

AGRAMETEOROLOGISCHE SCHRIFTEN

Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät
INSTITUT FÜR PFLANZENBAUWISSENSCHAFTEN



Heft 11

2003

Das Mikroklima in Winterroggen-Beständen

U. Wittchen¹⁾ und F.-M. Chmielewski²⁾

¹⁾ **Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft
Institut für Folgenabschätzung im Pflanzenschutz**

²⁾ **Humboldt-Universität zu Berlin
Institut für Pflanzenbauwissenschaften, Lehrgebiet Agrarmeteorologie**

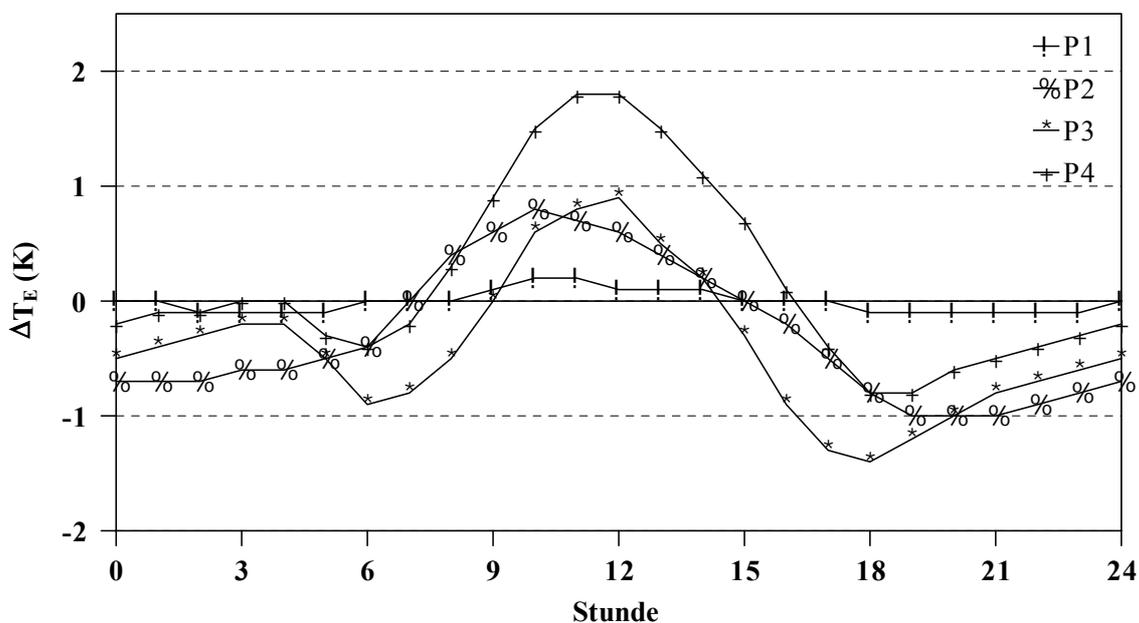


Abb.: Mittlere Temperaturdifferenzen (ΔT_E) in K zwischen Winterroggen-Bestand und Basisstation (0,2 m Höhe) in den verschiedenen Entwicklungsphasen (P1 bis P4), Berlin-Dahlem, 1981 bis 1999

Preprint: Mikroklima in Winterroggen-Beständen

AGRARMETEOROLOGISCHE SCHRIFTEN

Herausgeber: PD Dr. Frank-M. Chmielewski
Humboldt-Universität zu Berlin
Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät
Institut für Pflanzenbauwissenschaften
Lehrgebiet Agrarmeteorologie
D-14195 Berlin-Dahlem, Albrecht-Thaer-Weg 5

e-mail: chmielew@agrar.hu-berlin.de

Internet: <http://www.agrar.hu-berlin.de/pflanzenbau/agrarmet>

Ausgabe: *H11, 2003*

Das Mikroklima in Winterroggen-Beständen

U. Wittchen¹⁾ und F.-M. Chmielewski²⁾

¹⁾ Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (BBA),
Institut für Folgenabschätzung im Pflanzenschutz
Stahnsdorfer Damm 81, D-14532 Kleinmachnow

²⁾ Humboldt-Universität zu Berlin, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät,
Institut für Pflanzenbauwissenschaften, Lehrgebiet Agrarmeteorologie
Albrecht-Thaer-Weg 5, D-14195 Berlin

Zusammenfassung:

Die Studie beschreibt das Mikroklima eines Winterroggen-Bestandes (Bestandesklima) im Vergleich zu einer vegetationslosen Basisstation. Betrachtet werden Lufttemperatur und Luftfeuchte. Grundlage der Beschreibung sind langjährige Messungen (1981 bis 1999) in 0,2 m Höhe auf dem Versuchsfeld der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät der Humboldt-Universität zu Berlin.

Die Studie zeigt, dass das Bestandesklima vom Entwicklungsstadium der Pflanzen (BBCH-Stadium¹⁾) sowie von meteorologischen und pflanzenmorphologischen Bedingungen bestimmt wird. In Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium der Pflanzen variieren sowohl die Stärke des Einflusses meteorologischer und pflanzenmorphologischer Parameter auf das Bestandesklima als auch die Parameter selbst. Daraus folgt eine unterschiedliche Erwärmung und Abkühlung des Bestandes sowohl im Tagesverlauf als auch innerhalb der Vegetationszeit.

Grundsätzlich ist der Winterroggen-Bestand zwischen 7 und 15 Uhr wärmer als die Basisstation. Bei Sonnenhöchststand erwärmt sich der Bestand am stärksten. Die wesentlichste Einflussgröße ist die Intensität der Globalstrahlung. Die höchsten Temperaturdifferenzen im Vergleich zur vegetationslosen Basisstation werden unmittelbar vor der Ernte gemessen; die maximalen Stundenwerte betragen +9 K. Die stärkste Abkühlung des Pflanzenbestandes gegenüber der vegetationslosen Basisstation erfolgt in den späten Abend- und den frühen Morgenstunden. Ein hoher Blattflächenindex² verstärkt diesen Effekt. Die extremen Stundenwerte betragen –6 K.

Beginnend mit der Entwicklung des Fahnenblattes erhöht sich die Luftfeuchte innerhalb des Winterroggen-Bestandes deutlich. Die stärkste Feuchtezunahme ist kurz nach Sonnenaufgang zwischen 5 und 7 Uhr zu verzeichnen. Die Maxima der Feuchtedifferenzen zwischen Pflanzenbestand und Basisstation werden bei hohem Blattflächenindex erreicht. Die extremen Stundenwerte überschreiten +6 hPa Dampfdruck bzw. +30 % relativer Luftfeuchte. Mit lichter werdendem Bestand verringert sich dessen Luftfeuchte. Mit Erreichen der Gelbreife werden in den Mittagsstunden im Bestand teilweise geringere Werte der relativen Luftfeuchte gemessen.

