

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Pflanzenzüchtung

Sonnenlicht-induzierte Chlorophyll-Fluoreszenz im Tagesgang in Nutzpflanzenbeständen

Claudia Idelberger

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr. G. Wenzel (i.R.)

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. U. Schmidhalter

2. Univ.-Prof. Dr. K.-J. Hülsbergen

Die Dissertation wurde am 18.08.2010 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 21.02.2011 angenommen.

Dilige et quod vis fac.
– Liebe und tue, was du willst.

Augustinus von Hippo
(354-430)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Photosynthese	1
1.2	Fluoreszenz	10
1.3	Weitere in dieser Arbeit verwendete Vegetationsindizes	20
1.4	Ziele dieser Arbeit	26
2	Material und Methoden	28
2.1	Geräte	28
2.1.1	Spektroradiometer	28
2.1.2	LI-COR 6400	35
2.1.3	SPAD-Meter	39
2.1.4	LAI-2000 Bestandesanalysator	39
2.1.5	Abgewandelte und zusammengesetzte Vegetationsindizes	40
2.2	Pflanzenmaterial	42
2.2.1	Methodische Versuche	43
2.2.2	Stickstoffsteigerungsversuche	44
2.2.2.1	N-Steigerungs- und Sortenversuch im Winterweizen	44
2.2.2.2	<i>Solanum tuberosum</i> L. cv. 'Selma'	44
2.2.3	Versuche zur Krankheitsfrüherkennung	45
2.2.3.1	Aufgetretene Krankheiten	45
2.2.3.2	Eingesetzte Fungizide	46
2.2.3.3	Untersuchte Gerstenbestände	48
2.2.4	Wasserstreißversuche	51
2.2.4.1	Versuche zu den Primärfolgen unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit	52
2.2.4.2	Versuche zu den Sekundärfolgen von Wassermangel	54
2.2.5	Multivariater Versuch	55
2.3	Analysen	58
2.3.1	Photosynthesepigmente	58
2.3.2	Bestimmung des Gesamtstickstoffgehalts nach Kjeldahl	60
2.4	Weitere Bestandenserhebungen	60
2.5	Witterung	62
2.6	Auswertung der Ergebnisse	64
3	Ergebnisse	66
3.1	Versuchsdurchführung	66

3.1.1	Methodische Versuche	66
3.1.1.1	Abdunklungsversuche	66
3.1.1.2	Wolkendurchzugsfelder	67
3.1.2	Tagesgänge	68
3.2	Ergebnisse der Versuchsdurchführung	69
3.2.1	Methodische Versuche	69
3.2.1.1	Abdunklungsversuche	69
3.2.1.2	Wolkendurchzugsfelder	76
3.2.2	Ein repräsentativer Tagesgang	83
3.3	Stickstoffsteigerungsversuche	96
3.3.1	<i>Triticum aestivum</i> L.	96
3.3.2	<i>Solanum tuberosum</i> L. cv. 'Selma'	100
3.4	Versuche zur Krankheitsfrüherkennung	115
3.4.1	<i>Hordeum vulgare</i> L. 'Duet'	115
3.4.2	<i>Hordeum vulgare</i> L. 'Duet' im Timingversuch	128
3.5	Wasserstreißversuche	145
3.5.1	Primärfolgen unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit	145
3.5.2	Sekundärfolgen von Wassermangel	168
3.6	<i>Solanum tuberosum</i> L. cv 'Edelstein' im multivariaten Versuch	185
4	Diskussion	200
5	Zusammenfassung	238
6	Summary	240
7	Literaturverzeichnis	242
8	Anhang	
	Selbständigkeitserklärung	
	Persönliche Danksagung	
	Lebenslauf	

Abkürzungsverzeichnis

aPAR	-	Absorbed Photosynthetically Active Radiation
AVIRIS	-	Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer
BFI	-	Blattflächenindex
CASI	-	Compact Airborne Spectrographic Image
CF	-	Sonnenlicht-induzierte Chlorophyll-Fluoreszenz
Chl a	-	Chlorophyll a
Chl a+b	-	Chlorophyll a+b
Chl b	-	Chlorophyll b
Chl _{Gesamt}	-	Chlorophyllgesamtgehalt
FQA	-	Fluoreszenzquantenausbeute
GNDVI	-	Green Normalized Difference Vegetation Index
FS	-	Frischsubstanz
IR	-	Infrarot
LAI	-	Leaf Area Index
LFM	-	Leaf Fuel Mass
LHCP	-	Light Harvesting Chlorophyll Protein
M _F	-	Frischmasse
M _T	-	Trockenmasse
MERIS	-	Medium Resolution Imaging Spectrometer
NIR	-	Nahinfrarot
PAM	-	Pulse Amplitude Modulated
PAR	-	Photosynthetically Active Radiation
PAR _{außen}	-	Photosynthetisch aktive Strahlung, mit dem Quantumsensor des LI-COR 6400 gemessen
PAR _{innen}	-	Photosynthetisch aktive Strahlung, innerhalb der Blatkammer des LI-COR 6400 gemessen
PE	-	Photosyntheseeffizienz
PPFD	-	Photosynthetically Active Photon Flux Density
PHS	-	Photosyntheserate
PRI	-	Photochemical Reflectance Index
PSI	-	Photosystem I
PSII	-	Photosystem II
R	-	Reflexion
REIP	-	Red Edge Inflection Point

RVI	-	Ratio Vegetation Index
TKG	-	Tausendkorngewicht
TS	-	Trockensubstanz
u.U.	-	unter Umständen
v.a.	-	vor allem
VIR	-	Spektralbereich des sichtbaren Infrarotsbereichs
W	-	Wassergehalt (%)
WG	-	Wintergerste
WW	-	Winterweizen
z.B.	-	zum Beispiel

1 Einleitung

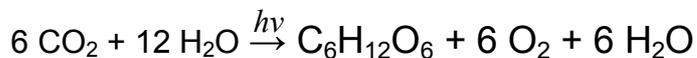
Ob ein Pflanzenbestand einen qualitativ und quantitativ hochwertigen Ertrag erbringt, hängt in hohem Maße von seiner Nettophotosynthese ab (BASSHAM, 1977; ZELITCH, 1982). Dabei sollte eine Kulturführung die Minimierung sämtlicher biotischer und abiotischer Streßfaktoren zum Ziel haben, um die Photosyntheseeffizienz eines Bestandes zu optimieren. Werden bei einem Pflanzenbestand Stressoren wie ungenügendes Nährstoffangebot, Krankheitsdruck oder Wassermangel nicht frühzeitig erkannt und behoben, können z.T. irreparable Schäden entstehen, die sich auf den Ertrag auswirken. Deswegen ist die Entwicklung von Methoden wichtig, um den Pflanzenbestand mit dem Ziel einer optimalen Versorgung zum richtigen Zeitpunkt entsprechend beobachten zu können (BLACKMER und WHITE, 1998). Dies hätte vor allem ökologische und damit ökonomische Auswirkungen, denn z.B. eine zum optimalen Zeitpunkt ausgebrachte, dafür aber geringere Düngermenge würde das Grundwasser weniger belasten. Genauso könnten die Mengen applizierter Pflanzenschutzmittel – frühzeitig und gezielt eingesetzt – reduziert werden. Zu diesem Zweck ist eine Diagnosetechnik nötig, die vor allem für große Flächen innerhalb von kürzester Zeit Echtzeitdaten liefert, aus denen die jeweilige empfohlene Kulturmaßnahme abgeleitet werden kann. Die Möglichkeit zur berührungslosen und zerstörungsfreien Bestimmung von konstanten Parametern wie z.B. Biomasse und N-Aufnahme bietet bereits seit einigen Jahren das Precision Farming.

Die vorliegende Arbeit beschäftigte sich vor allem deswegen mit variablen Parametern wie die Photosynthese, mit dem Ziel, anhand von spektrometrischen Methoden unter Einbeziehung von variablen und nichtvariablen Faktoren den aktuellen Photosynthesestatus von Nutzpflanzenbeständen zu erfassen. Die Photosynthese sollte auf kleinräumigen Flächen in vergleichenden Versuchen unter verschiedenen Streßfaktoren erfaßt werden. Dabei wurden, soweit möglich, Parallelmessungen von physiologischen Parametern und spektrometrischen Daten gemacht. Das Hauptaugenmerk war dabei auf das Zusammenspiel von Photosyntheserate und sonnenlicht-induzierter Chlorophyll-Fluoreszenz gerichtet.

1.1 Photosynthese

Die Photosynthese ist der lebensspendende Grundprozeß zur Umwandlung von Sonnenenergie in chemische Energie (MAYER, 1845) in den Chloroplasten (ARNON *et al.*, 1954) der grünen Pflanzen und Algen. Sie unterteilt sich in die zwei Prozesse der temperaturunabhängigen, aber lichtabhängigen Lichtreaktion und der temperaturabhängigen, aber lichtunabhängigen Dunkelreaktion (BLACKMAN und MATTHAEI, 1905; WARBURG, 1920).

Bei der Lichtreaktion (Primärreaktion) in den Photosystemen I und II (EMERSON *et al.*, 1957) wird durch die Absorption von photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR) Kohlenstoffdioxid unter der Photolyse von H₂O fixiert. Aus diesem Prozeß wiederum stammt der freigesetzte Sauerstoff (HILL, 1937; RUBEN *et al.*, 1941). In der Dunkelreaktion (Sekundärreaktion) werden das in der Lichtreaktion gewonnene Kohlenstoffdioxid und der aus der Photolyse gewonnene Wasserstoff mittels des Calvin-Cyclus zu Kohlehydraten, z.B. Glucose, aufgebaut (CALVIN und BENSON, 1948; BASSHAM *et al.*, 1950). Die Bruttoreaktionsgleichung der Photosynthese stellt sich folgendermaßen dar (basierend auf den Entdeckungen von SACHS, 1865):



Bei der Atmung als Umkehrreaktion der Photosynthese wird O₂ verbraucht und CO₂ freigesetzt.

Wie effizient ein Pflanzenbestand Photosynthese betreibt, und infolgedessen wie hoch der Ertrag ausfällt, hängt von den auf ihn einwirkenden biotischen und abiotischen Faktoren ab. Nach dem „Wirkungsgesetz der Wachstumsfaktoren“ kann „jeder einzelne Wachstumsfaktor mit einer ihm spezifischen Intensität die Ertragshöhe steigern“ (MITSCHERLICH, 1909). Laut BLACKMAN (1905) wird der Photosyntheseprozess bezüglich seiner Geschwindigkeit von einer Anzahl von separaten Faktoren modifiziert, wobei der Photosyntheseumsatz von der Geschwindigkeit des langsamsten Faktors limitiert wird. Dies ist aber nur in Grenzsituationen der Fall, wenn dieser Faktor nahe Null ist. Die Photosyntheserate wird sowohl von dem limitierenden Faktor und weiteren Faktoren zusammen modifiziert (HARDER, 1921). Tritt bei dem limitierenden Faktor (z.B. Licht) die Sättigung ein, wird ein anderer Faktor (z.B. CO₂) limitierend an seiner statt. Da aber

viele Faktoren auf die Photosynthese einwirken, wirken alle in ihrer Summe limitierend auf sie. Daraus folgt aber auch, daß die Photosynthese von mehreren Faktoren gefördert werden kann, die z.T. gleichgerichtet oder auch entgegengesetzt wirken können. Es handelt sich hier also um ein hochkomplexes, multifaktorielles Zusammenspiel, das quantitativ nur sehr schwer erfaßt werden kann. Im Folgenden werden die wichtigsten Einzelfaktoren separat und zusammen mit anderen Faktoren betrachtet. Bei der Steigerung eines Faktors gegenüber den gleichbleibenden anderen Faktoren gibt es generell verschiedene punktuelle Stadien der Photosyntheserate, die nachfolgend am Beispiel des Faktors Einstrahlung beschrieben werden:

Sonneneinstrahlung

Licht ist bei sonst optimalen Bedingungen der Hauptfaktor für die Photosyntheseintensität. Es kann unter drei Gesichtspunkten betrachtet werden: Intensität, Qualität und Belichtungsdauer.

Bei zu geringen Einstrahlungsstärken atmet die Pflanze. Die Intensität der Atmung nimmt mit zunehmender Einstrahlung bis zum Lichtkompensationspunkt (EGLE und SCHENK, 1953) ab, bei dem sich Atmung und Photosynthese kompensieren, also „kein Gasaustausch stattfindet“ (PLAETZER, 1917). Der Lichtkompensationspunkt kann durch steigende Temperaturen oder CO₂-Konzentrationen abgesenkt werden. Bei LIETH (1960) wurde der Lichtkompensationspunkt bei Temperaturen oberhalb von 20 °C durch zunehmende Temperaturen gesteigert. Die Photosyntheserate nimmt dann mit weiter wachsender Einstrahlung bis zum Lichtsättigungspunkt zu (REINKE, 1883; BLACKMAN, 1905), und zwar umso stärker, je näher das Licht dem Minimum ist (HARDER, 1921). Der Lichtsättigungspunkt kann je nach klimatischen Bedingungen, Spezies und unterschiedlichen Lichanpassungsmerkmalen variieren (GAASTRA, 1963). Wird die Lichtintensität über den Lichtsättigungspunkt hinaus gesteigert, so erhöht sich auch die Photosyntheserate nicht weiter.

Bei noch höheren Lichtintensitäten nimmt die Photosyntheseaktivität bis hin zur Photoinhibition ab (EWART, 1896; POWLES, 1984), von welcher vor allem das Photosystem II betroffen ist (KRAUSE, 1988). Die Abnahme der Photosynthese bei überschüssiger PAR wurde darüber hinaus wiederholt in Freilandversuchen gemessen (z.B. von MOHOTTI und LAWLOR, 2002).

