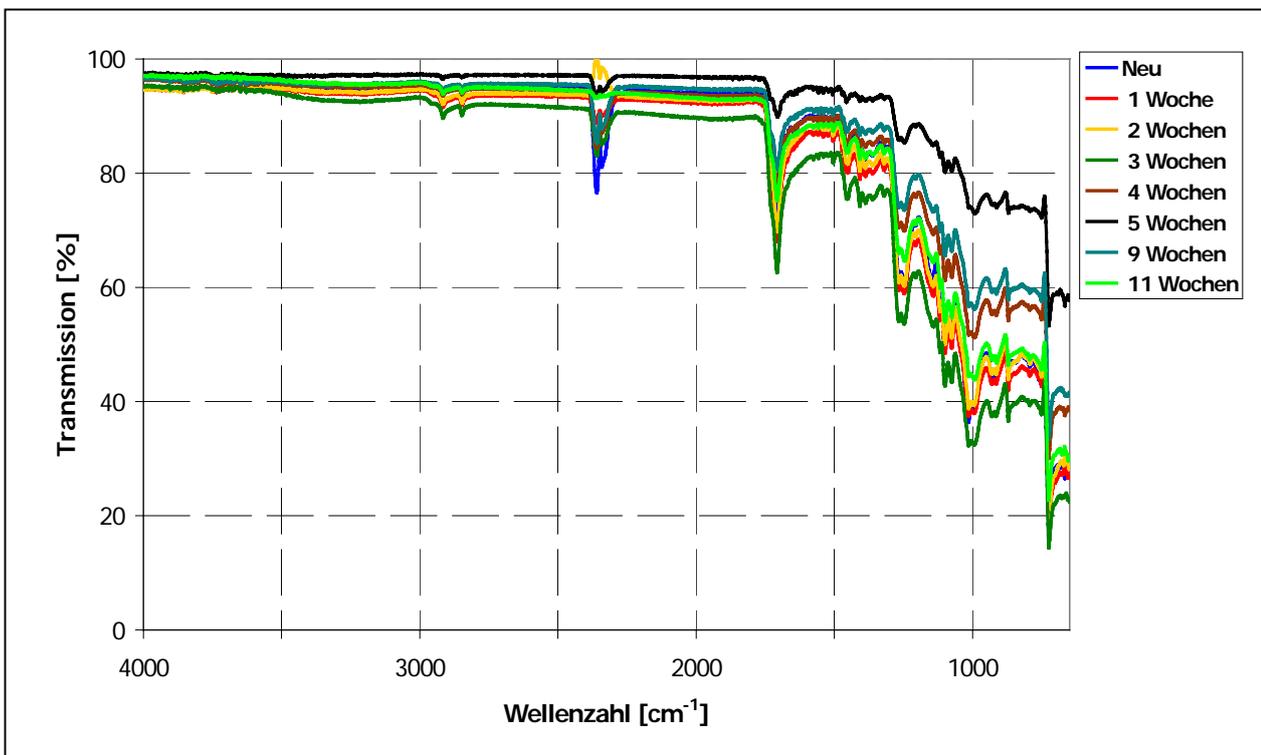


Abb. A-47: ATR-Spektren vom Bewitterungsversuch der biologisch abbaubaren Mulchfolie M5-NF01U/P-15b-03