Stichworte: Mikroklima, Bestandesklima, Winterroggen, Lufttemperatur, Luftfeuchte

¹ Das Entwicklungsstadium der Pflanzen wird an Hand der Erweiterten BBCH-Skala (HACK et al., 1997) bestimmt. Diese basiert auf einer Gemeinschaftsarbeit der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (BBA), des Bundessortenamtes (BSA) und des Industrieverbandes Agrar (IVA) unter Mitwirkung anderer Institutionen.

² Der Blattflächenindex wurde anhand der Schwächung des Lichtes beim Durchdringen des Winterroggen-Bestandes ermittelt.

1. Einleitung

Die Witterung beeinflusst sowohl Wachstum und Entwicklung der Pflanzen eines landwirtschaftlichen Bestandes als auch der in ihm lebenden Organismen. Die zur Charakterisierung der Witterung erforderlichen Daten werden vorrangig an offiziellen meteorologischen Stationen gewonnen. Diese repräsentieren häufig ein anderes landschaftliches Ökosystem, in keinem Fall aber die im Pflanzenbestand herrschenden mikroklimatischen Bedingungen. Genau jene sind aber für Schadorganismen, für die das Innere des Bestandes den unmittelbaren Lebensraum darstellt, von entscheidender Bedeutung. Daher besteht – vor allem aus phytopathologischer Sicht – ein grundlegendes Interesse, die Besonderheiten des Mikroklimas eines Nutzpflanzenbestandes gegenüber einer frei stehenden vegetationslosen Basisstation zu ermitteln. Auf der Basis mehrjähriger Beobachtungsergebnisse vom Versuchsfeld der Humboldt-Universität zu Berlin in Berlin-Dahlem (Chmielewski und Köhn, 1999) wurde der Einfluss unterschiedlicher meteorologischer und pflanzenmorphologischer Bedingungen auf Lufttemperatur und Dampfdruck in 0,2 m Höhe innerhalb eines Winterroggen-Bestandes analysiert. Die vorliegende Studie stellt erste Ergebnisse vor.

2. Material und Methoden

2.1 Datenmaterial

Für diese Studie wurden Daten des Agrarmeteorologischen Messfeldes der Humboldt-Universität zu Berlin in Berlin-Dahlem (geogr. Breite: 52° 28', geogr. Länge: 13° 18', Höhe: 51 m) verwendet. Die mikroklimatischen Messungen erfolgten sowohl auf einer pflanzenfreien Basisstation als auch parallel dazu in einem, sich in unmittelbarer Nähe befindlichen Winterroggen-Bestand (Größe 214m²). Die Messwertgeber für Lufttemperatur und –feuchte wurden einheitlich in 0,2 m über der Bodenoberfläche installiert; die der Bodentemperatur in 0,2 m Tiefe. Für die Auswertungen standen langjährige Aufzeichnungen im Zeitraum von 1981 bis 1999 zur Verfügung. Die meteorologischen Messungen wurden durch Beobachtungen des Blattflächenindex und der Bestandeshöhe des Winterroggens ergänzt. Als Winterroggen-Sorten waren *Petkuser Normalstroh* (1981 bis 1987) und die Kurzstrohsorte *Halo* (1988 bis 1999) angebaut. Agrotechnischen Maßnahmen, wie u.a. Saatstärke und Reihenabstand blieben während des Versuches unverändert. Die Düngung des Pflanzenbestandes erfolgte ebenfalls einheitlich mit 40 kg/ha N, 21 kg/ha P und 50 kg/ha K jährlich.

2.2 Methoden der Datenbearbeitung

Ermittlung der meteorologischen und pflanzenmorphologischen Werte

Die meteorologischen Werte wurden mit Hilfe eines Datenloggers ermittelt, dessen Abfragefrequenz 10 Sekunden beträgt. Gespeichert wurden die Daten als 15-Minuten-Werte. Aus den vier gespeicherten Werten einer Stunde wurden stündliche Mittelwerte berechnet. Zur Darstellung der Feuchteverhältnisse im Pflanzenbestand wurde vorrangig der Dampfdruck verwendet. Dieser wurde aus den gemessenen Werten der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte berechnet (Tafeln, 1976).

Die Bestimmung des Blattflächenindizes erfolgte auf der Basis eines Pflanzen- und Bodenwasserhaushaltsmodells (Stenitzer, 1988; Uhlmann, 1993; Krüger, 1996), die der Bestandeshöhe durch vierparametrische Tangenshyperbolicus-Funktionen (Rasch et al., 1992), die für jedes Jahr an Hand von Einzelmessungen ermittelt wurden.

Unterteilung der Vegetationszeit in Entwicklungsphasen

Zur besseren Charakterisierung der vorrangig das Mikroklima beeinflussenden Größen wurde die Vegetationszeit in vier Entwicklungsphasen unterteilt, die sich an der Entwicklung der Pflanzen orientieren (BBCH-Stadien). Folgende Phasen wurden definiert:

- Blattentwicklungs- und Bestockungsphase (P1)
- Schoss- und Ährenschwellphase (P2)
- Blütenanlage- und Blühphase (P3)
- Kornfüllungs- und Reifephase (P4)

Art der Darstellung der meteorologischen Werte innerhalb der Vegetationszeit

Die Entwicklungsphasen erstrecken sich in den Einzeljahren auf eine unterschiedliche Anzahl von Tagen. Um die zeitliche Darstellung der Mittelwerte mehrerer Jahre zu erleichtern und eine etwa gleiche vegetative Entwicklung innerhalb der einzelnen Phasen zu sichern, wurde die Andauer der Entwicklungsphase eines Jahres jeweils auf die mittlere Andauer aller Jahre normiert. Dabei wurde jedem Tag (d_{ij}) der Entwicklungsphase des Jahres (i) eine „normierte“ Tages-Nummer (d_{ij}^*) zugeordnet. Diese ergab sich aus:

$$d_{ij}^* = \text{abs} \left(d_{ij} * \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i}{m_i} \right) \quad \text{mit}$$