Bei zu hohen Strahlungsintensitäten werden viele verschiedene Photoprotektionsmechanismen eingeleitet, z.B.: Die Blätter werden so abgewandt, daß die Blattfläche längs zur Einstrahlungsrichtung der Sonne steht. Die Chloroplasten bewegen sich bei steigenden Einstrahlungsstärken zu den Zellwänden hin, um sich dort untereinanderzuschieben. Nicht nur dieses Verhalten, sondern auch die Umformung der Chloroplasten kann einen Einfluß auf die Lichtausbeute der Photosynthese haben (BRUGNOLI und BJÖRKMANN, 1992). Auf physiologischer Ebene sind die Abgabe von überschüssiger Energie in Form von Wärme, die Emission von Fluoreszenzlicht und der Xanthophyllzyklus die bekanntesten Photoprotektionsmechanismen.

Bei relativ geringen Strahlungsintensitäten von $800 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ werden ca. 10 bis 50 % der eingestrahlten Sonnenenergie für die Photosynthese genutzt, im vollen Sonnenlicht ($2.000 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$) sind es sogar noch weniger (KEBABIAN *et al.*, 1999). Die von den Pflanzen absorbierte photosynthetisch aktive Strahlung (aPAR) liegt im Wellenlängenbereich von ca. 380 bis 750 nm des sichtbaren Spektrums, wobei hauptsächlich die Wellenlängen im blauen sowie im roten Spektralbereich absorbiert werden (ENGELMANN, 1883). Im grünen Bereich hingegen findet keine Absorption, sondern eine Streuung des grünen Lichts statt, was die Pflanzen grün erscheinen läßt. Die gleichzeitige Einstrahlung von zwei unterschiedlichen Wellenlängen im sichtbaren Bereich mit z.B. $\lambda \leq 680 \text{ nm}$ und $\lambda \leq 700$ bzw. 710 nm kann die Photosyntheserate sehr steigern (EMERSON *et al.*, 1957).

Die spektrale Zusammensetzung des Lichts wie auch die Lichtintensität können durch Sonnenstand, Bewölkungsgrad, Pflanzenstandort, Bestandesstruktur, Pflanzenart usw. modifiziert werden. Die Belichtungsdauer hat normalerweise keinen Einfluß auf die Photosyntheserate (BLACKMAN, 1905), wohl aber insgesamt auf den Ertrag eines Pflanzenbestandes. Steigende Einstrahlungsstärken bewirken ein Öffnen der Stomata, wie z.B. von WILSON (1947) bei *Camellia japonica* L. und *Liguster japonica* Thunb. beobachtet. Die Einstrahlungsstärke beeinflußt somit den Öffnungsgrad der Stomata, wobei das Öffnen schneller zwischen 3 und 20 min und das Schließen langsamer zwischen 12 und 36 min dauern kann (WOODS und TURNER, 1971).

Temperatur

Neben dem Lichtfaktor ist die Photosynthese eng mit dem Temperaturfaktor verknüpft (Abb. 1): Die Temperaturminima (T_{\min}) von Photosynthese und Atmung liegen nahe beieinander. Die Nettphotosyntheserate (graue Fläche) ist die Differenz von Bruttphotosynthese minus des Energieverbrauchs durch die Atmung und nimmt mit steigender Temperatur bis zum Temperaturoptimum (T_{opt}) zu. Dieses liegt je nach Pflanzenart und Anpassung zwischen 15 bis 25 °C. Oberhalb von 30 bis 35 °C nimmt die CO_2 -Assimilation rasch ab, bis sie an dem Punkt (T_{max}) zum Erliegen kommt, an dem sich Bruttphotosynthese und Atmung kompensieren und ihre Differenz 0 ergibt. Dieses Temperaturmaximum der Nettphotosynthese bzw. der Hitzekompensationspunkt (T_{max}) liegt bei den meisten Pflanzenarten bei ca. 40 °C. Bei weiter steigenden Temperaturen geht auch die Bruttphotosynthese gegen 0 und die Atmung erlangt ihr Optimum (T'_{opt}). Bei noch höheren Temperaturen kommt auch die Atmung ebenso bei ihrer Maximaltemperatur (T'_{max}), bei ca. 50 °C je nach Pflanzenart, zum Erliegen.

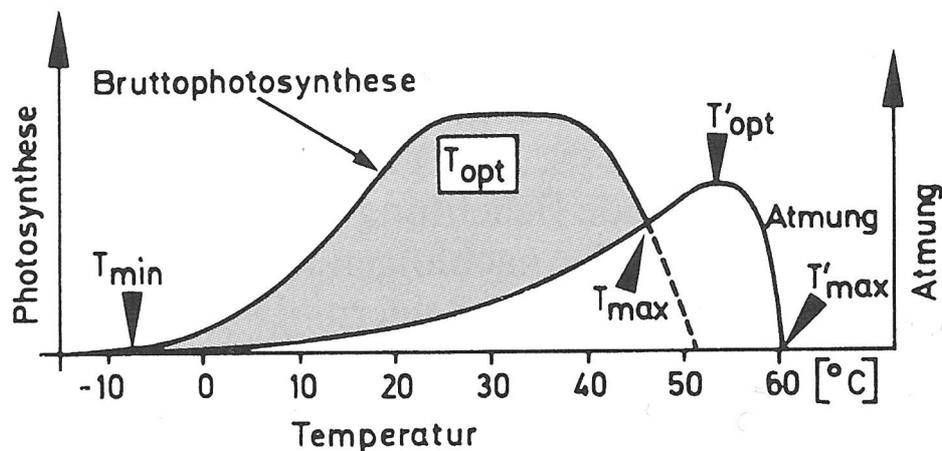


Abbildung 1. Schematische Darstellung der Temperaturabhängigkeit von Atmung und Photosynthese aus STRASBURGER *et al.* (1998), verändert nach LARCHER (1980). Nettphotosynthese = grauer Bereich. T_{max} = Temperaturmaximum; T_{opt} = Temperaturoptimum; T_{\min} = Temperaturminimum

In Kombination mit schwachem Licht liegt das Temperaturoptimum bei 10 °C, bei Volllicht bei 15 bis 20 °C. Bei niedrigen Lichtintensitäten verändert sich die Photosyntheserate kaum mit der Temperatur (BLACKMAN, 1905), während die Photosyntheserate bei hohen Lichtintensitäten mit steigenden Temperaturen zunimmt (BLACKMAN, 1905; WARBURG, 1920). Der Temperaturfaktor beeinflusst vor allem auch die enzymatischen Prozesse der Photosynthese, sofern deren Beschleunigung temperaturabhängig ist. Die Photosynthese ist als einer der

temperaturempfindlichsten Prozesse bekannt und kann komplett durch den Temperaturfaktor inhibiert werden, lange vor der Detektion anderer Streßfaktoren (BERRY und BJÖRKMANN, 1980).

Mit steigenden Temperaturen öffnen sich die Stomata (SCARTH, 1932; WILSON, 1947). Stark steigende bzw. hohe Temperaturen bewirken ein Schließen der Stomata (HEATH und ORCHARD, 1957), wodurch wiederum die Photosynthese gedrosselt wird. Bei sehr hohen Temperaturen und Einstrahlungsstärken, die vor allem während der Mittagszeit auftreten, tritt das Phänomen des sogenannten Mittagshitzestreßes auf, bei dem sich die Photosyntheserate eines Pflanzenbestandes so stark vermindert, daß auch Negativwerte auftreten können (TENHUNEN *et al.*, 1984, 1985 und 1990; FILELLA *et al.*, 1996; MOHOTTI und LAWLOR, 2002; OGAYA und PEÑUELAS, 2003). Bei zu hohen Temperaturen kann es sogar zur irreversiblen Schädigung des Photosyntheseapparates kommen (RABINOWITCH, 1956).

Die Blatttemperatur ist zwar mit Meßgeräten erfaßbar, aber nicht direkt berechenbar. Sie wird von vielen externen und v.a. internen Faktoren in komplexer Art beeinflusst, z.B. durch Streß im Wasserhaushalt, die Sonneneinstrahlung und die Lufttemperatur (WIEGAND und NAMKEN, 1966): Eine stärkere Sonneneinstrahlung ließ die Blatttemperatur von Baumwollblättern ansteigen; ein sinkender Turgor hatte eine wachsende Blatttemperatur zur Folge. Aber auch der CO₂-Gehalt der Luft spielt eine Rolle (HASHIMOTO *et al.*, 2006): Ein höherer CO₂-Gehalt der Luft hatte bei verschiedenen Mutanten von *Arabidopsis* steigende Blatttemperaturen und diese wiederum ein Schließen der Stomata zur Folge. Bei IDSO *et al.* (1995) war die Nettphotosyntheserate bei extrem hohen Temperaturen mit der Blatttemperatur zu 73 % invers korreliert, wobei eine Erhöhung des CO₂-Gehalts der Luft die Photosyntheserate zu steigern vermochte, deren Maximaltemperatur dann weitaus höher lag als bei einem normalen CO₂-Gehalt. Inwieweit physiologische Faktoren wie die Wärmeabgabe des PSII, der Xanthophyllzyklus und andere Prozesse die Blatttemperatur beeinflussen, kann nur vermutet werden.

Kohlenstoffdioxid

Als weiteren Wachstumsfaktor sind die Landpflanzen vor allem auf das atmosphärische CO₂ angewiesen: Der CO₂-Gehalt liegt in bodennahen Schichten bei ca. 0,03 Vol-% und ändert sich unter natürlichen Bedingungen kaum. Eine steigende CO₂-Konzentration läßt die Photosyntheserate bis zum CO₂-Sättigungspunkt

anwachsen. Der CO₂-Sättigungspunkt wird normalerweise *in situ* nicht erreicht (HOUGH und WETZEL, 1978). Daraus leitet sich ab, daß die CO₂-Konzentration bei sonst optimalen Wachstumsbedingungen unter natürlichen Bedingungen der limitierende Faktor ist. Bei weiter steigenden CO₂-Konzentrationen steigt die Photosyntheserate nicht weiter an, sondern nimmt sogar bei zu hohen Konzentrationen wieder ab.

Wasser

Die Wasserverfügbarkeit ist ein weiterer limitierender Faktor für die Photosynthese und damit für die Produktivität der Pflanzen (BOYER, 1982; TEZARA *et al.*, 1999). Wasser hat vielseitige, v.a. metabolische Aufgaben in einer Pflanze: die Stoffaufnahme und den -transport, die Mitwirkung bei vielfältigen Stoffwechselprozessen, die Aufrechterhaltung des Transpirationsstroms und des Zellurgors sowie die Einstellung des pH-Wertes in den Zellkompartimenten, als Elektronendonator in der Photosynthese und viele weitere. Der Wasseranteil in der Frischmasse eines Blattes liegt zwischen 80% und 95%, je nach Pflanzenart.

Für Wassermangel sind der Verlust an Wassergehalt, vermindertes Wasserpotential in den Blättern und Turgorverlust, Stomataschluß und die Verminderung von Zellvergrößerung und Zellwachstum charakteristisch (JALEEL *et al.*, 2009). Der Stomataschluß wird durch erhöhte Temperaturen und Einstrahlungsstärken verstärkt. Die Photosynthese nimmt ab, wenn Pflanzen an Wassermangel leiden, was sowohl vom Schließen der Stomata und die dadurch verminderte CO₂-Aufnahme als auch von einer geringeren Aktivität der Chloroplasten herrührt (CHAVES, 1991). Die Resistenz gegen Wasserstreß mit Effekt auf stomatäre Leitfähigkeit und Nettophotosyntheserate kann sortenabhängig sein (JOHNSON *et al.*, 1987; INOUE *et al.*, 2004).

In dieser Arbeit wird zwischen Primär- und Sekundärfolgen von Wassermangel unterschieden. Die Primärfolgen von Wassermangel stellen sich folgendermaßen dar: Bei mildem Wasserstreß wird die Photosynthese aufgrund des Stomataschlusses gedrosselt, wobei keine Indikation für die Schädigung des Photosyntheseapparates vorliegt (SHARKEY und SEEMANN, 1989). Stärkerer Wassermangel kann zu einem Zusammenbruch des Stoffwechsels und der Zellstruktur sowie zu einem Erlöschen der enzymatisch katalysierten Prozesse führen (SMIRNOFF, 1993). Er verursacht eine Reduktion des Wassergehalts, ein geringeres Blattwasserpotential sowie

Turgorverlust, Stomataschluß, und eine Verringerung der Vergrößerung und des Wachstums der Zellen (JALEEL *et al.*, 2009). Visuelle Symptome sind ein Aufrollen der Blätter bei Grasarten bzw. ein Hängen der Blätter bei Dicotyledonen durch den Turgorverlust.

Wassermangel kann aber auch den Chlorophyllgehalt reduzieren als auch das Verhältnis von Chlorophyll a zu Chlorophyll b verändern (FAROOQ *et al.*, 2009). Andauernder Wassermangel führt zu einer verschlechterten Stickstoffversorgung der Pflanze. Dabei gibt es zwei Prozesse: Zum einen die NH_3 -Verluste von wassergestreßten Pflanzen und zum anderen die durch den Wassermangel verminderte Stickstoffassimilation, die zu einer verminderten Photosynthesekapazität führt (HECKATHORN und DELUCIA, 1995; HECKATHORN *et al.*, 1997). Durch eine geringere Photosyntheserate werden vermindert organische Verbindungen aufgebaut, wodurch die Primärproduktion grundsätzlich absinkt und die Vitalität des Pflanzenbestandes leidet. Die visuellen Symptome der Sekundärfolgen von Wassermangel sind durch einen durch mangelhafte Stickstoffversorgung hervorgerufenen geringeren Chlorophyllgehalt eine heller grüne Farbe, und geringeres Zellwachstum bzw. -vergrößerung eine verminderte Wüchsigkeit in Höhe und in Blattmasse (JALEEL *et al.*, 2009).