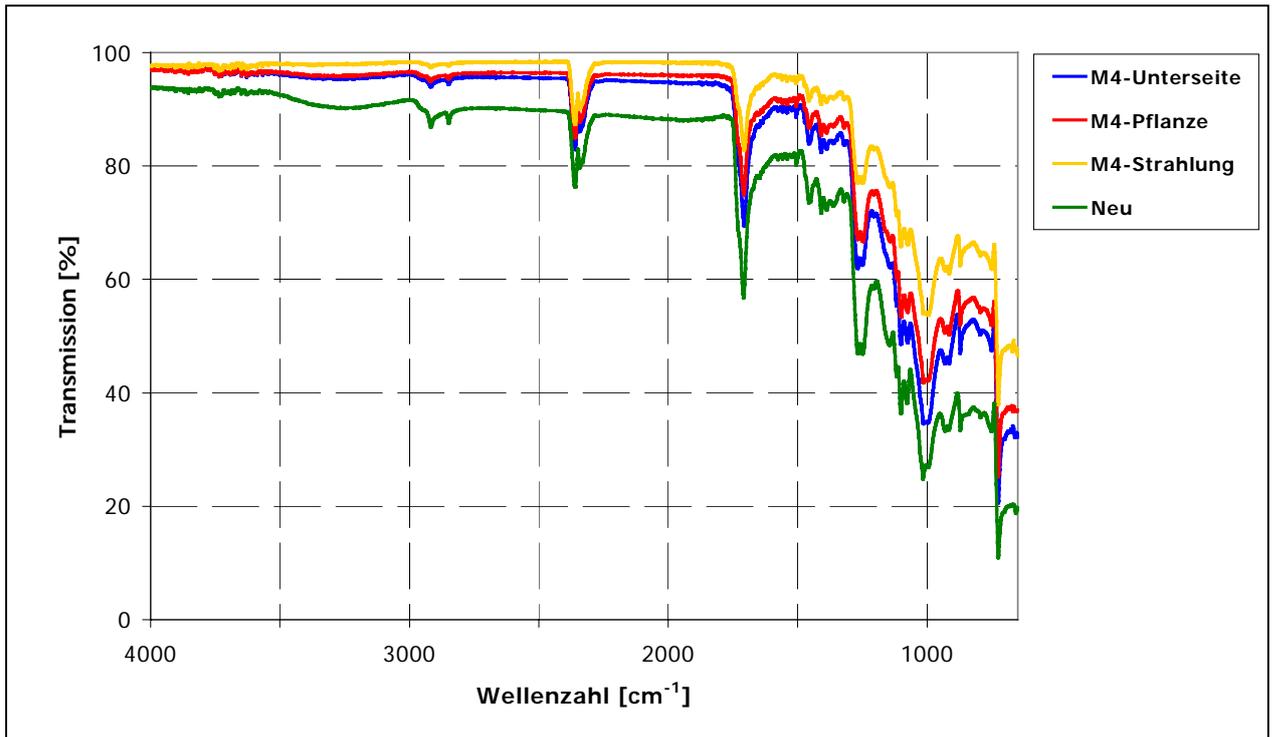


Abb. A-48: ATR-Spektren nach Ende des Freilandversuches 2003 der biologisch abbaubaren Mulchfolie M4-NF803/P-15b-03