abs Betrag
n Anzahl der Jahre,
 m_i Andauer der Entwicklungsphase im i . Jahr

3. Ergebnisse

3.1 Das Mikroklima in der gesamten Vegetationszeit

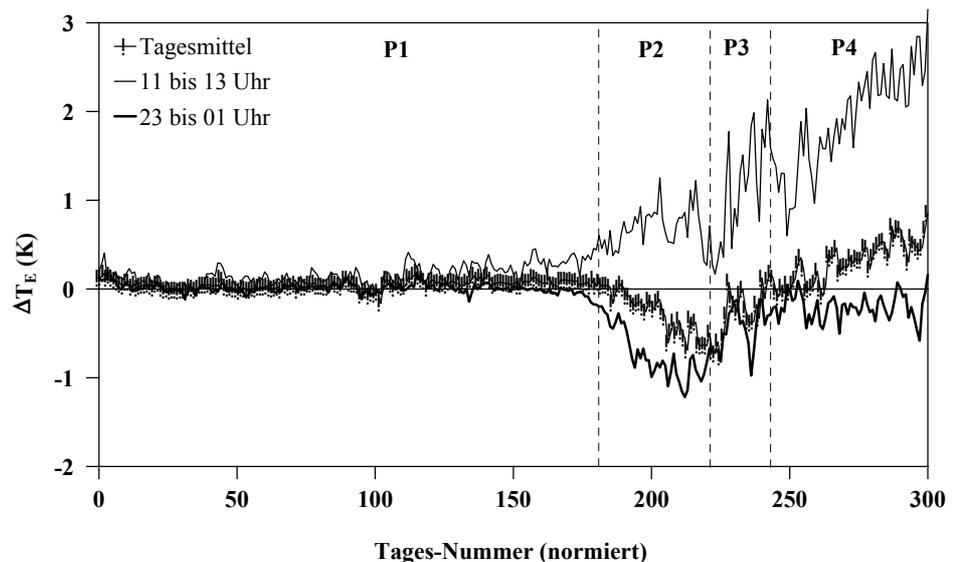
Die *Tagesmittel der Lufttemperatur* des Winterroggen-Bestandes und der vegetationslosen Basisstation unterscheiden sich nur unwesentlich voneinander. Erkennbare Differenzen existieren lediglich im Zeitraum der höchsten grünen Blattfläche (2. Hälfte der Phase P2 und 1. Hälfte der Phase P3) sowie zum Vegetationsende (2. Hälfte der Phase P4). Im erstgenannten Zeitraum ist der Winterroggen-Bestand im Tagesmittel kälter, im letztgenannten wärmer als die Basisstation. Die Differenzen sind allerdings gering; sie überschreiten nur selten den Betrag von 1 K.

Deutlich höhere Temperaturdifferenzen zwischen Winterroggen-Bestand und Basisstation sind zwischen *Tag* und *Nacht* erkennbar. Abb. 1 zeigt dieses für ein Zeit-

Intervall bei Sonnenhöchststand (11 bis 13 Uhr) und eines zum Tageswechsel (23 bis 1 Uhr). Grundsätzlich gilt, dass sich der Pflanzenbestand gegenüber der pflanzenfreien Fläche am Tag stärker erwärmt und in der Nacht stärker abkühlt. In den Mittagsstunden ist eine stete Zunahme der Temperaturdifferenzen zwischen Schossbeginn und Ernte zu verzeichnen; unmittelbar vor der Ernte ist der Winterroggen-Bestand im langjährigen Mittel um 2,5 K wärmer als die Basisstation. In den Nachtstunden werden die höchsten negativen Temperaturdifferenzen bereits zum Ende der Phase P2 erreicht; im langjährigen Mittel ist der Bestand um mehr als 1,0 K kälter. Die Ursachen werden im Abschnitt 3.2. näher diskutiert.

Abb. 1:

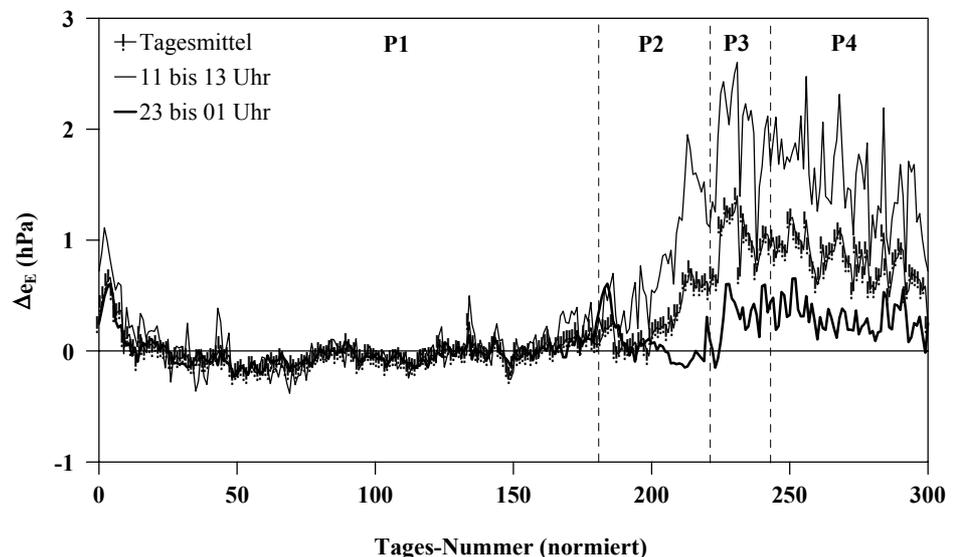
Mittlere Temperaturdifferenzen (ΔT_E) zwischen Winterroggen-Bestand und Basisstation, Berlin-Dahlem, 1981 bis 1999, gesamte Vegetationszeit



Beim *Dampfdruck* sind bereits im *Tagesmittel* deutliche Unterschiede erkennbar. Ab Mitte der Phase P2 wird der Winterroggen-Bestand im Vergleich zur vegetationslosen Basisstation zunächst stetig feuchter. Die Maxima der Dampfdruckdifferenzen treten in der Mitte der Phase P3 zum Zeitpunkt des höchsten Blattflächenindizes auf; sie erreichen im langjährigen Mittel 1,0 hPa. Mit lichter werdendem Pflanzenbestand verringern sich die Differenzen.

Abb. 2:

Mittlere Dampfdruckdifferenzen (Δe_E) zwischen Winterroggen-Bestand und Basisstation, Berlin-Dahlem, 1981 bis 1999, gesamte Vegetationszeit



Die höheren Tagesmittel des Dampfdruckes im Winterroggen-Bestand basieren im Wesentlichen auf einen am *Tag* deutlich feuchteren Pflanzenbestand (Abb. 2). In den Mittagsstunden werden im langjährigen Mittel maximale Dampfdruckdifferenzen >2,0 hPa zwischen Winterroggen-Bestand und Basisstation erreicht. In der *Nacht* sind die Differenzen sichtlich geringer. Die Dampfdruckwerte des Pflanzenbestandes übertreffen diejenigen der Basisstation nur unwesentlich.