Nährstoffe

Alle Zellstrukturen bestehen vorrangig aus den Elementen Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Schwefel. Ein Fehlen oder Mangeln an bestimmten Nährelementen führt zwangsläufig zu Ernährungs- und Wachstumsstörungen bzw. zu einer gestörten Stoffsynthese, die sich in genau definierbaren Symptomen äußern, z.B. Blattverfärbungen oder gestauchtes Wachstum. Nach dem „Gesetz des Minimums“ (SPRENGEL, 1828; Popularisierung durch von LIEBIG, 1855) wirkt der in geringster Ausprägung vorhandene Nährstofffaktor limitierend auf das Pflanzenwachstum. Neben den in der Luft verfügbaren Makronährelementen Kohlenstoff, Sauerstoff, und Wasserstoff ist Stickstoff, der meist als Nitrat, seltener als NH_4^+ oder N_2 aufgenommen wird, essentiell für den Aufbau der Nuclein- und Aminosäuren, Coenzyme und Proteine. In einer grünen Pflanze befindet sich etwa die Hälfte des Gesamtstickstoffs und etwa 70 % des Blattstickstoffs in den Chloroplasten. Nach MOHOTTI und LAWLOR (2002) verursacht eine verminderte Stickstoffdüngung einen geringeren Stickstoffgehalt der

Blätter und eine insignifikant geringere Photosyntheserate. Ein vermindertes Stickstoffangebot führt zu einer Intensitätsverminderung von Stoffwechselprozessen, wobei es teilweise zu einer Umverlagerung des in der Pflanze vorhandenen Stickstoffs zu prioritär versorgten Umsatzorten und -strukturen kommt (HECKATHORN und DELUCIA, 1995). Bei CHENG *et al.* (2001) hatte der unterschiedliche Stickstoffgehalt keinerlei Einfluß auf die Korrelation zwischen der Effizienz des Photosystems II und der Lichtquantenausbeute für die CO₂-Assimilation; dafür war die CO₂-Assimilation in Apfelblättern mit einem niedrigeren Stickstoffgehalt geringer als bei Blättern mit einem höheren Stickstoffgehalt (CHENG *et al.*, 2001).

Chlorophyllgehalt

Die Photosyntheserate war bei EMERSON (1929) bei hohen Lichtintensitäten mit dem Chlorophyllgehalt der Zellen korreliert. EMERSON und ARNOLD (1932) konnten eine lineare Korrelation zwischen dem Chlorophyllgehalt und der Maximumphotosyntheserate bei einer Anzahl von Zellproben mit unterschiedlichen Chlorophyllgehalten entdecken. Sie fanden außerdem in derselben Versuchsreihe, daß mehrere Hundert Chlorophyllmoleküle zur Absorption eines Lichtquantums, das der Produktion eines O₂-Moleküls dient, nötig sind. Das blaugrüne Chlorophyll a und das gelbgrüne Chlorophyll b liegen meist im Verhältnis 3:1 vor (WILLSTÄTTER und STOLL, 1913).

Krankheiten

Infektionen können je nach Art und Verlauf einen unterschiedlichen Einfluß auf die Gewebe, den Chlorophyllgehalt, die Photosyntheserate und damit den Allgemeinzustand einer Pflanze haben. Normalerweise führen Infektionen durch Chlorophyllabbau und/oder Hemmung der Chlorophyllsynthese zu Chlorosen. Ein verminderter Chlorophyllgehalt kann nach EMERSON und ARNOLD (1932) eine geringere Photosyntheseleistung nach sich ziehen. Durch bestimmte Krankheiten zusätzlich hervorgerufene Nekrotisierungen können die photosynthesefähige Blattfläche zusätzlich so vermindern, daß die Photosyntheseleistung eines Pflanzenbestandes entsprechend geringer ausfällt. Es gab aber auch die Vermutung, daß mit Pathogenen infizierte Pflanzenbestände ihre Photosyntheserate kurzfristig erhöhen, um die zusätzlich zur Krankheitsabwehr benötigte Energie bereitzustellen (Mündliche Mitteilung von GERHARD, DFG Feldtage, 2002).

1.2 Fluoreszenz

Die in einem Blatt eintreffende photosynthetisch aktive Strahlung (kurz aPAR; in einem Wellenlängenbereich von $380 \text{ nm} < \lambda < 750 \text{ nm}$) wird hauptsächlich vom Photosystem II im Chlorophyll a absorbiert. Dort verändert es den energetischen Status der Elektronen: Nach HELDT (1996) wird ein Elektron durch die im kürzerwelligen bzw. blauen Bereich des Spektrums durch die aPAR angeregt und so auf ein hohes Energie- bzw. Singulettniveau (S4/S3) angehoben (Abb. 2). Das Absinken durch einen ersten Energieverlust auf das zweite Singulett (S2) im gelben

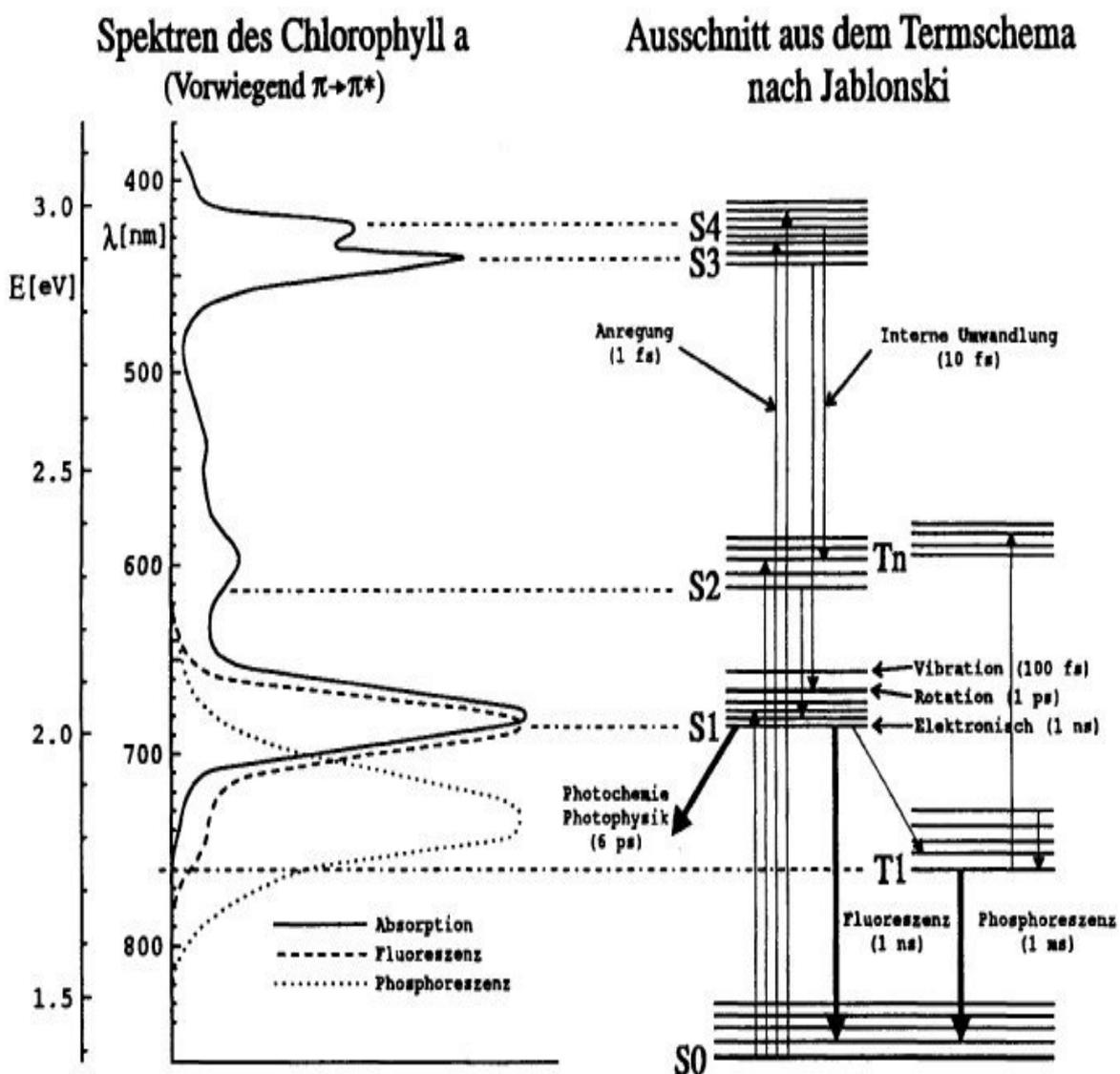


Abbildung 2. Darstellung des Absorptions- und Emissionsspektrums von Chlorophyll a (links) und deren entsprechende atomare Zustände im Jablonski-Diagramm (rechts) nach HAKEN und WOLF (1988). S = Singulett, T = Triplett (T_n mit $n > 1$), fs = Femtosekunde = 10^{-15} sec; ps = Pikosekunde = 10^{-12} sec; ns = Nanosekunde = 10^{-9} sec.

und damit längerwelligen Bereich erfolgt durch interne Umwandlungen. Von dort aus kaskadiert das Elektron durch den Verlust von Oszillations- und Spinenergie auf den noch energieärmeren, weil noch längerwelligen Zustand des ersten Singulett (S₁) im roten Spektralbereich, um dann einen weiteren Teil seiner verbleibenden Energie entweder als thermische (d.h. Wärme) oder als chemische Energie im Photosyntheseprozess abzugeben. Der verbleibende Teil wird in einer noch längeren Wellenlänge im Nahinfrarotbereich als Fluoreszenzlicht bzw. auch als Phosphoreszenz emittiert. Das emittierte Fluoreszenzlicht ist durch diesen Prozess energieärmer und längerwelliger geworden als die absorbierte photosynthetisch aktive Strahlung.

Die Prozesse von Photosynthese und Fluoreszenz wurden zum ersten Mal von KAUTSKY und HIRSCH (1931) in Zusammenhang gebracht: Sie beobachteten den Verlauf der Chlorophyll-Fluoreszenz von dunkeladaptierten Blättern verschiedener Herkunft bei Wiederbelichtung und verglichen die Ergebnisse mit denen zum zeitlichen Verlauf der Photosyntheserate von WARBURG (1920):

- a) Nach Wiederbelichtung stieg die Chlorophyll-Fluoreszenz rasch zu einem Maximum an, welches die primäre, rein photochemische Reaktion ist. Dieser Anstieg war temperaturunabhängig.
- b) Anschließend nahm die Chlorophyll-Fluoreszenz vom Maximum zu einer geringeren Fluoreszenz ab. Dieser Vorgang dauerte genauso lange wie das von WARBURG (1920) untersuchte Erreichen eines konstanten Niveaus durch die Photosyntheserate nach Wiederbelichtung. Die Chlorophyll-Fluoreszenz fiel dann aber in dieser zweiten Instanz bei 30°C um sehr viel mehr ab als bei 0°C.
- c) In der dritten Instanz wurde nach einigen Minuten nach der Wiederbelichtung ein konstantes Level der normalen Assimilation unter den gewählten Bedingungen erreicht. Entsprechend der bedeutenden Energieverwandlung (durch die Photosynthese) war die Fluoreszenz bei 30 °C sehr gering und bei 0 °C größer.
- d) Bei einer wiederholten Abdunklung dauerte es viele Minuten, bis der Zustand der Dunkeladaptation der Blätter wieder erreicht war.

- e) Nach einer plötzlichen Abdunklung während des Fluoreszenzmaximums von a) war ein weiteres Fluoreszenzmaximum bei einer weiteren Wiederbelichtung in unveränderter Weise zu beobachten.

Das Einsetzen der Photosyntheseaktivität bei der Wiederbelichtung spiegelt sich also in der in etwa antiparallelen Veränderung der Fluoreszenzintensität wieder. Bei 0 °C ist die Photosynthese sehr gering, so daß ein Großteil der aPAR in die Fluoreszenz umgeleitet wird. Bei 30 °C ist die Photosyntheserate höher, so daß die Fluoreszenz geringer ausfällt.

Diese Thesen von KAUTSKY und HIRSCH (1931) bildeten die Grundlage des allgemein anerkannten Modells der Verteilung der absorbierten Sonnenenergie in den Photosynthesezentren I und II als chemische Energie, Wärme und Fluoreszenzlicht. Der zugrundeliegende Prozeß des invers korrelierten Verlaufs von Chlorophyll-Fluoreszenz und Photosynthese wird gemeinhin als Kautsky- oder Induktionskinetik bezeichnet und konnte seitdem an vielen verschiedenen Pflanzenarten (Mono- sowie Dicotyledonen) mit ähnlichem Versuchsaufbau und vergleichbaren Ergebnissen wiederholt werden (z.B. GOVINDJEE, 1995; MAIER und GÜNTHER, 2001; MAIER *et al.*, 2003). Änderungen der Fluoreszenzintensität, die bei der Wiederbelichtung eines dunkeladaptierten Blattes auftreten, könnten also aufgrund dieser Ergebnisse als Nachweis für die Photosyntheseaktivität eines Blattes verwendet werden (KAUTSKY und HIRSCH, 1931; LICHTENTHALER, 1992; MAIER *et al.*, 1999 und 2003).