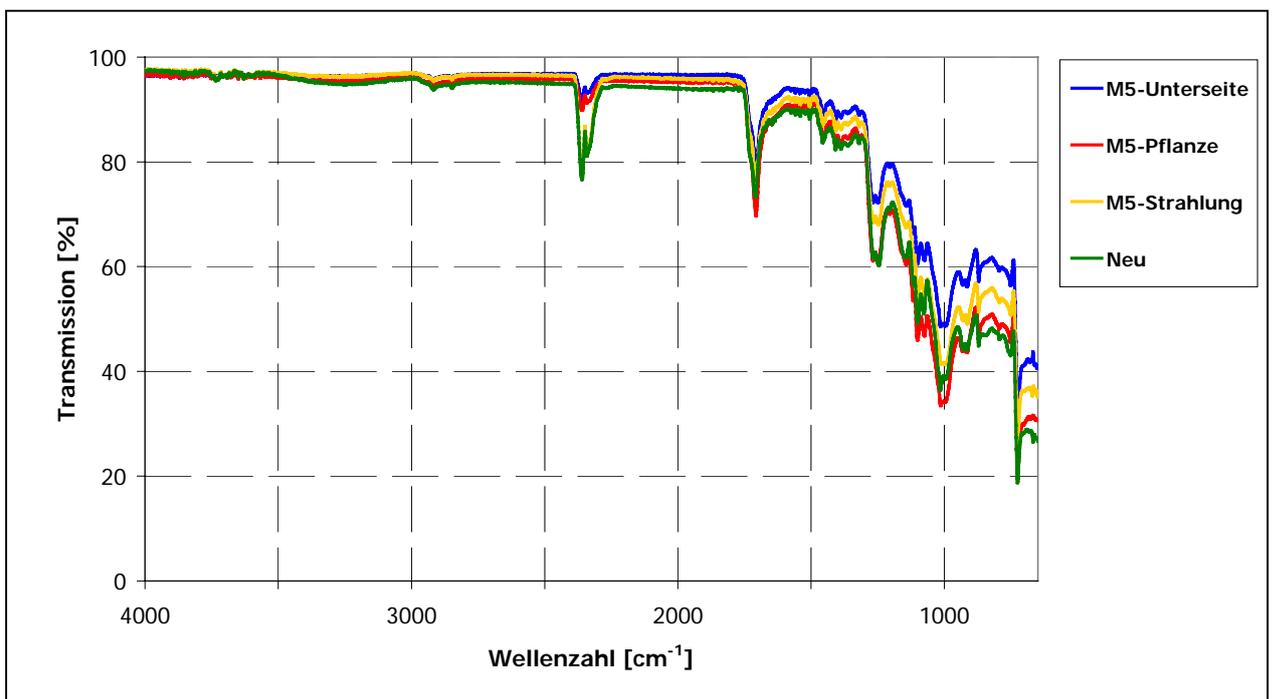


Abb. A-49: ATR-Spektren nach Ende des Freilandversuches 2003 der biologisch abbaubaren Mulchfolie M5-NF01U/P-15b-03

Tab. A-2: Wasserdampfdurchlässigkeiten von verschiedenen Kunststoffen aus der Literatur

Material	Wert	Einheit	Quelle
PE-LLD/ PE-LD	~ 0,7	[g/(m ² *d*100 µm)] bei 20 °C	CARLOWITZ, 1995
PE-LD	1	[g/(m ² *d*100 µm)] nach DIN 53122	OBERBACH, 1998
PE-LD	5	[g/(m ² *d*25 µm)] nach DIN 53122	OBERBACH, 1998
PE	0,2 – 0,35	[g/(m ² *d*100 µm)]	HELLERICH, 2001
PE	Ca. 1 - 3	[g/(m ² *d)] nach DIN 53122	NENTWIG, 2007
Mater-Bi NF 01U	950	g*30 µm/(m ² *24 h) nach ASTM E-96	HESLER, (2007)
Mater-Bi NF803	700	g*30 µm/(m ² *24 h) nach ASTM E-96	HESLER, (2007)

Lebenslauf

Jan-Peter Michaelis

05. Januar 1969 in Itzehoe

Familienstand: verheiratet

1 Kind, Erik, geb. am 10.08.2007

Schulbildung

1975-1979

Grundschule Hohenlockstedt

1979-5/1989

Kaiser-Karl-Schule Itzehoe

Abschluß Abitur

Wehrdienst

6/1989-7/1993

Sanitätsdienst in der Bundesmarine,
Unteroffizierslaufbahn

Studium

2/1994-6/1994

Biotechnologie an der FH Hamburg

10/1994-12/1999

Gartenbauwissenschaften an der Universität
Hannover, Abschluß als Diplom-
Agraringenieur

10/1999-10/2000

Studium der Geowissenschaften an der
Universität Hannover

Berufstätigkeit

10/2000-3/2001

FBAW.e.V., Hannover

4/2001-3/2006

4/2007-9/2007

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für
biologische Produktionssysteme, Fachgebiet
Biosystem- und Gartenbautechnik, Universität
Hannover