3.2 Das Mikroklima im Vergleich zwischen den Entwicklungsphasen

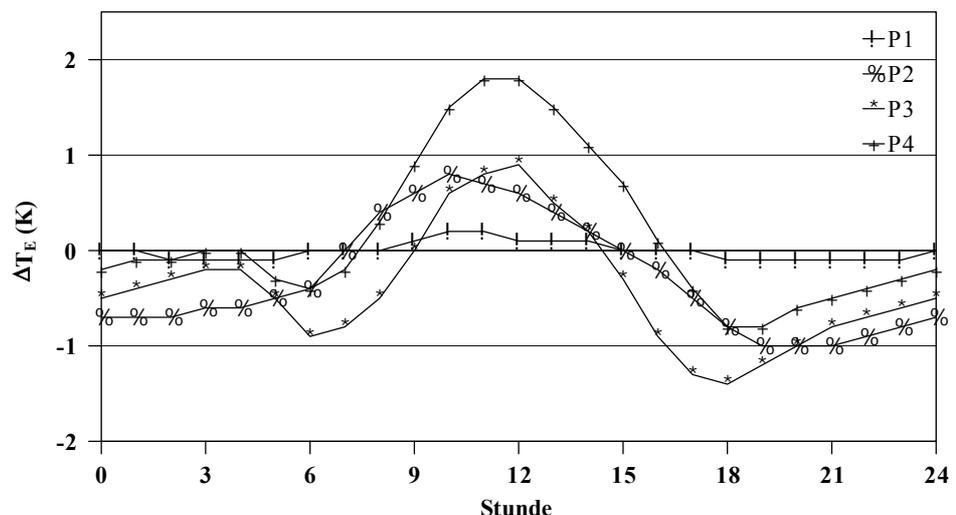
Die zeitlichen Verläufe der Lufttemperatur und des Dampfdruckes der gesamten Vegetationszeit dokumentieren erhebliche Unterschiede zwischen den einzelnen Entwicklungsphasen. Das gilt sowohl für die Werte selbst als auch für die Differenzen zwischen Winterroggen-Bestand und vegetationsloser Basisstation. Letztgenannte werden im Vergleich zwischen den einzelnen Entwicklungsphasen näher betrachtet und die Unterschiede analysiert.

Temperaturdifferenzen

Den Verlauf der Temperaturdifferenzen zwischen Winterroggen-Bestand und vegetationsloser Basisstation in den vier Entwicklungsphasen zeigt Abb. 3. In allen Phasen ist ein unterschiedlich ausgeprägter Tagesgang erkennbar.

Abb. 3:

Mittlere Temperaturdifferenzen (ΔT_E) zwischen Winterroggen-Bestand und Basisstation in den verschiedenen Entwicklungsphasen (P1 bis P4), Berlin-Dahlem, 1981 bis 1999



In der *Blattentwicklungs- und Bestockungsphase (P1)* ist der Tagesgang sehr flach. Diese Phase, die in Berlin-Dahlem im Mittel vom 05.10. (± 5 Tage) bis zum 03.04. (± 9 Tage) andauert und die Vegetationsruhe mit beinhaltet, ist durch einen sehr flachen Winterroggen-Bestand (< 0,1 m) gekennzeichnet. Der Bestand, der eine größere Oberfläche im Vergleich zur vegetationslosen Basisstation aufweist, kann in den Tagesstunden mehr Wärmeenergie absorbieren. Gleichzeitig wird die aktive Schicht, in der der Energieumsatz erfolgt, etwas angehoben. Dadurch erreicht die vom Pflanzenbestand absorbierte Wärme früher den Messwertgeber in 0,2 m Höhe als an der Basisstation; die Maxima der Temperaturdifferenzen treten geringfügig vor dem Sonnenhöchststand auf. Nachts kühlt der Winterroggen-Bestand auf Grund der größeren ausstrahlenden Oberfläche etwas stärker ab.

Mit Beginn der *Schoss- und Ährenschwellphase (P2)*, die im Mittel vom 04.04. (± 9 Tage) bis zum 12.05. (± 5 Tage) andauert, setzt ein starkes vegetatives Wachstum der Pflanzen ein. Das führt zu einer Änderung der Bestandeshöhe von 0,1 m auf 0,9 m, der Blattflächenindex erhöht sich von $0,7 \text{ m}^2/\text{m}^2$ auf $2,7 \text{ m}^2/\text{m}^2$. Deutliche Veränderungen vollziehen sich auch bei den meteorologischen Bedingungen. Das Tagesmittel der Lufttemperatur steigt in dieser Phase von $7,4 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $14,2 \text{ }^\circ\text{C}$, die Globalstrahlung um ca. 80 %. Der sich streckende Winterroggen-Bestand umschließt und überragt mehr und mehr den Messwertgeber. Dieser befindet sich jetzt in mindestens $2/3$ der Phase innerhalb der aktiven Schicht. Er profitiert damit unmittelbar von der Absorption der Strahlung. Das führt zu einer deutlich stärkeren und schnelleren Erwärmung des Pflanzenbestandes. Die Temperaturdifferenzen zwischen Winterroggen-Bestand und Basisstation nehmen zu; die Maxima werden – deutlich vor Sonnenhöchststand – bereits zwischen 10 und 11 Uhr erreicht. In den späten Nachmittagsstunden setzt eine starke Abkühlung des Bestandes ein. Auch hier umschließt die aktive, d.h. die ausstrahlende Schicht, den Messwertgeber unmittelbar. Diese besitzt durch die Blätter der Pflanzen eine große Oberfläche. Zudem ist der Bestand sehr kompakt (hohe Blattflächendichte), was den Austausch der kalten Luft erheblich einschränkt. Die Folge ist ein in der gesamten Nacht deutlich kühlerer Pflanzenbestand.

Die *Blütenanlage- und Blühphase (P3)* ist die zeitlich kürzeste Phase. In Berlin-Dahlem umfasst sie im Mittel den Zeitraum vom 13.05. (± 5 Tage) bis zum 03.06. (± 8 Tage). In dieser Phase wächst der Winterroggen-Bestand von 0,9 m auf 1,4 m Höhe; der Blattflächenindex erreicht mit $3,1 \text{ m}^2/\text{m}^2$ in der Mitte der Phase sein Maximum. Die Lufttemperatur steigt auf $18,1 \text{ }^\circ\text{C}$, die Globalstrahlung nur noch geringfügig um ca. 10 %.