Laut KRAUSE und WEIS (1991) wird die vom Photosynthesezentrum II aufgenommene aPAR zu 90 % als chemische Arbeit und zu 3 % als Fluoreszenzlicht weitergeleitet (BJÖRKMANN und DEMMIG, 1987). Demnach werden die verbleibenden 7 % als Wärme vom Photosystem II abgegeben. Die Mengenverhältnisse an photosynthetisch aktiver Strahlung, die im Photosystem II in die Prozesse Photosynthese, Fluoreszenzlicht oder Wärmeabgabe fließen, können sich auf Basis der Ergebnisse von KAUTSKY und HIRSCH (1931) verschieben: Fließt z.B. ein größerer Teil der aPAR in den Photosyntheseprozess ein, wird entsprechend weniger Energie in die Fluoreszenz umgeleitet. Das bedeutet, daß eine Pflanze, die eine höhere Photosyntheserate betreibt, schwächer fluoresziert. Fließt aber weniger aPAR in die Photosynthese, wäre der Anteil des Fluoreszenzlichts größer. Nach diesem Modell könnte also durch

Fluoreszenzmessungen auf die Photosyntheserate eines Pflanzenbestandes geschlossen werden. Bisher wurden Photosynthesemessungen aufwendig mit Gaswechselmeßgeräten durchgeführt. Anhand dieses Modells sollte es möglich sein, die Photosyntheserate eines Pflanzenbestandes schnell durch berührungslose Meßverfahren (z.B. spektrometrische Messungen der Fluoreszenz) zu bestimmen.

Zu diesem Thema gibt es zahlreiche Publikationen, die Fluoreszenz und die sie beeinflussenden Faktoren betreffend: Der Anteil der emittierten Fluoreszenz ist proportional zum absorbierten Lichtstrom (KRAUSE und WEIS, 1991). KAUTSKY und HIRSCH (1931) belegten mit ihren Ergebnissen veränderte Photosynthese- und Fluoreszenzverhältnisse bei unterschiedlicher Belichtung bzw. unterschiedlichen Temperaturen. MAIER *et al.* (2003) gaben bei ihren Untersuchungen zur sonnenlicht-induzierten Chlorophyll-Fluoreszenz als zusätzlichen Faktor die Chlorophyllkonzentration an, bei gleichzeitiger Abhängigkeit der Chlorophyll-Fluoreszenz vom Photosynthesestatus. MAXWELL und JOHNSON (2000) warnten davor, die Interpretation der Fluoreszenz zu simplifizieren, welche ein Maß für die Photosynthese zu sein scheint, aber eigentlich nur als Maß für die Effizienz der Photochemie des Photosystems II verwendet werden kann. Aber auch die Pflanzenart bewirkte ein unterschiedliches Verhältnis zwischen Photosyntheseaktivität und Elektronentransport (FILELLA *et al.*, 1998).

Leichter Wassermangel führte bei *Vitis vinifera* L. zu unterschiedlichen Graden der Regulierung der Photosynthese nach unten und zu einer verminderten nichtphotochemischen Ablöschung der Chlorophyllfluoreszenz. Dabei korrespondierten die Elektronentransportrate und die CO₂-Assimilation weiterhin gut miteinander, wodurch eine Koregulation der beiden Photosyntheseprozesse vermutet werden konnte (FLEXAS *et al.*, 1999). Weinpflanzen mit geringerem Wasserpotential hatten eine niedrigere Photosyntheserate und stomatäre Leitfähigkeit mit einer erhöhten Fluoreszenz (FLEXAS *et al.*, 2002). Bei NIU *et al.* (2004) zeigten sich bei *Hedysarum fruticosum* var. *mongolicum*, einer in den Sandregionen Nordchinas vorkommenden Leguminose mit C₃-Stoffwechsel, vergleichbare Ergebnisse.

Maximale und variable Fluoreszenz erhöhten sich bei zunehmendem Wassergehalt, gleichbedeutend zu einer zunehmenden Erhöhung des Anteils von reversibel, schwächer gebundenen Wassermolekülen an Membranen und Makromolekülen des Photosyntheseapparats. Eine Veränderung des Verhältnisses

zwischen variabler und maximaler Fluoreszenz (F_v/F_m , s. PAM-Fluorometrie) erfolgt auch bei Veränderungen des Blattwassergehalts im nichtletalen Bereich: Während einer Mittagshitzedepression im diurnalen Verlauf des Gaswechsels zeigte F_v/F_m niedrigere Zahlenwerte als während der morgendlichen Zeit höherer CO_2 -Fixierung (JEFFERIES, 1994).

Als ein die Fluoreszenzemission möglicherweise beeinflussender Faktor ist hier zusätzlich die Chloroplastenwanderung aufgeführt: Bei Belichtung verkleinern die Chloroplasten ihr Volumen, können innerhalb der Zelle Bewegungen durchführen und sich sogar verformen (BRUGNOLI und BJÖRKMANN, 1992). Bei starker Sonneneinstrahlung sowie bei steigenden Temperaturen wandern sie zu den Zellwänden und lagern sich untereinander vertikal zum eingestrahlteten Sonnenlicht an. Wenig beeinflusst von der Chloroplastenbewegung bleiben aber die Effizienz des Photosystems II und die Ratio von variabler zu maximaler Fluoreszenz (F_v/F_m), obwohl die optischen Charakteristika eines Blattes wie Transmission und auch Reflexion verändert werden (HAUPT und SCHEUERLEIN, 1990; BRUGNOLI und BJÖRKMANN, 1992).

Erwähnt sei an dieser Stelle vor allem aus untersuchungstechnischen Gründen, daß BUTTERFASS (1967) die Chloroplastenzahlen in den Schließzellen und in den Epidermis- sowie Schwammparenchymzellen von *Beta vulgaris* L. bezüglich des Ploidiegrades untersucht hatte. Diese Untersuchungsmethodik setzt voraus, daß die Zuckerrübe nicht nur in den Stomata, sondern auch in den übrigen Epidermiszellen Chloroplasten enthält. Bekannt ist das auch von Schattenpflanzen wie z.B. *Soleirolia soleirolii* (Req.) Dandy (IDELBERGER, 1999, nichtrezensierte Literatur).

Zur Interpretation des Zustandes eines Pflanzenbestandes kann neben der Fluoreszenz auch die Reflexionssignatur (s. Abb. 3) herangezogen werden: Sie berechnet sich durch Quotientenbildung der Signaturen von Bestandesrückstrahlung und Sonneneinstrahlung und stellt den Anteil an emittierter Strahlung relativiert auf die eingestrahelte Lichtmenge von einem Pflanzenbestand dar. Die Ausprägung dieser Reflexionssignatur kann von verschiedenen Faktoren beeinflusst werden: Sie variiert je nach Sorte, Sonneneinstrahlung, Streßsituation, Blattstellung, Entwicklungsstadium, Blattflächenindex und anderen bekannten und unbekanntem Faktoren in ihrer Form wie auch Höhe (PINTER *et al.*, 1985). FILELLA *et al.* (1996)

fanden tagesgangbedingte Veränderungen v.a. im Bereich von 480 bis 600 nm und im Bereich von Wellenlängen größer als 680 nm (Nahinfrarotbereich).

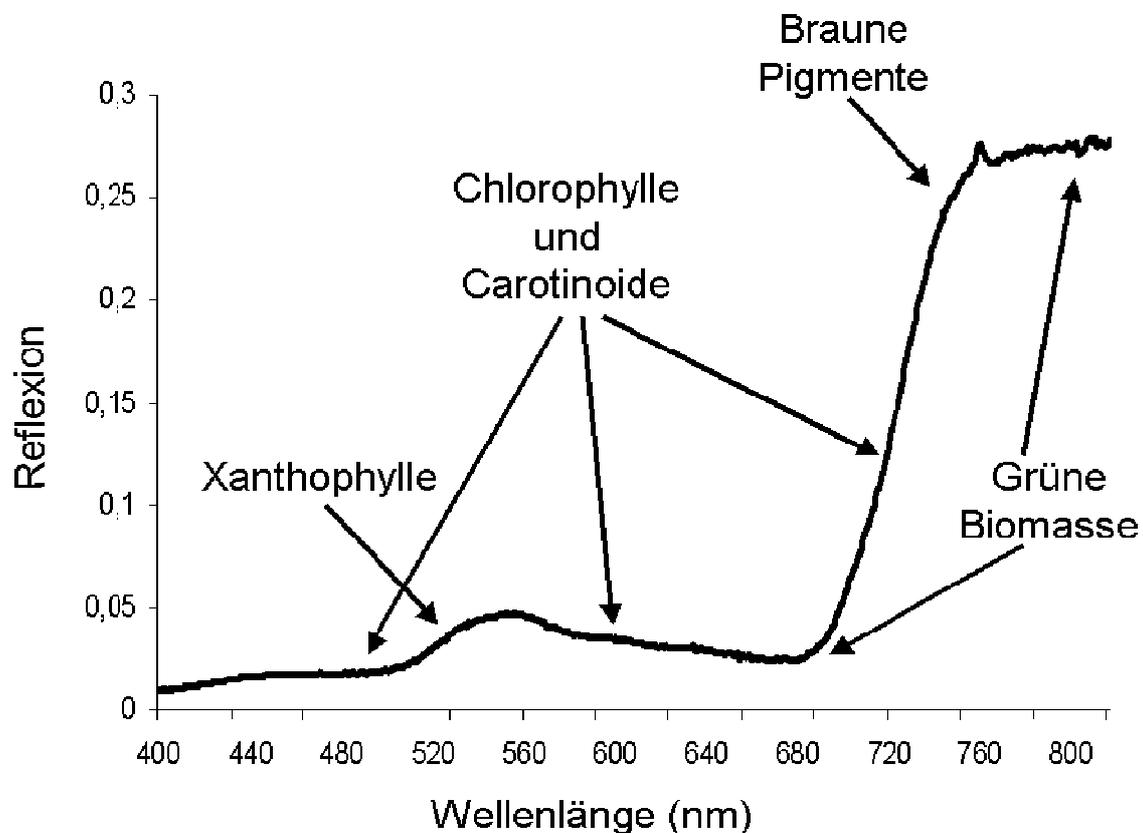


Abbildung 3. Reflexionssignatur eines gesunden Bestandes (nach PEÑUELAS und FILELLA, 1998).

Die Erhebung der Reflexionssignatur im grünen Bereich (ca. 550 nm) kommt nicht aufgrund der grünen Farbe der Pflanzen zustande, sondern weil hier weniger Pigmente vorhanden sind, die in dieser Spektralregion absorbieren; denn je mehr Pigmente vorhanden sind, desto mehr einfallende Sonneneinstrahlung wird absorbiert und desto geringer ist die Reflexion, wie von LICHTENTHALER *et al.* (1998) an Ulmenblättern gezeigt werden konnte. Im Ultraviolett-Bereich remittieren eher Bestandteile wie Zellwände usw., aber nicht die Farbstoffe. Chlorophyllkonzentrationen können v.a. bei Wellenlängen von 675 und 550 nm abgeleitet werden, wobei die Sensibilität bei niedrigen Chlorophyllkonzentrationen im Bereich von 675 nm und bei mittleren Chlorophyllkonzentrationen im Bereich von 550 nm größer ist (PEÑUELAS und FILELLA, 1998).

Ein Teil der Wärmeabstrahlung geschieht durch den Xanthophyllzyklus und ist eng mit ihm korreliert (DEMMIG-ADAMS und ADAMS, 1996). Der Xanthophyllzyklus ist

wiederum mit der Reflexion bei 531 nm korreliert, wodurch die Photosynthese-Effizienz abgeschätzt werden kann (PEÑUELAS und FILELLA, 1998). Wellenlängen von 685 und 751 nm können zur Berechnung der grünen Biomasse herangezogen werden (PEÑUELAS und FILELLA, 1998). Die spektrale Reflexion im Bereich von 400 bis 700 nm wird vornehmlich vom Gehalt an Chlorophyllen und anderer Pigmente, die die einfallende Strahlung absorbieren, bestimmt (THOMAS und GAUSMANN, 1977; BROGE und MORTENSEN, 2002). Die Höhe der Reflexionssignatur im Infrarotbereich zwischen 750 und 880 nm wird mehr von der Tageszeit, weniger von der Sorte, der Pflanzendichte und dem Stickstoffgehalt beeinflusst (HANSEN und SCHJOERRING, 2003).

Im Nahinfrarotbereich (700 bis 1300 nm) wird die Reflexion auch von der Zellanzahl und -größe sowie den Interzellularen bestimmt (PEÑUELAS und FILELLA, 1998); d.h. mit wachsender Zellanzahl steigt auch die Reflexion, wodurch sich auch im Nahinfrarotbereich die Biomasse abschätzen läßt. Die umgekehrte Abhängigkeit der Chlorophyllfluoreszenz der Wellenlängen 685 oder 730 nm im Gleichgewichtszustand der Kohlenstofffixierungsrate zeigt, daß die Fluoreszenzintensität eng mit der Photosynthese verbunden ist (GÜNTHER *et al.*, 1994). Unter Laborbedingungen können der Elektronentransport des Photosystems II und die CO₂-Fixierung sehr gut miteinander korrelieren (GENTY *et al.*, 1989). Diese Korrelation kann aber, wie bei FRYER (1998) geschehen, im Freiland zusammenbrechen. MAIER *et al.* (2003) stellten eine Variabilität der Reflexion im roten Spektralbereich von ca. einem Viertel infolge der Kautsky-Kinetik der Fluoreszenz in ihren Abdunklungsversuchen fest.