10/2007- dato

Elternzeit

Curriculum vitae

Jan-Peter Michaelis

05. Januar 1969 in Itzehoe (Germany)

Martial status: married

1 Child, Erik, born 10.08.2007

Education

1975-1979

Primary school Hohenlockstedt

1979-5/1989

Kaiser-Karl-School Itzehoe

Degree: University entrance qualification

Military service

6/1989-7/1993

Medical service in the German Navy

Studies

2/1994-6/1994

Biotechnology at the Advanced Technical
College of Hamburg

10/1994-12/1999

Horticultural sciences at the University of
Hannover, Degree: Diploma in horticultural
sciences „Dipl.-Ing. agr.“

10/1999-10/2000

Earth sciences at the University of Hannover

Employment

10/2000-3/2001

FBAW.e.V., Hannover

4/2001-3/2006

4/2007-9/2007

Research assistant at the Institute of
Biological Production Systems, Horticultural
and Biosystems Engineering section
University of Hannover

10/2007- to date

Parental leave

Erklärung zur Dissertation

Hiermit erkläre ich, dass ich die Dissertation

Veränderung der Barriereigenschaften von biologisch abbaubaren Agrarfolien durch Abbau
und Alterung im Kulturverlauf

selbstständig verfasst und alle benutzten Hilfsmittel und Quellen sowie evtl. zur Hilfeleistung herangezogene Institutionen vollständig angegeben habe.

Die Dissertation wurde nicht schon als Masterarbeit, Diplomarbeit oder ähnliche Prüfungsarbeit verwendet.

Bad Zwischenahn, den

(Unterschrift)

Name:

DANKSAGUNG

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. H.-J. Tantau gilt mein Dank für die Überlassung des Themas und die Unterstützung im Verlauf dieser Arbeit. Für die fachkundige Betreuung während und nach der Projektzeit und die Unterstützung bei der Definition des Themas dieser Arbeit sei Dr.-Ing. Burkhard von Elsner herzlich gedankt. Prof. Dr. Thomas Rath möchte ich für die Diskussionsbereitschaft und die ehrlichen Antworten meinen Dank aussprechen.

Prof. Dr. Stützel sei für die Übernahme des Koreferates, sowie für die Überlassung der Versuchsfläche, ebenso gedankt, wie Herrn Dipl.-Ing. (FH) Spillebeen und Herrn Wagner für die praktische Unterstützung und die vielen Ratschläge bei der Durchführung der Freilandversuche.

Ein Dankeschön geht an unsere Fachgebietssekretärin Sigrid Cohrs-Zingel für die äußerst angenehme Zusammenarbeit im Projekt und in der Zeit danach. Den Kollegen der Werkstatt des BGT gilt mein Dank für die tatkräftige Unterstützung beim Versuchsaufbau und der Versuchsdurchführung, sowie Herrn Udo Dueppers für die kontinuierliche Wartung, Reparatur und Verbesserung der Messtechnik.

Meinen „Hiwis“ Susanne Gürtler und Björn Wenzel danke ich für die gewissenhafte und tatkräftige Mithilfe beim Aufbau, Durchführung und Auswertung der Versuche ebenso, wie meinen Diplomandinnen Heike Beening und Julia Bartens.

Meiner Kollegin Diana Gehrling und Daniel Gerhard vom Institut für Biostatistik danke ich für die Hilfe bei der statistischen Auswertung. Den (z. T. mittlerweile ehemaligen) Institutskollegen, besonders meinem Büronachbarn Christian Bauch, sei für das gute Arbeitsklima und die mentale Unterstützung gedankt.

Für die fachkundige Durchsicht des englischen Abstracts geht ein herzliches Dankeschön an Frau Dipl. Fachübers. Tina Barwig.

Mein spezieller Dank gilt meinen Eltern, deren mentale und finanzielle Unterstützung maßgeblich zum erfolgreichen Abschluß dieses Lebensabschnittes beigetragen haben.

Besonders herzlich möchte ich mich bei meiner Frau Dr. Gerlinde Michaelis bedanken. Ohne ihr ehrenamtliches Coaching, die mehrfache kritische Durchsicht der Arbeit und die persönliche oder finanzielle Übernahme der Kindesbetreuung wäre ein Abschluß dieser Arbeit nicht möglich gewesen.