Die hohen und relativ dichten Pflanzenbestände behindern das Eindringen der Solarstrahlung. Die Erwärmung des Messwertgebers in 0,2 m Höhe innerhalb des Winterroggen-Bestandes erfolgt vorrangig durch Wärmestrahlung und –leitung. Besonders bei geringem Einstrahlungswinkel in den Morgen- und Abendstunden wird die vegetationslose Basisstation bevorzugt erwärmt. Das führt zu deutlich kühleren Beständen in der überwiegenden Anzahl der Stunden des Tages. Die Minima sind dabei 2 bis 3 Stunden nach Sonnenaufgang bzw. 2 bis 3 Stunden vor Sonnenuntergang zu verzeichnen. Ein wärmerer Winterroggen-Bestand existiert lediglich im Zeitraum zwischen 9 und 15 Uhr; das Maximum wird bei Sonnenhöchststand erreicht. Die Erwärmung des Bestandes bleibt jedoch gering. Die – im Verhältnis zur Basisstation – starke Abkühlung in den Morgenstunden einerseits und der die Wärmestrahlung und –leitung behindernde hohe Blattflächenindex andererseits ermöglichen – trotz höherer Lufttemperatur und Globalstrahlung – nur unwesentlich höhere Maxima im Vergleich zur vorangegangenen Phase. Dem gegenüber steht eine geringere Abkühlung in der Nacht. Ursache ist die deutlich oberhalb der Messhöhe liegende aktive Schicht. Diese sorgt für eine bevorzugte Abstrahlung der Wärme im oberen Drittel des Pflanzenbestandes. An der vegetationslosen Basisstation wird die Messhöhe dagegen unmittelbar beeinflusst.

In der *Kornfüllungs- und Reifephase (P4)* trocknet der Winterroggen-Bestand zunehmend ab. Der Blattflächenindex halbiert sich auf $1,6 \text{ m}^2/\text{m}^2$. Bestandeshöhe, Lufttemperatur und Globalstrahlung ändern sich in dieser Entwicklungsphase, die im Mittel vom 04.06. (± 8 Tage) bis zum 31.07. (± 9 Tage) andauert, nur unwesentlich. Auf Grund des lichter werdenden Pflanzenbestandes können die Sonnenstrahlen zunehmend tiefer in ihn eindringen; der bodennahe Bereich wird intensiver erwärmt. Gleichzeitig wird die Transpiration der Pflanzen – und der damit verbundene Wärmeverlust innerhalb des Bestandes – wesentlich verringert. Im Ergebnis kann sich der

Winterroggen-Bestand, der trotz seiner Durchlässigkeit den Wärmeaustausch noch deutlich behindert, wesentlich stärker als die Basisstation erwärmen. In den Mittagsstunden werden eindeutig höhere Lufttemperaturen im Bestand gemessen, nachts kühlt dieser in geringerem Umfang als in den beiden vorangegangenen Phasen ab. Der Zeitpunkt des Auftretens der Minima entspricht dem der Phase P3; die Beträge sind jedoch geringer.

Tab. 1:
Statistische Parameter der Temperaturdifferenzen (ΔT_E) zwischen Winterroggen-Bestand und Basisstation in den vier Entwicklungsphasen (P1 bis P4) (in K), Berlin-Dahlem, 1981 bis 1999

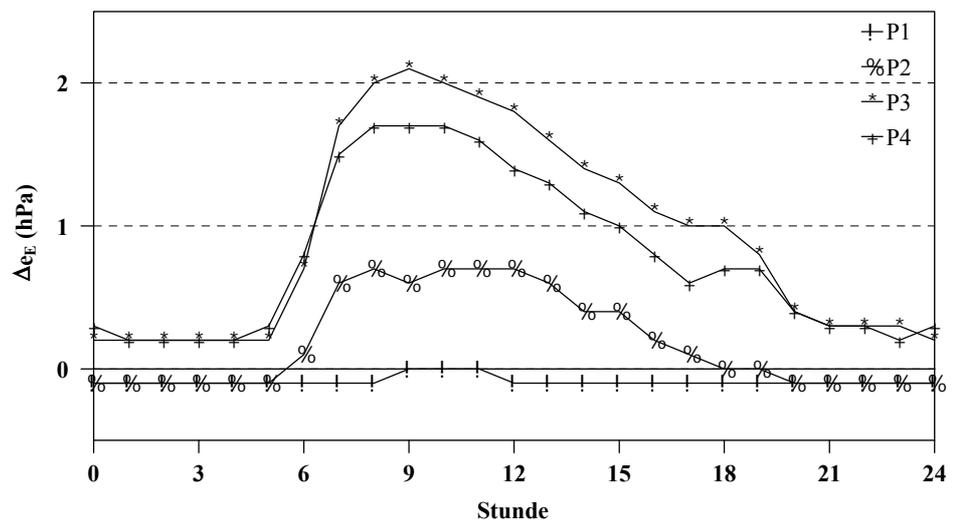
	Mittelwerte		mittlere Extremwerte				absolute Extremwerte	
			Minima		Maxima		Minima	Maxima
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s		
P1	0,0	0,26	-0,1	0,23	+0,3	0,29	-6,5	+3,0
P2	-0,3	0,75	-1,0	0,35	+0,9	0,57	-6,8	+5,9
P3	-0,5	1,17	-1,7	0,84	+1,1	1,31	-5,8	+8,1
P4	+0,2	1,09	-0,9	0,53	+1,9	1,14	-5,2	+8,2

In allen vier Entwicklungsphasen werden teilweise extreme Stundenwerte der Temperaturdifferenzen ermittelt (Tab. 1). Die Mittelwerte der zehn extremsten Stundenwerte (absolute Extremwerte) betragen zwischen $-6,8$ und $-5,2$ K (Minima) bzw. zwischen $+3,0$ und $+8,2$ K (Maxima). Die Minima treten in der Phase P1 ausschließlich bei stark negativer Lufttemperatur ($T_E < -10$ °C) und geringer Windgeschwindigkeit ($v < 1,0$ m/s), die Maxima in der Phase P4 bei geringer Bestandeshöhe ($h_B \approx 1,2$ m) und hoher Globalstrahlung auf.

Dampfdruckdifferenzen

Der Verlauf der Dampfdruckdifferenzen zwischen Winterroggen-Bestand und vegetationsloser Basisstation in den vier Entwicklungsphasen ist in Abb. 4 zu erkennen.