Signifikante Veränderungen im sichtbaren und Nahinfrarotbereich der Reflexionssignatur treten auch im Krankheitsfall auf: In den Versuchen von PEÑUELAS *et al.* (1995b) veränderte ein Schädlingsbefall von Milben und Käfern bei Apfelbäumen das Carotinoid/Chlorophyll-a-Verhältnis und somit die Reflexionssignatur in den entsprechenden Bereichen. Aber auch ein erhöhter Wassergehalt ließ die Reflexionssignatur vor allem im Nahinfrarotbereich anwachsen (PEÑUELAS und FILELLA, 1998). Nach PINTER *et al.* (1985) hängt die Reflexion eines Bestandes auch von dessen Architektur ab, da z.B. planophile Bestände dazu tendieren, eine höhere Reflexion im Nahinfrarotbereich zeigen als erectophile.

Bei STICKSEL *et al.* (2004) unterschieden sich Winterweizensorten nicht nur durch ihre jeweilige plano- und erectophile Blattstellung voneinander, sondern unterschieden sich auch in den verschiedenen N-Steigerungsstufen signifikant: Die in den Blättern vorhandenen Pigmente absorbierten die Einstrahlung im sichtbaren Bereich. Bei einer erhöhten Pigmentkonzentration wurde mehr Licht absorbiert und weniger reflektiert. Da Pigmentgehalt und Biomasse- bzw. Stickstoffgehalt positiv miteinander korreliert waren, konnte die Reflexion zur Abschätzung der Biomasse bzw. des Stickstoffgehalts genutzt werden. Die Ergebnisse von BLACKMER *et al.* (1994) zeigten eine klare Zunahme der Reflexion bei 550 nm bei abnehmenden Stickstoff- und Chlorophyllgehalten der Blätter. Zusätzlich fiel die Reflexion im Infrarotbereich geringer aus (LICHTENTHALER *et al.*, 1998). Pflanzenbestände mit hohem Stickstoff- und Chlorophyllgehalt zeigten in Kombination mit einem niedrigerem Wassergehalt bzw. einer erhöhten Ribulosebiphosphatcarboxylase-aktivität eine geringere Reflexion im sichtbaren und eine erhöhte Reflexion im Nahinfrarotbereich (FILELLA und PEÑUELAS, 1994; PEÑUELAS *et al.*, 1994).

Aber auch das Bodensignal kann in niedriggedüngten Beständen das vom Bestand ausgehende Signal stören. So variierte z.B. die Reflexion im roten Spektralbereich bei mit N niedriggedüngten Beständen weitaus stärker als bei hochgedüngten Beständen (BROGE und MORTENSEN, 2002).

Fluoreszenzmessungen sind eine anerkannte Methode in der ökophysiologischen Forschung und zur Streßdetektion (LICHTENTHALER und RINDERLE, 1988). Im Precision Farming werden spektroskopische Verfahren zur umfassenden, zerstörungsfreien Beobachtung und Erfassung der Variabilität der Biomasseentwicklung von Pflanzenbeständen seit Jahren eingesetzt. Die bisherigen Fernerkundungsmethoden erlaubten bisher (bis auf die Ausnahme des Photochemical Reflectance Index – PRI) – die Einschätzung von konstanten Ist-Werten eines Pflanzenbestandes wie N-Versorgung und Bestandesdichte, ohne daß die Entnahme von Pflanzenproben und aufwendige Analyseverfahren notwendig waren. Im Folgenden werden verschiedene Meßmethoden zur Bestimmung solcher Ist-Werte vorgestellt:

Durch den Einsatz von Infrarotkameras kann eine Streßbestimmung durch Wärmebilder erfolgen: Mit zunehmendem Streß steigt auch die Wärmeabgabe einer Pflanze an, weswegen auf ein erhöhtes Streßlevel geschlossen werden kann. Diese

Methode ist etabliert, aber recht unspezifisch, da eine erhöhte Wärmeabgabe auf unterschiedliche Prozesse zurückgeführt werden kann. Die im Prozeß der Photosynthese stattfindende und somit spezifische Wärmeabgabe des PSII (Photosystem II) läßt sich mit dieser Methode jedoch nicht von anderen Prozessen trennen bzw. unterscheiden.

Die laserinduzierte Chlorophyllfluoreszenz dagegen wird als aktives Meßverfahren erfolgreich zur Erfassung der Stickstoffaufnahme und der Biomasse eines Bestandes eingesetzt (LÜDECKER *et al.*, 1995; BREDEMEIER und SCHMIDHALTER, 2003). Hierbei wird die Fluoreszenzemission, stimuliert durch Laserimpulse, gemessen. Die Fluoreszenzratio F685/F730 ist umgekehrt mit der Stickstoffaufnahme und dem Chlorophyllgehalt korreliert und hängt nicht von der Einstrahlungsstärke ab (GÜNTHER *et al.*, 1999). Die laserinduzierte Chlorophyllfluoreszenz gilt außerdem als tagesunveränderlich, da sie sich als unempfindlich gegenüber veränderten Lichtbedingungen erwies, wie von BREDEMEIER und SCHMIDHALTER (2001) durch Versuche in Wachstumskammern und von SCHÄCHTL *et al.* (2003) unter freiem Himmel gezeigt werden konnte.

Mit der aktiven Meßmethodik der PAM-Fluorometrie (Pulse amplitude modulated fluorometry) wird die Chlorophyllfluoreszenz *in vivo* gemessen, wodurch Aussagen über den Status des Photosystems II gemacht werden können. Störungen des Photosyntheseapparates können über definierte Chlorophyllfluoreszenz-Parameter nach Bestrahlung mit Lichtpulsen (Meßlicht, aktinisches, d.h. photosynthetisch aktivierendes; Licht und Sättigungspulse) gemessen werden. Durch die Differenz der Grundfluoreszenz (F_0) von der maximalen Fluoreszenz (F_m) wird die variable Fluoreszenz (F_v) errechnet. Die optimale Quantenausbeute des Photosystems II ergibt sich aus dem Quotienten F_v/F_m (GENTY *et al.*, 1989). Dieser Quotient und die Photosyntheseeffizienz verändern sich gleichläufig, was auch bei unterschiedlichen Einstrahlungsstärken der Fall ist (PEÑUELAS und FILELLA, 1998).

Mit der Multicolorfluoreszenzphotographie durch den VIRAF-Spektrometer (Visible INFRARED Reflectance Absorptance Fluorescence; BUSCHMANN *et al.*, 1994) konnten BUSCHMANN und LICHTENTHALER (1997) und BUSCHMANN *et al.* (2000) anhand der unterschiedlichen Differenzierungen von verschiedenen Ratios aus blauer, grüner, roter und nahinfraroter Fluoreszenz bei Einzelblättern

zwischen den Stressoren (z.B. Hitzebehandlung, N-Mangel, Wassermangel) unterscheiden. Diese Stressoren verursachten Unterschiede im Pigmentgehalt und auch Veränderungen in der Gewebestruktur der Blätter und der Photosyntheseaktivität. Außerdem können mit dem VIRAF-Spektrometer Parallelmessungen von Reflexion, Absorption und Chlorophyllfluoreszenz an einer Blattprobe durchgeführt werden, wobei der Anteil der Chlorophyllfluoreszenz zum Reflexionsspektrum bei Blättern mit niedrigem Chlorophyllgehalt höher war (BUSCHMANN und LICHTENTHALER, 1999).

Eine Annäherung an die Messung der durch Sonnenlicht angeregten Chlorophyllfluoreszenz gelang KEBABIAN *et al.* (1999) mit einem passiven Zweibandsensor, der Sonnenlicht und pflanzliches Fluoreszenzlicht nach Durchtritt durch eine mit Sauerstoff gefüllten Zelle im Bereich der atmosphärischen Sauerstoffabsorptionsbanden A und B (762 und 688 nm) als Pulse maß. Die Fluoreszenz (690 nm / 760 nm) war invers mit dem Chlorophyllgehalt korreliert, zeigte aber auch durch stark steigende Werte Pflanzenstreß im Vergleich zu ungestreßten Pflanzen an.

Ein neuer und bis dato einzigartiger Meßansatz gelang MAIER *et al.* (1999) in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR) anhand der passiven Meßmethode der sonnenlicht-induzierten Chlorophyll-Fluoreszenz (CF), welche mehrfach patentiert wurde (s. „Patente“, Literaturverzeichnis): Die remittierte Strahlung der Vegetation unter der Beleuchtung durch Sonnenlicht besteht aus reflektiertem und Fluoreszenz-Licht. Die CF wird aus den Daten von Bestandesrückstrahlung und Sonneneinstrahlung im Bereich der Sauerstoffabsorptionsbande bei 760 nm errechnet (s. Kapitel 2.1.1 Geräte). Da die Absorptionseffekte des atmosphärischen O₂, welche sich als lokale Minima bei 760 nm zeigen, durch z.B. Gewächshausglas herausgefiltert werden, kann diese Methode nur im Freiland angewendet werden.

MAIER *et al.* (1999) erhielten bei ihren Versuchen mit der CF vergleichbare Ergebnisse von dem von ihnen eingesetzten Multikanalspektrometer MCS501 der Firma ZEISS, einem ROSIS Sensor (Reflective Optics System Imaging Spectrometer) für die Messungen vom Flugzeug aus, und einem PAM-Fluorometer. Sie demonstrierten in Abdunklungsversuchen, daß die von ihnen im Bereich der Sauerstoffabsorptionsbande gemessene sonnenlicht-induzierte Chlorophyll-

Fluoreszenz der Kautsky-Kinetik unterlag, weshalb die CF nachweislich wie die Photosynthese aus dem Photosystem II stammt (MAIER *et al.*, 1999). Damit stünde erstmals ein Meßverfahren zur Verfügung, das eine quantitative Bestimmung des Photosynthesestatus und damit eine Charakterisierung der Streßsituation eines Pflanzenbestandes innerhalb von Sekunden erlaubt, ohne daß dabei das Meßobjekt zerstört oder in anderer Weise beeinflusst wird. MAIER *et al.* (1999) beschrieben die sonnenlicht-induzierte Chlorophyll-Fluoreszenz (CF) als primär abhängig von der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) und dem Chlorophyllgehalt eines Pflanzenbestandes. Die bisherigen Meßmethoden für Chlorophyllfluoreszenz waren nur mit aktiven Verfahren, d.h. mit Laserimpulsen durchzuführen. Die hier verwendete einzigartige passive Meßmethodik läßt nicht nur bodennahe Messungen der CF zu, sondern auch vom Flugzeug oder Satelliten aus.

MOYA *et al.* (2004) präsentierten ein neues Gerät zur passiven Messung der sonnenlicht-induzierten Chlorophyllfluoreszenz, konstruiert vom „Laboratoire pour l’Utilisation du Rayonnement Electromagnetique“, welches die Chlorophyllfluoreszenz in der Sauerstoffabsorptionsbande bei 760 nm maß. Sie führten Vergleichsmessungen mit einem Pulsfluorometer (FIPAM – frequency-induced pulse amplitude modulation) durch und fanden eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse von beiden Geräten, sowie von Gasaustausch und variabler Chlorophyllfluoreszenz sowohl auf Bestandesebene als auch auf Blattebene. Sie stellten eine Zunahme der Tiefe der Sauerstoffabsorptionsbande bei Beschattung unter durchziehenden Wolkenfeldern fest. LOUIS *et al.* (2005) stellten auch unter sich wechselnden Lichtverhältnissen unter durchziehenden Wolken eine schnellere Reaktion der sonnenlicht-induzierten Chlorophyllfluoreszenz, gekennzeichnet durch eine größere Amplitude, an sonnigen Sommertagen als an kälteren Tagen bei Beständen der Schottischen Kiefer fest.

Desweiteren konnten MOYA *et al.* (2004) eine Abnahme der Fluoreszenz nach Wiederbelichtung von dunkeladaptierten Blättern messen. Bei kontinuierlichen Messungen an Bohnenblättern fanden sie eine hohe Korrelation zwischen Chlorophyllfluoreszenz und PPFD (Photosynthetically Active Photon Flux Density – Photonenstromdichte). Nach vielen Stunden starker Einstrahlung kam es zu einer negativen Korrelation zwischen Chlorophyllfluoreszenz und PPFD, wie bereits schon von CEROVIC *et al.* (1996) bei C₄-Pflanzen und von FLEXAS *et al.* (2000) berichtet. Für die kontinuierlichen, automatisch durchgeführten Messungen war das Gerät in

einem Winkel von 38 Grad zum Pflanzenbestand und in 4,25 m Höhe festmontiert. Auch nahmen MOYA *et al.* (2004) von dieser passiven Meßmethodik der Chlorophyllfluoreszenz an, daß neue Einsichten in den Status einer Pflanze und Streßbestimmung gewonnen werden könnten.

1.3 Weitere in dieser Arbeit verwendete Vegetationsindizes

Da die CF mit Hilfe der Daten eines Spektrometers errechnet wurde, welcher sowohl die Sonneneinstrahlung als auch die Bestandesrückstrahlung maß, konnten im gleichen Arbeitsgang auch noch weitere aus der Literatur bekannte Vegetationsindizes aus den sich ergebenden Reflexionssignaturen herangezogen werden, die als Referenzgrößen dienen sollten.

a) Red Edge Inflection Point (REIP)

Der Red Edge Inflection Point (REIP) wurde als verlässlicher und tageskonstanter Vegetationsindex für den Chlorophyll- (COLLINS, 1978) bzw. N-Gehalt und den Blattflächenindex (GUYOT und BARET, 1988) etabliert. Er errechnet sich aus der ersten Ableitung der Reflexionssignatur und gibt die Wellenlängenposition des Hauptwendepunktes der Reflexionssignatur an:

$$\text{REIP} = 700 + 40 * [(R_{670} + R_{800}) / 2 - R_{700}] / (R_{740} - R_{700})$$

Umweltbedingter Streß, der Chlorophyll vermindert, verursacht typischerweise ein Verschieben der roten Spitze („red edge“) der ersten Ableitung in Richtung kürzerer Wellenlängen (HORLER *et al.*, 1983). Laut BOOCHS *et al.* (1990) konnten mit der spektral hochaufgelösten Bestimmung des „Red Edge Point“ sogar kleine qualitative Unterschiede im chemischen und morphologischen Zustand eines Bestandes möglich sein. Der „Red Edge Point“ scheint aber bei höheren Chlorophyllgehalten in Sättigung zu gehen (DASH und CURRAN, 2004). Er besitzt einen äußerst gering ausgeprägten Tagesgang und ist deswegen als tageskonstanter Vegetationsindex besonders geeignet (STICKSEL *et al.*, 2004).

b) Photochemical Reflectance Index (PRI)

Der Xanthophyllzyklus ist ein Photoprotektionsmechanismus der Pflanzen, um die Photosynthesysteme gegen überschüssiges und schädigendes Sonnenlicht zu schützen. Er spielt eine zentrale Rolle bei der Steuerung des Energieflusses zum Photosystem II (BILGER und BJÖRKMANN, 1990). Dabei wird unter Lichteinwirkung

energiearmes Violaxanthin zu energiereichem Zeaxanthin über die Zwischenstufe Antheraxanthin durch die Bildung von Doppelbindungen deepoxidiert (GAMON *et al.*, 1992). Die so abgeleitete Energie wird als Wärme abgegeben (DEMMIG-ADAMS und ADAMS, 1996), ein Prozeß, der mit der photosynthetischen Elektronentransportkette wetteifert und komplementär dazu ist (NIYOGI, 1999). Je aktiver dieser Xanthophyllzyklus ist, desto weniger Sonnenenergie trifft auf die Photosysteme I und II auf.

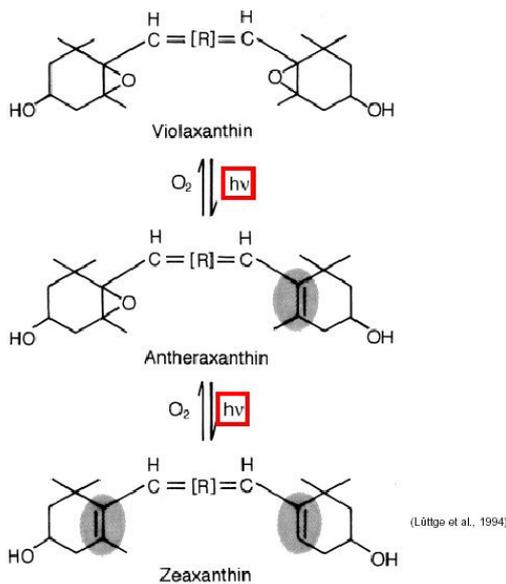


Abbildung 4. Der Xanthophyllzyklus: Deepoxidationsstufen von energiearmem Violaxanthin mit den zwei Epoxidreiecken in energiereiches Zeaxanthin mit zwei Doppelbindungen (grau unterlegt) über die Zwischenstufe Antheraxanthin durch überschüssiges Licht (nach LÜTTGE *et al.*, 1994)

Die Deepoxidation kann innerhalb von Minuten auftreten, die Epoxidation innerhalb von Minuten bis Stunden, aber auch Tage unter zusätzlicher Streueinwirkung dauern (DEMMIG-ADAMS und ADAMS, 1996). Die Epoxidation kann überdies unter Schwachlichtbedingungen stattfinden, ist aber auch schon tagsüber beobachtet worden (DEMMIG-ADAMS und ADAMS, 1996).

Die spektrometrische Messung der Aktivität des Xanthophyllzyklus kann durch den Photochemischen Reflexionsindex erfolgen (Photochemical Reflection Index - PRI, nach GAMON *et al.*, 1992; GAMON *et al.*, 1995; GAMON *et al.*, 1997): Durch die Verhältnisbildung der Xanthophyllfraktion bei 528 nm, die die Fraktion der Pigmente des Xanthophyllzyklus repräsentieren, an einer unveränderlichen Referenzwellenlänge (567 nm) kann der PRI mit folgender Formel berechnet werden, wobei überwiegend negative Werte entstanden:

$$(a) \text{ PRI} = (R_{528} - R_{567}) / (R_{528} + R_{567}) \quad \text{nach GAMON } et \text{ al. (1997)}$$

In anderen Publikationen über den PRI wurden z.T. benachbarte Wellenlängen in vertauschten Positionen in der Formel verwendet, so daß ein PRI mit meist positiven Werten entstand:

$$(b) \text{ PRI} = (R_{570} - R_{531}) / (R_{570} + R_{531}) \text{ nach GAMON } et al. (1992)$$

Eine Umkehrung von vorhergehender Formel ergibt ein negatives Ergebnis:

$$(c) \text{ PRI} = (R_{531} - R_{570}) / (R_{570} + R_{570}) \text{ nach LOUIS } et al. (2005)$$

Der PRI aus Formel (b) ist mit dem Epoxidierungsgrad des Xanthophyllzyklus und der Photosyntheseeffizienz im Tagesgang invers korreliert (PEÑUELAS *et al.*, 1994; GAMON *et al.*, 1995; MÉTHY, 2000a+b), d.h. die positiven Werte des PRI steigen mit dem Deepoxidationsgrad der Xanthophyllfraktion, also mit der Aktivität des Xanthophyllzyklus, an.

Der Xanthophyllzyklus ist überdies eng mit der PFD (Photonenstromdichte) verknüpft: Pflanzenbestände, die eine chronisch reduzierte Photosynthese während der Streßeinwirkung zeigten, leiteten proportional mehr Energie in photoprotektive Prozesse um als Bestände mit hoher Photosynthesekapazität (GAMON *et al.*, 1995). FILELLA *et al.* (1996) haben an strahlungsreichen Tagen eine signifikante inverse Korrelation zwischen Photosyntheseeffizienz und PRI ($= (R_{539} - R_{570}) / (R_{539} + R_{570})$) im Tagesgang bei gleichzeitiger Mittagshitzedepression gefunden. Diese war bei GAMON *et al.* (1997) mit einer reduzierten Photosyntheseeffizienz, dem PRI (Formel (c)) und dem Fluoreszenzindex F_v/F_m sowie mit gestiegenen Levels des photoprotektiven Xanthophyllzykluspigments Zeaxanthin verbunden. F_v/F_m und PRI (Formel (b)) waren bei PEÑUELAS *et al.* (1997) invers miteinander korreliert. Nach PEÑUELAS und INOUE (2000) kann der PRI als Referenzgröße nicht nur für die Aktivität des Xanthophyllzyklus sondern auch für die CO_2 -Assimilation genutzt werden. Laut LU *et al.* (2001) wurde die Aktivität des Xanthophyllzyklus als Antwort auf begrenzt verfügbares N erhöht, um überschüssige Energie unter starker Einstrahlung abzuleiten.

Aber auch der durch den Wassermangel über Stomataschluß bedingte geringere Energiebedarf des Assimilationsprozesses kann einen Energieüberschuß im Bereich des photosynthetischen Lichtsammelapparates und der Energieübertragungssysteme verursachen. Dieser konnte durch den Xanthophyllzyklus abgebaut werden. In trockengestreßten Pflanzen von *Lavandula stoechas* L. z.B. verminderte sich die Menge an Violaxanthin von Sonnenaufgang bis Mittag, wobei sich die Menge an

Zeaxanthin und Antheraxanthin bei hohen Einstrahlungsstärken erhöhte und sich die Photosynthese verringerte (MUNNÉ-BOSCH und ALEGRE, 2000). Auch LOUIS *et al.* (2005) fanden bei ihren Messungen mit dem PMFD (Passive Multi-Wavelength Fluorescence Detector) in einem Bestand der Schottischen Kiefer eine inverse Korrelation zwischen PRI (Formel (c)) und PAR, aber positive Korrelation zwischen Nettophotosynthese und PRI.

Versuche im Labor, bei denen Blätter Tagesgängen von Licht und simuliertem Stomataschließen ausgesetzt waren, zeigten, daß der PRI (Formel (b)) sich rasch mit beiden Faktoren – Einstrahlung und physiologischem Blattzustand - veränderte. Im Beständen im Freiland war dieser Tatbestand bei PEÑUELAS *et al.* (1998) ebenso, aber bei MÉTHY (2000b) jedoch gar nicht vorhanden.

FILELLA *et al.* (2004) befanden auch eine unterschiedlich ausgeprägte Nützlichkeit des PRI (Formel (c)), weil er abhängig von der Pflanzenart und der Blüte variierte. Saisonal bedingt sank der PRI bei vielen Pflanzenarten vom Frühjahr bis zum Sommer, und bis zum Herbst stieg er wieder (FILELLA *et al.*, 2004). Aber auch schon GAMON *et al.* (1997) fanden bei gering stickstoffgedüngten Pflanzenarten geringere PRI-Werte (Formel (c)) vor als bei Pflanzenarten mit einem hohen Stickstoffgehalt.

Wie die CF ist also auch der PRI ein physiologischer Parameter, der aber die Menge an abgeleiteter überschüssiger Energie vor dem Auftreffen in den minoren Proximalantennen des Lichtsammelkomplexes auf das Photosystem II (DEMMIG-ADAMS und ADAMS, 1996) anzeigt, während die CF die Menge an vom Photosystem II abgegebenen Fluoreszenzlicht repräsentiert.

c) Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)

Der Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI) wird als hochsensitives Maß für den Gesamtchlorophyllgehalt genutzt. Er berechnet sich nach GITELSON und MERZYLAK (1995, 1997) aus einer Ratio von Wellenlängen im grünen (555 nm) und Nahinfrarot-Bereich (751 nm):

$$\text{GNDVI} = (\text{IR} - \text{Grün}) / (\text{IR} + \text{Grün}) = (R_{751} - R_{555}) / [R_{751} + R_{555}]$$

Laut GITELSON und MERZYLAK (1997, 1998) ist der GNDVI positiv mit dem Chlorophyllgehalt korreliert und geht bei höheren Chlorophyllgehalten nicht so schnell in Sättigung wie der NDVI (Normalized Difference Vegetation Index nach

ROUSE *et al.*, 1974; LICHTENTHALER, 1992; GITELSON und MERZLYAK, 1995; GITELSON *et al.*, 1996; YODER und WARING, 1994). Bei MAIER *et al.* (2003) hatte der GNDVI von bloßem Boden einen Wert von 0,15.

MAIER *et al.* (1999) setzten außerdem die CF in Bezug zum GNDVI, um den unterschiedlichen Informationsgehalt der beiden Vegetationsindizes zu unterstreichen. Die Beziehung von CF und GNDVI war bei geringeren Werten linear, bei zunehmenden GNDVI-Werten aber wuchsen die Werte der CF weitaus stärker an als die des GNDVI. MAIER *et al.* (1999) und MAIER *et al.* (2003) stellten fest, daß verschiedene Schläge unterschiedliche Relationen von CF und GNDVI aufwiesen, was sie auf verschieden starke Photosyntheseaktivitäten bei unterschiedlichen Chlorophyllgehalten schließen ließ. Die Ergebnisse von MAIER und GÜNTHER (2001) zeigten, daß die CF in der roten Spektralregion einen Anteil bis zu 50 % und im Nahinfrarotbereich einen Anteil bis zu 5 % der reflektierten Strahlung der Vegetation hatte.

MAIER und GÜNTHER (2001) leiteten zudem aus der Gegenüberstellung von GNDVI und CF die Tagesveränderlichkeit der CF ab: Bei niedrigen GNDVI-Werten waren GNDVI und CF linear korreliert. Bei höheren GNDVI-Werten, verursacht durch einen geschlosseneren Bestand, stieg die CF um ein ca. sechsfaches an, während der GNDVI sich nur verdoppelte. Daraus schlossen MAIER *et al.* (2003) auf einen unterschiedlichen Informationsgehalt für beide Vegetationsindizes mit der Vermutung der Veränderlichkeit der CF über den Tag hinweg.

d) Ratio Red/Green (RG-Ratio)

Die Anthocyanbiosynthese kann durch Streß wie Stickstoff- und Phosphormangel, Wunden, Infektion mit Pathogenen, Austrocknung, niedrige Temperaturen und UV-Strahlung induziert werden (GITELSON *et al.*, 2009). Die RG-Ratio ist ein Index für den Anthocyangehalt und mit diesem linear korreliert (GAMON und SURFUS, 1999), soll aber auch den Chlorophyll- und N-Gehalt darstellen. Die RG-Ratio errechnet sich aus folgender Formel:

$$\text{RG-Ratio} = \Sigma (R_{600 \text{ bis } 699}) / \Sigma (R_{500 \text{ bis } 599})$$

Dabei wird die Reflexion im grünen Bereich der Reflexionssignatur, in dem die Anthocyane und Chlorophylle absorbieren, mit dem roten Bereich, in dem nur Chlorophyll a und Chlorophyll b absorbieren, verglichen. GITELSON *et al.* (2009)

haben in Blättern von *Corylus avellana* L. eine über 90 %-ige und von *Acer platanoides* L. eine über 49 %-ige Korrelation zwischen RG-Ratio und Anthocyangehalt gefunden.

e) Ratio Vegetation Index (RVI)

Der Ratio Vegetation Index (PEARSON und MILLER, 1972) zeigt die Biomasse an. Er tendiert laut GUYOT und BARET (1988) dazu, den Kontrast zwischen Boden und Vegetation zu verstärken, während die Effekte der Beleuchtungsbedingungen minimiert werden. Auch sprachen sie vom LOI – Leaf Overlapping Index, den sie folgendermaßen berechneten:

$$RVI = NIR / R = R_{780} / R_{670}$$

Der RVI nahm im Laufe der Entwicklung eines Pflanzenbestandes zu und während der Abreife ab, wobei er in mit Stickstoff niedriggedüngten Beständen weitaus geringer korreliert war als in hochgedüngten. Außerdem ist der RVI mit dem Grünen Blattflächenindex und der Bestandeschlorophylldichte linear korreliert (BROGE und MORTENSEN, 2002). Der RVI gilt als tageskonstant und hat einen geringfügig, dafür aber ausgeprägteren Tagesgang als der REIP (STICKSEL *et al.*, 2004).