Abb. 4:
Mittlere Dampfdruckdifferenzen (Δe_E) zwischen Winterroggen-Bestand und Basisstation in den verschiedenen Entwicklungsphasen (P1 bis P4), Berlin-Dahlem, 1981 bis 1999



In der *Blattentwicklungs- und Bestockungsphase (P1)* sind die Dampfdruckdifferenzen äußerst gering; sie betragen im langjährigen Mittel maximal $0,1$ hPa. Mit nur wenigen Ausnahmen ist der Winterroggen-Bestand in dieser Phase trockener als die vegetationslose Basisstation. Ursache sind Kondensations- und Sublimationsvorgänge, die bevorzugt an den Pflanzen erfolgen. Diese führen zu einer Verringerung des atmosphärischen Wasserdampfes und damit des Dampfdruckes unmittelbar über dem niedrigen Pflanzenbestand.

In der *Schoss- und Ährenschwellphase (P2)* bleibt der Winterroggen-Bestand in den Nachtstunden zunächst noch trockener als die Basisstation. Auch hier ist die Kondensation des Wasserdampfes an den Pflanzen, die durch die besonders starke Abkühlung des Bestandes in dieser Phase noch unterstützt wird, verantwortlich. Unmittelbar nach Sonnenaufgang gelingt es der Sonne zunehmend die als Tau an den Pflanzen abgelagerten Wassertropfen zu verdunsten. Dies führt zu einer Erhöhung des Wasserdampfes im Pflanzenbestand und damit zur Erhöhung des Dampfdruckes. Gleichzeitig sorgen Transpirationsvorgänge der Pflanzen, denen zu diesem Zeitpunkt ein – in Folge der Winter-Niederschläge (Dez.–Febr.: 115 mm)³ – ausreichender Bodenwasservorrat zur Verfügung steht, für eine weitere Zunahme des Wasserdampfes im Pflanzenbestand. Die Evaporation der vegetationslosen Basisstation, die vorrangig durch die Lufttemperatur bestimmt ist, kommt dagegen nur langsam in Gang. Das führt vor allem in den ersten Stunden nach Sonnenaufgang zu einem schnellen Anstieg der Dampfdruckdifferenzen zwischen Winterroggen-Bestand und vegetationsloser Basisstation. Erst mit der vollständigen Verdunstung des an den Pflanzen abgelagerten Wassers tritt ein annäherndes Gleichgewicht zwischen der zeitlichen Änderung der Evapotranspiration des Pflanzenbestandes einerseits und derjenigen der Evaporation der vegetationslosen Basisstation andererseits ein: Die Dampfdruckdifferenzen variieren nur geringfügig. Erst mit der stärkeren Verringerung der Evapotranspiration des Bestandes gegenüber der Evaporation der Basisstation setzt in den frühen Nachmittagsstunden ein Abbau der Dampfdruckdifferenzen ein.

In der Phase P2 treten – bedingt durch das starke Wachstum der Pflanzen – erhebliche Unterschiede zwischen dem Beginn und dem Ende der Phase auf. So vergrößert sich die Amplitude der Dampfdruckdifferenzen auf das Fünffache; sie erreicht am Ende dieser Entwicklungsphase langjährige Mittelwerte von 1,6 hPa.

In der *Blütenanlage- und Blühphase (P3)* zeigt sich ein ähnlicher zeitlicher Verlauf der Dampfdruckdifferenzen zwischen Winterroggen-Bestand und vegetationsloser Basisstation wie in der vorangegangenen Entwicklungsphase. Unterschiede sind einerseits in den Nachtstunden und andererseits in der Amplitude der Dampfdruckdifferenzen erkennbar. In dieser Phase ist der Bestand bereits so stark entwickelt, dass auch in der Nacht ein – im Verhältnis zur Basisstation – geringfügig höherer Wasserdampfanteil im Bestand gehalten werden kann. Durch die Anhebung der aktiven (ausstrahlenden) Schicht kühlt sich der Winterroggen-Bestand vorrangig oberhalb der Messhöhe ab – hier erfolgt in den frühen Morgenstunden bevorzugt die Bildung von Tau und dessen Ablagerung an den Pflanzen. Nach Sonnenaufgang führt die Energiezufuhr zur Verdunstung des Taus und damit zu verstärkter Wasserdampfbildung innerhalb des Pflanzenbestandes. Diese wird durch die Evapotranspiration unterstützt. Beides, die Verdunstung des Taus und die Evapotranspiration, wirken auf Grund der größeren Blattfläche und der höheren Lufttemperatur intensiver als in der vorangegangenen Entwicklungsphase. Dem entsprechend verschärft sich der Anstieg der Dampfdruckdifferenzen in den Stunden nach Sonnenaufgang. Innerhalb von zwei Stunden erhöhen sich deren Werte von 0,3 hPa auf 1,7 hPa; die Maxima werden mit >2,0 hPa zwischen 9 und 10 Uhr erreicht.

³ Normalwerte Berlin-Dahlem (1961-1990), T_L: Lufttemperatur, N: Niederschlagshöhe

	Jan.	Febr.	März	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr
T _L	-0,1	0,9	4,3	8,7	13,8	17,1	18,5	18,0	14,3	9,9	4,9	1,4	9,3
N	36,6	29,6	32,1	38,1	52,6	70,0	52,7	63,5	43,1	32,7	45,4	48,2	544,6

In der *Kornfüllungs- und Reifephase (P4)* wird der Winterroggen-Bestand zunehmend trockener. Die Evapotranspiration verringert sich; die Dampfdruckdifferenzen nehmen ab.

Tab. 2:

Statistische Parameter der Dampfdruckdifferenzen (Δe_E) der vier Entwicklungsphasen (in hPa), Berlin-Dahlem, 1981 bis 1999

	Mittelwerte		mittlere Extremwerte				absolute Extremwerte	
	\bar{x}	s	Minima		Maxima		Minima	Maxima
			\bar{x}	s	\bar{x}	s		
P1	-0,0	0,53	-0,1	0,59	+0,3	0,60	-4,6	+2,2
P2	+0,2	0,84	-0,4	0,65	+1,0	0,87	-3,8	+5,0
P3	+1,0	1,33	-0,2	0,69	+2,5	1,26	-3,6	+6,3
P4	+0,8	1,50	-0,4	1,38	+2,1	1,24	-7,0	+7,9

Auch bei den Dampfdruckdifferenzen sind teilweise sehr hohe absolute Extremwerte nachweisbar (Tab. 2). Die Mittelwerte der zehn extremsten Stundenwerte liegen zwischen $-7,0$ und $-3,6$ hPa (Minima) bzw. zwischen $+2,2$ und $+7,9$ hPa (Maxima). Die Minima der Phase P4 treten ausschließlich bei hohen Lufttemperaturen ($T_E \approx 30$ °C) und sehr hohen Pflanzenbeständen ($h_B \approx 2,0$ m) auf.