1.4 Ziele dieser Arbeit

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich hauptsächlich der sonnenlicht-induzierten Chlorophyll-Fluoreszenz (CF) und den sie beeinflussenden Faktoren. Somit soll vor allem der Zusammenhang CF und Photosyntheserate ausgeleuchtet werden, insbesondere in Bezug auf die photosynthetisch aktive Strahlung, dem Chlorophyllgehalt und anderen biotischen und abiotischen Faktoren und Stressoren wie Wasserverfügbarkeit, Krankheitsdruck usw..

Die Vision dabei war, anhand der durchgeführten Grundlagenforschung die CF sowohl in der Physiologie als auch im Precision Farming einer praktischen Anwendung zuzuführen. Als Konsequenz würde das im Idealfall die Entwicklung einer aussagekräftigen Methodik zur Datenerfassung und deren Auswertung, folgender Diagnose und Empfehlung der nötigen Kulturmaßnahme in größeren Schlägen nach sich ziehen. Diese Daten könnten dann von einem Flugzeug oder sogar von einem Satelliten aus aufgenommen werden, aber auch genauso von einem handgehaltenen Spektrometer – wie für diese Arbeit geschehen.

Aufgrund der sehr hohen Variabilität der CF auf den verschiedenen Schlägen wurde die Grunddatenerfassung auf kleineren Flächen begonnen, um diese dann zu korrelieren. Dazu wurden zuerst methodische Versuche durchgeführt. Danach wurde der Verlauf der CF und der Photosyntheserate sowie weitere abiotische und biotische Faktoren im Tagesgang in unterschiedlichen Nutzpflanzenarten unter verschiedenen Streßbedingungen untersucht. Diese Grundlagendaten wurden mit Referenzdaten, z.B. dem N-Gehalt verglichen.

Die sonnenlicht-induzierte Chlorophyll-Fluoreszenz könnte also auf Basis der bisher aufgeführten Ergebnisse und Aussagen durchaus das Potential haben, ein weiterer Meilenstein für die Fernerkundung zu sein. Die berührungslose, durch ein passives Meßverfahren durchgeführte Bestimmung von tagesvariablen Größen wie die Photosynthese durch die CF könnte so wertvolle Daten liefern, die einerseits zur Erforschung der Pflanzenphysiologie beitragen könnten, andererseits eine Optimierung des Produktionsprozesses unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten möglich machen könnten.

2 Material und Methoden

Für diese Arbeit wurden unterschiedliche Freilandversuche durchgeführt. Dabei sollte nicht nur die Abhängigkeit der sonnenlicht-induzierten Chlorophyll-Fluoreszenz (CF) von verschiedenen Faktoren (PAR, Chlorophyllgehalt etc.) untersucht werden, sondern auch in mehrfaktoriellen Feldversuchen der funktionale Zusammenhang zwischen abiotischen und biotischen Streßfaktoren (Stickstoffmangel, Krankheitsdruck sowie Wassermangel) und der CF erfaßt werden. Hauptgeräte hierzu waren ein handgehaltenes Spektroradiometer und ein Photosynthesemeßgerät. Daneben kamen Geräte für die Messung des Grünheitsgrades der Blätter und der Bestandesdichte zum Einsatz. Außerdem wurden zahlreiche Blattproben für Laboranalysen entnommen.

2.1 Geräte

2.1.1 Spektroradiometer

Zur Erfassung der CF wurde ein handgehaltenes Spektroradiometer eingesetzt: Das darin enthaltene passive Sensorensystem nahm nacheinander zuerst die Bestandesrückstrahlung (Emission) und dann die Sonneneinstrahlung (Immission) auf. Zwischen beiden Meßvorgängen war ein Shutter aktiv, um die zweite Messung vor einem eventuell auftretenden Lichteinfluß durch die erste Messung im Gerät abzugrenzen.

Das zweikanalige Spektroradiometer war eine Spezialanfertigung der Firma tec5 (Oberursel) in Zusammenarbeit mit der Firma Zeiss. Es bestand aus zwei Kasteneinheiten, der Zentraleinheit und der Kopfeinheit. Die handgehaltene Kopfeinheit wurde über den Bestand geführt und besaß eine angeflanschte optische Empfangseinheit und zwei Objektive mit dem Shutter (Abb. 5). Der Öffnungswinkel des unteren Objektivs betrug 25° , so daß das Spektrometer, in einem mittleren Meßabstand von 90 cm über die Bestandesoberfläche gehalten, eine Fläche von $0,125 \text{ m}^2$ erfaßte. Nach LIEBLER (2003) waren sieben Wiederholungen nötig, um eine Parzelle repräsentativ zu erfassen, was einer gemessenen Fläche von $0,875 \text{ m}^2$ pro Parzelle entspricht. Das obere Objektiv nahm die Einstrahlung mit einem Öffnungswinkel von 180° auf.



Abbildung 5. Außenansicht des Spektrometers. Oben die schultergetragene Zentraleinheit, darunter das Kopfteil mit Tastatur, Punktwasserwaage und den Objektiven (Foto: E. Stickse).

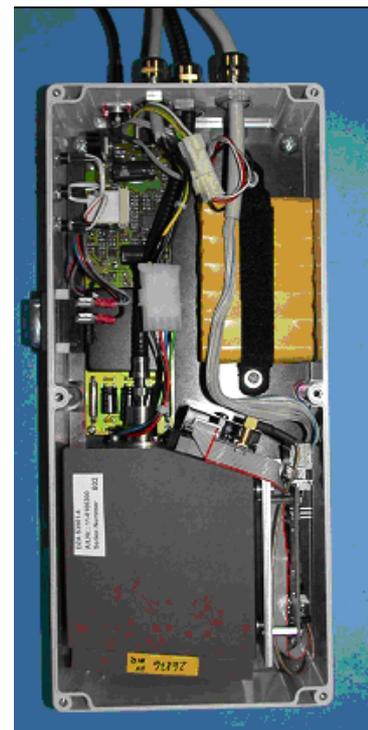
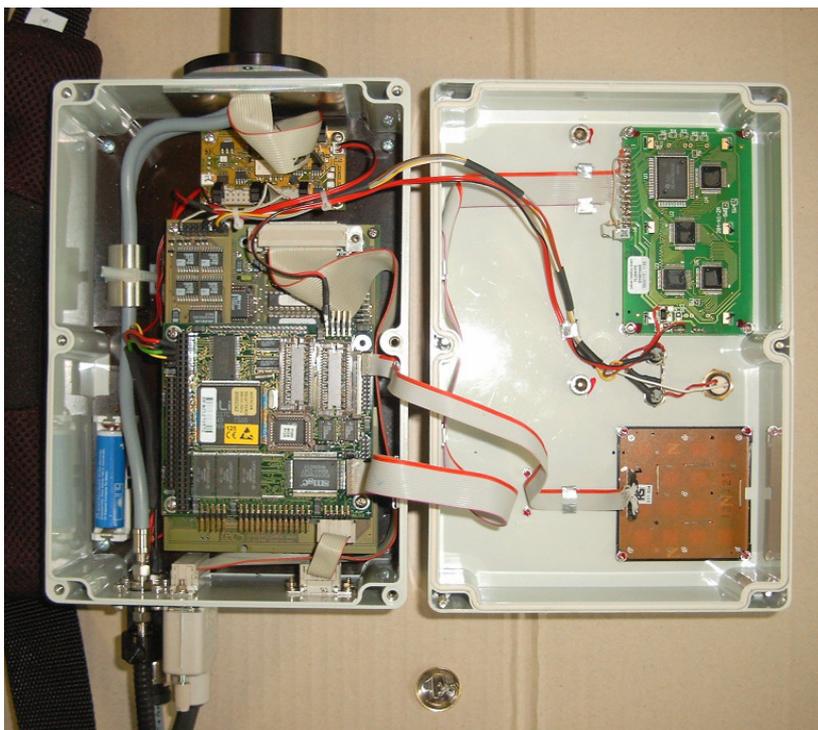


Abbildung 6. Innenansichten der beiden Einheiten des Spektrometers. Links: Kopfteil mit Computer und Kabeln zu den Objektiven hinführend (oben). Rechts: Zentraleinheit mit Batterie (gelb) und den Spektrometereinheiten (Fotos: E. Stickse).

Das schultergetragene Basissystem (Abb. 6, rechts) enthielt einen Spektrolsensor MCS VIS (Carl Zeiss; Multi Channel Spektrometer), eine Rechereinheit und die Auswertelektronik sowie eine Stromversorgungseinheit. Ein Adapter wandelte den Strom in 24 V bzw. 2,5 A um. Die Akkulaufzeit war auf maximal drei Stunden

beschränkt. Das mehrstündige und vollständige Aufladen geschah deswegen am besten über Nacht.

Die Integrationszeit für eine Messung konnte je nach Einstrahlungsstärke zwischen 14 und 6.500 msec gewählt werden, wobei die ideale maximale Aufnahmeintensität zwischen 50 bis 70 % betragen sollte, welche auch im Display der Kopfeinheit angezeigt wurden. Niedrigste Integrationszeiten von 250 bis 300 msec wurden nur bei sehr hohen Einstrahlungsstärken von mehr als 2.000 $\mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ erreicht (s. Abb. 7), was an einigen wenigen äußerst strahlungsreichen Tagen zur Mittagszeit der Fall war. Höchste Integrationszeiten von 6.500 msec waren nur bei Bestrahlungsstärken mit mehr als 500 $\mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ sinnvoll, zumeist also ca. eine Stunde nach Sonnenaufgang und vor Sonnenuntergang.

Tabelle 1. Technische Daten des Spektrometers (tec5, Oberursel)

<u>Basissystem</u>	
Spektrale Kanäle	Ein Kanal (Sonneneinstrahlung + aktiver Shutter + Bestandesrückstrahlung)
Spektralbereich	400 - 820 nm
Spektrale Auflösung	0,8 nm Pixeldispersion
Integrationszeit (Meßzeit)	14 – 6.500 msec
Auflösung (Rayleigh-Kriterium)	$\Delta\lambda_{\text{Rayleigh}} = \text{ca. } 2,4 \text{ nm}$
Datenspeicher	ca. 1 MB Flash (ca. 1500 Messungen)
Schnittstelle	seriell über COM1
Anzeigedisplay	LCD-Display vierzeilig; jeweils 20 Zeichen
Eingabetastatur	4 x 4 Matrixtastatur
Gehäuse	stabiles Kunststoffgehäuse (IP 54), 24 x 16 x 120 cm
Gewicht	ca. 4 kg
<u>Meßsonde</u>	
Sondenausführung	zweikanalig; Referenzkanal mit Cosinus-Streuscheibe und Meßkanal mit LWL-Empfänger, Öffnungswinkel 25°
Lichtführung	interne Lichtwellenleiter im Sonderkörper
Aufnahmeort	angeflanscht an der Frontseite des Basissystems
Ausführungsform	T-förmig, ca. 250 mm lag, Aluminium schwarz eloxiert
Gewicht	ca. 1,5 kg
<u>Adapter</u>	
Input	AC 100-240 V, 1,5 A, 60-50 Hz
Output	DC 24 V, 2,5 A

Beide Messungen nacheinander nahmen also die zweifache Integrationszeit in Anspruch. Der Shutterintervall und die Zeit, die das Spektrometer benötigte, um die Daten zu verrechnen und zu speichern (Interpolation), verlängerten die Dauer eines Meßvorgangs entsprechend. So konnte ein Meßvorgang im ersten Versuchsjahr (2002) bei höchster Integrationszeit (6,5 sec) bis zu 20 sec dauern, da die Daten in dem integrierten Computereinheit gleich verrechnet wurden. Entsprechend konnte es 1,5 Stunden in Anspruch nehmen, um 40 Parzellen mit sieben Meßvorgängen pro Parzelle bei dieser Integrationszeit zu messen, eingerechnet auch die Zeit, die es brauchte, um den Meßausschnitt zu wechseln, die neue Parzelle numerisch zu kodieren oder die Integrationszeit neu anzupassen. Ab dem zweiten und dritten Versuchsjahr (2003 und 2004) wurden die Meßdaten in der Computereinheit nur noch als Rohdaten gespeichert und nicht mehr verarbeitet, was eine erhebliche Verkürzung eines Meßvorgangs bedeutete. Das Objektiv wurde mit Hilfe einer Punktwasserwaage immer exakt horizontal über den Bestand gehalten.