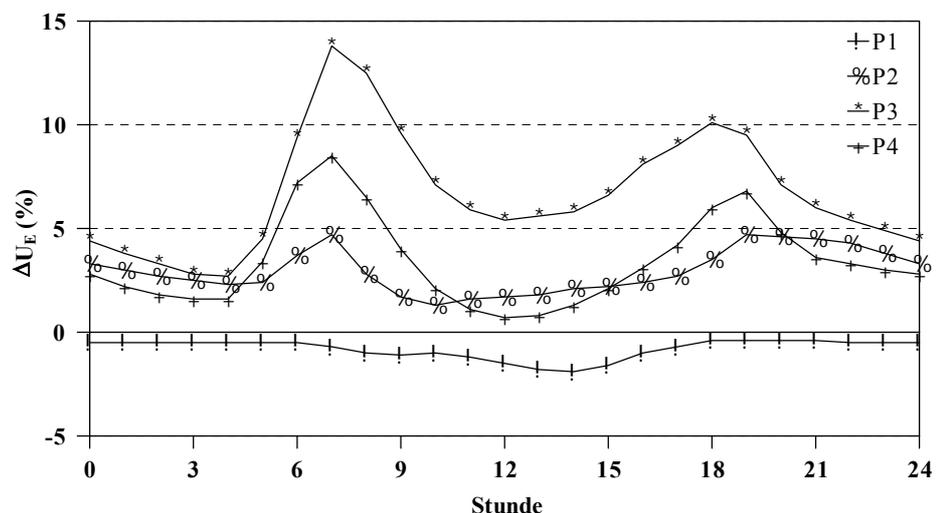
Differenzen der relativen Luftfeuchte

Im Bereich der Landwirtschaft wird häufig die relative Luftfeuchte als Feuchtigkeitsmaß verwendet. Abb. 5 zeigt für die vier Entwicklungsphasen den Verlauf der Differenzen der relativen Luftfeuchte zwischen Winterroggen-Bestand und vegetationsloser Basisstation.

Die Abbildung zeigt eine Zweiteilung: Unwesentliche Differenzen existieren in der Blattentwicklungs- und Bestockungsphase (P1).

Abb. 5:

Mittlere Differenzen der relativen Luftfeuchte (ΔU_E) zwischen Winterroggen-Bestand und Basisstation in den verschiedenen Entwicklungsphasen (P1 bis P4), Berlin-Dahlem, 1981 bis 1999



Beginnend mit der Schoss- und Ährenschnellphase (P2) zeichnet sich ein deutlicher Tagesgang der Differenzen der relativen Luftfeuchte ab.

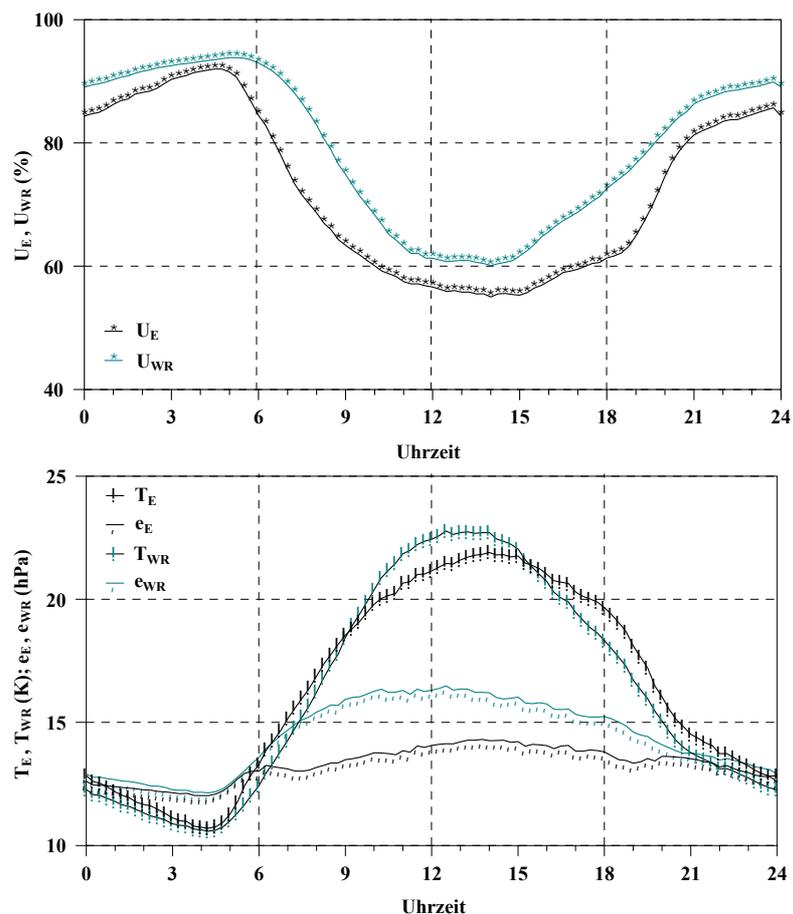
Nach einem geringfügig feuchteren Pflanzenbestand in den Nachtstunden, entwickelt sich in den *frühen Morgenstunden*, unmittelbar nach Sonnenaufgang ein deutliches Maximum der Differenzen. Dessen Ursache sind die bereits beschriebenen unterschiedlichen Einstrahlungsverhältnisse bei geringem Einfallswinkel der Sonnenstrah-

len. Die sich stetig erwärmende Luft der vegetationslosen Basisstation kann zunehmend mehr Feuchtigkeit aufnehmen. Bei annähernd gleich bleibendem Dampfdruck sinkt die relative Luftfeuchte der Basisstation. Der Winterroggen-Bestand erwärmt sich dagegen deutlich langsamer, da es den Sonnenstrahlen zunächst nicht gelingt, in den Pflanzenbestand einzudringen. Gleichzeitig beginnt eine verstärkte Transpiration der Pflanzen, die den Dampfdruck im Bestand erhöht. Beides führt zu einer langsameren Abnahme der relativen Luftfeuchte im Winterroggen-Bestand – und damit zur Vergrößerung der Differenzen der relativen Luftfeuchte zur vegetationslosen Basisstation. Das Maximum der Differenzen wird etwa drei Stunden nach Sonnenaufgang erreicht.

Ähnliche Prozesse vollziehen sich in den *späten Abendstunden*. Während bei geringem Einstrahlungswinkel die vegetationslose Basisstation noch von den Sonnenstrahlen erreicht wird und damit die Verringerung der Lufttemperatur mindert, erfolgt die ungehinderte Abkühlung des Winterroggen-Bestandes. Die relative Luftfeuchte des Pflanzenbestandes steigt erheblich schneller als diejenige der vegetationslosen Basisstation. Im Gegensatz zu den Morgenstunden führt die Abnahme der Transpiration der Pflanzen zu einer Verringerung des Dampfdruckes innerhalb des Bestandes. Dadurch werden die Differenzen der relativen Luftfeuchte zwischen Winterroggen-Bestand und vegetationsloser Basisstation abgeschwächt.

Abb. 6:

Langjährige Stundenmittel der relativen Luftfeuchte (U_E , U_{WR}), der Lufttemperatur (T_E , T_{WR}) und des Dampfdruck (e_E , e_{WR}) der vegetationslosen Basisstation (E) sowie des Winterroggen-Bestandes (WR), Berlin-Dahlem, 1981 bis 1999, 25. – 29. Mai (Phase P3)



In den *Mittagsstunden* sorgt die deutlich höhere Lufttemperatur innerhalb des Winterroggen-Bestandes für dessen größere Wasserdampf-Aufnahmefähigkeit. Das führt – trotz höherem Dampfdruck im Bestand – zu einem Minimum der Differenzen der relativen Luftfeuchte. In der 2. Hälfte der Kornfüllungs- und Reifephase (P4) werden im

Zeit-Intervall zwischen 10 und 14 Uhr – selbst im langjährigen Mittel – geringere Werte der relativen Luftfeuchte im Pflanzenbestand nachgewiesen.

Abb. 6 zeigt anhand konkreter Messergebnisse die Zusammenhänge zwischen Lufttemperatur, Dampfdruck und relativer Luftfeuchte im Winterroggen-Bestand und an der vegetationslosen Basisstation. Der Darstellung liegen die 15-minütigen Mittelwerte des 25. bis 29. Mai der Jahre 1981 bis 1990 und 1993 bis 1999 zu Grunde. In allen Jahren lag dieser Zeitraum in der Blütenanlage- und Blühphase (P3).

4. Schlussfolgerungen

Das Mikroklima eines Winterroggen-Bestandes unterscheidet sich deutlich von dem einer vegetationslosen Basisstation. Die Temperatur- und Dampfdruckdifferenzen zwischen beiden Flächen werden sowohl vom Entwicklungsstand der Pflanzen als auch von der Tageszeit beeinflusst. Die Einflüsse sind derart markant, dass eine eingehende Analyse des Mikroklimas die Unterteilung der Vegetationszeit in mehrere Entwicklungsphasen erforderlich macht. Eine an der Entwicklung der Pflanzen orientierte Einteilung ist hierbei zu empfehlen.

Neben den beiden genannten Faktoren bestimmen meteorologische und pflanzenmorphologische Bedingungen das Mikroklima eines Pflanzenbestandes. Als wesentliche Einflussgrößen müssen die Globalstrahlung und der Blattflächenindex sowie die Evapotranspiration des Pflanzenbestandes gelten. Andere Größen, wie Lufttemperatur und -feuchte, Windgeschwindigkeit, Bestandeshöhe, Bodenfeuchte, Bodentemperatur, usw. müssen in die Analysen mit einbezogen werden; sie besitzen jedoch nicht die Bedeutung der erstgenannten. Weiter gehende Untersuchungen sind zu empfehlen.

Literatur:

- Chmielewski, F.-M.; Köhn, W. (1999): The long-term agrometeorological field experiment at Berlin-Dahlem, Germany. *Agricultural and Forest Meteorology* 96 (1999) 39-48.
- Hack, H.; Bleiholder, H.; Feller, C.; Hess, M.; Meier, U.; van den Boom, T.; Lancashire, P.D.; Buhr, L. Klose, R.; Stauss, R.; Weber, E.; Munger, P. (1992): *Kompendium der phänologischen Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen. Erweiterte BBCH-Skala. 2. Auflage, elektronische Version bearbeitet von M. Enz und Ch. Dachler, Novartis.*
- Krüger, S. (1996): *Simulationsrechnungen mit den Bodenfeuchte- und Pflanzenertragsmodell SIMWASER am Versuchsstandort Berlin-Dahlem, Diplomarbeit Humboldt-Uni. Berlin, 52 S.*
- Rasch, D.; Guiard, V.; Nürnberg, G. (1992): *Statistische Versuchsplanung. Einführung in die Methoden und Anwendung des Dialogsystems CADEMO. Fischer-Verlag Stuttgart.*
- Stenitzer, E. (1988): *SIMWASER. Ein numerisches Modell zur Simulation des Bodenwasserhaushalts und des Pflanzenertrages eines Standortes. Mitteilungen Bundesanstalt f. Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, 31, Petzenkirchen, 1988, 203 S.*
- Tafeln, (1976): *Aspirations-Psychrometertafeln. Ausgabe 1976. Verlag Vieweg & Sohn*
- Uhlmann, H. (1993): *Verifikation des Bodenfeuchte- und Pflanzenertragsmodells SIMWASER. Diplomarbeit Humboldt-Uni. Berlin, 73 S.*

- Heft 01/1998** Gebiete der Angewandten Meteorologie
F.-M. Chmielewski
- Heft 02/1998** Mögliche Auswirkungen einer globalen Klimaänderung
auf die Land- und Forstwirtschaft
G. Hörmann und F.-M. Chmielewski
- Heft 03/1998** The agrometeorological field experiment at Berlin-
Dahlem, a description of a long-term field experiment
F.-M. Chmielewski and W. Köhn
- Heft 04/1998** The impact of weather on the yield formation of spring
cereals
F.-M. Chmielewski and W. Köhn
- Heft 05/1999** Impact of weather on yield components of winter rye over
30 years
F.-M. Chmielewski and W. Köhn
- Heft 06/2000** Phenological maps for Europe
T. Rötzer and F.-M. Chmielewski
- Heft 07/2000** Phenological trends in Europe in relation to climatic chan-
ges
F.-M. Chmielewski and T. Rötzer
- Heft 08/2000** Annual and spatial variability of the beginning of growing
season in Europe in relation to air temperature changes
F.-M. Chmielewski and T. Rötzer
- Heft 09/2000** Rezente Veränderungen der Lufttemperatur und der Nie-
derschlagshöhe in Berlin-Dahlem (Albrecht-Thaer-Weg)
F.-M. Chmielewski
- Heft 10/2002** Climate changes and trends in phenology of fruit trees
and field crops in Germany, 1961-2000
F.-M. Chmielewski, A. Müller and E. Bruns