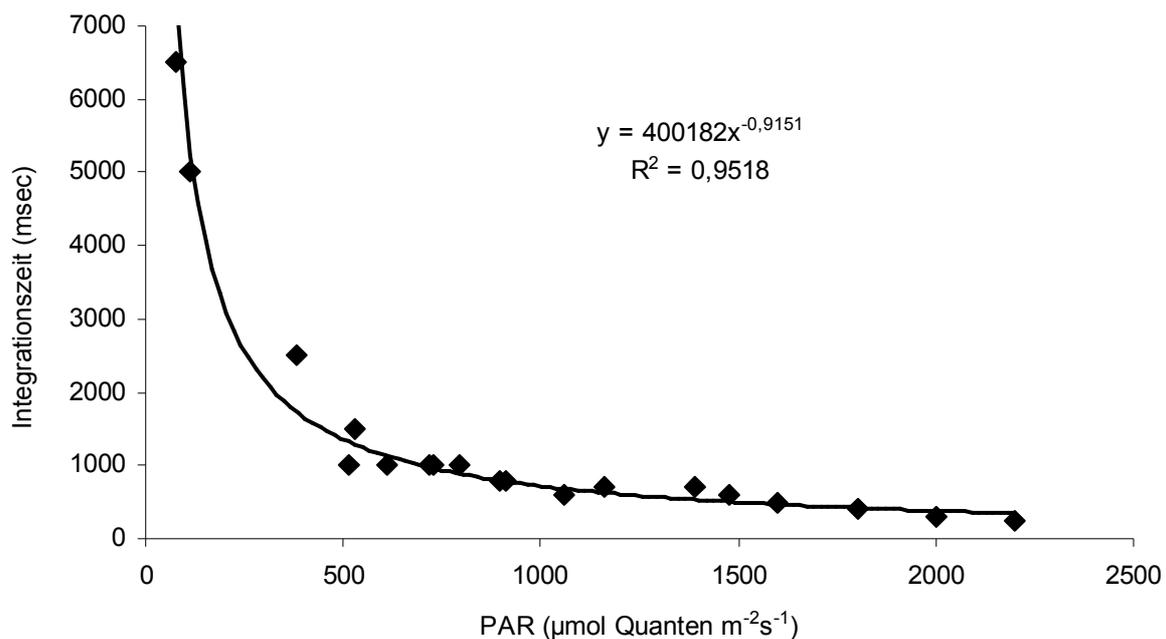


Abbildung 7. Optimale Integrationszeiten bei entsprechender Einstrahlung (y-Achse: Integrationszeiten des Spektrometers, x-Achse: zeitgleiche Messungen der Sonneneinstrahlung durch den LI-COR 6400).

Der Meßbereich des Spektrometers lag im Wellenlängenbereich von 400 bis 820 nm mit der hochfeinen Auflösung von 0,8 nm. Für jede der beiden Signaturen (Bestandesrückstrahlung und Sonneneinstrahlung) wurden so insgesamt 526 Einzeldaten erfaßt, welche je eine charakteristische Form und Ausprägung

aufwiesen: Die Signatur der Sonneneinstrahlung hatte ihr Maximum bei 450 nm und fiel bis 820 nm kontinuierlich ab (Abb. 8). Die kleinen Schwankungen kamen durch Aerosole und andere Partikel in der Atmosphäre zustande, welche einen Teil der Einstrahlung absorbierten. Die Signatur der Bestandesrückstrahlung war sehr viel niedriger und verlief zwischen 500 und 600 nm leicht hügelartig und stieg ab 685 nm leicht an.

Bei 762 nm im Bereich der Sauerstoffabsorptionsbande trat bei der Signatur der Sonneneinstrahlung ein lokales Minimum auf (Abb. 8): Bei dieser Wellenlänge wurde der größte Teil des einfallenden Sonnenlichts durch den atmosphärischen Sauerstoff (O₂) absorbiert. Entsprechend fand sich auch bei der Signatur der Bestandesrückstrahlung ein lokales Minimum im Bereich der Sauerstoffabsorptionsbande, das fast so hoch war wie das Minimum der Signatur der Sonneneinstrahlung.

Um die Reflexionssignatur zu erhalten, wurden die Daten von Sonneneinstrahlung und Bestandesemission mit einem gerätespezifischen BaSO₄-Weißstandard mit Hilfe eines von der Firma tec5 mitgelieferten Makros folgendermaßen verrechnet:

$$\text{Reflexionssignatur} = (\text{Einstrahlung} / \text{Rückstrahlung}) / \text{Weißstandard}$$

Die formspezifische Reflexionssignatur (Abb. 8) zeigte von 400 bis 685 nm ein niedriges Niveau, da der Pflanzenbestand in dieser Region die meiste Sonnenstrahlung absorbierte und deswegen wenig Strahlung emittierte. Im Bereich mit Wellenlängen größer als 685 nm wurde wenig Sonnenlicht absorbiert und viel Strahlung emittiert, weswegen die Reflexionssignatur in diesem Bereich hoch war. Diese Erscheinung im Bereich von Wellenlängen größer als 685 nm wird auch als Nahinfrarotschulter bezeichnet.

Im Bereich der Absorptionsbande des atmosphärischen Sauerstoffs (762 nm) waren die Signaturen der Sonneneinstrahlung und der Bestandesrückstrahlung von lokalen Minima geprägt, die sehr nah beieinanderlagen (Abb. 9). In diesem Bereich war aufgrund der geringen Einstrahlung der Anteil der sonnenlichtinduzierten Fluoreszenzstrahlung im Vergleich zu der vom Bestand reflektierten Strahldichte so hoch, daß ein lokales Maximum bei 760 nm in der Reflexionssignatur verursacht wurde. Dieses Maximum drückte sich als kleiner Peak auf der Nahinfrarotschulter sitzend aus (Abb. 8 und 9). Die Höhe dieses Fluoreszenzpeaks bei 760 nm ergab

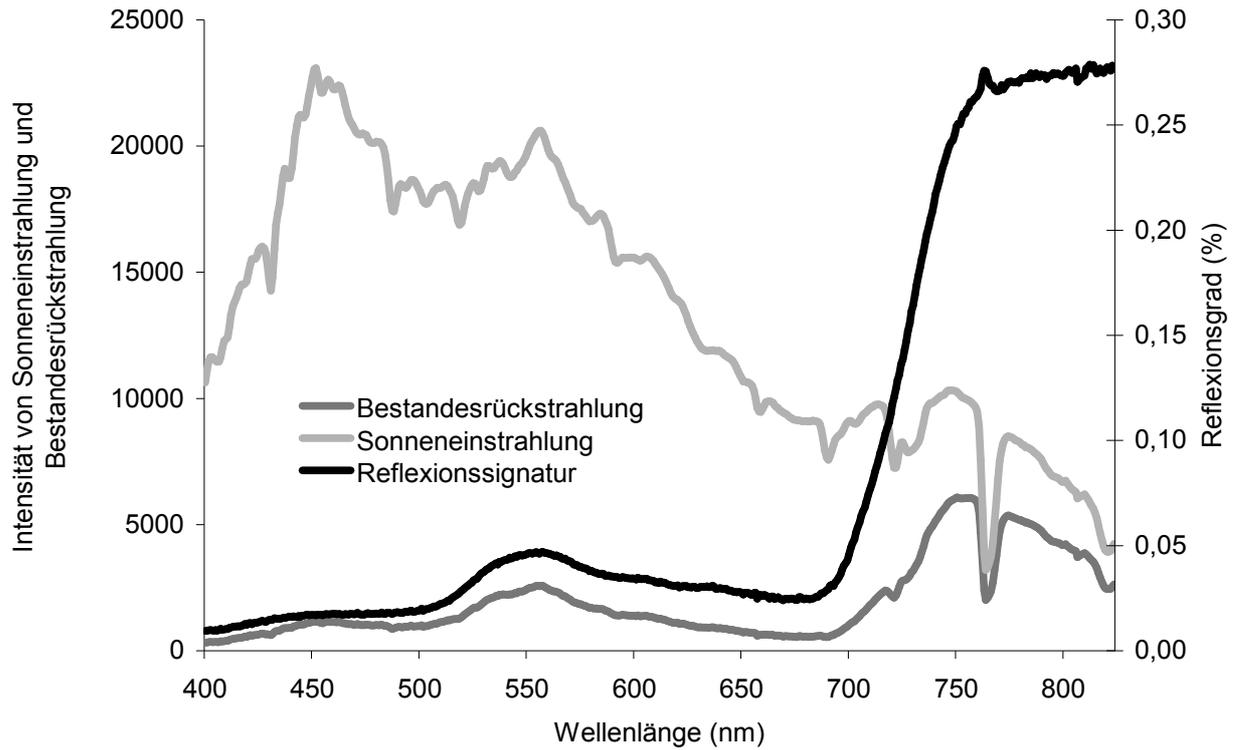


Abbildung 8. Signaturen von Sonneneinstrahlung, Bestandesrückstrahlung und Reflexion eines *Triticale*-Bestandes

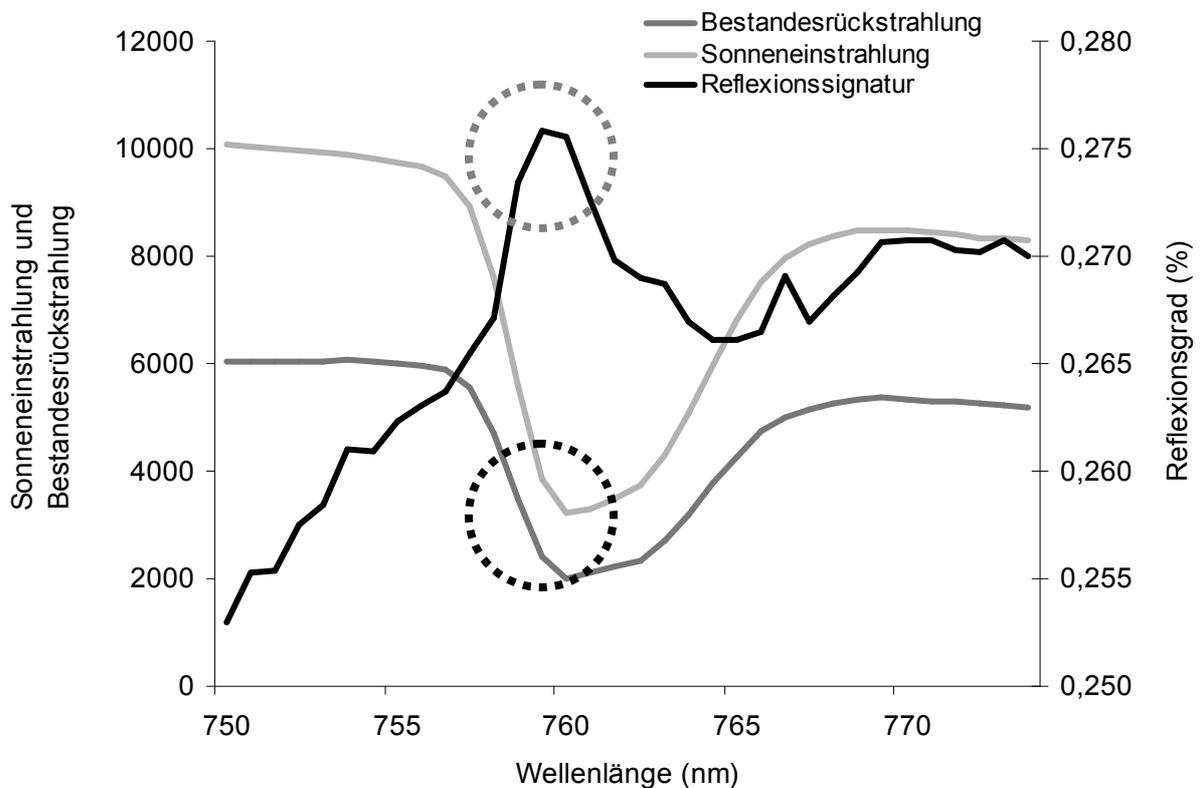


Abbildung 9. Detail der Signaturen von Sonneneinstrahlung, Bestandesrückstrahlung und Reflexion im Bereich der Sauerstoffabsorptionsbande eines *Triticale*-Bestandes (Detail von Abb. 8)

sich aus dem Verhältnis zwischen der relativ schwach eingestrahlten Sonnenenergie und dem dafür reichlich emittierten Fluoreszenzlicht.

MAIER *et al.* (1999, 2003) nutzten diesen Effekt bei der Ableitung der sonnenlicht-induzierten Chlorophyll-Fluoreszenz (CF) aus folgenden Werten der Signaturen von Sonneneinstrahlung (Immission) und Bestandesrückstrahlung (Emission) mit der Formel:

$$CF = \frac{E_1 - \frac{I_1}{I_2} * E_2}{1 - \frac{I_1}{I_2}}$$

(nach MAIER *et al.*, 2003)

E_1 = Intensität der Bestandesrückstrahlung benachbart zur O_2 -Absorptionsbande
= ((754 nm + 766 nm) / 2) der Emission

E_2 = Intensität der Bestandesrückstrahlung in der O_2 -Absorptionsbande
= 760 nm der Emission

I_1 = Intensität der Sonneneinstrahlung benachbart zur O_2 -Absorptionsbande
= ((754 nm + 766 nm) / 2) der Immission

I_2 = Intensität der Sonneneinstrahlung in der O_2 -Absorptionsbande
= 760 nm der Immission

Dabei wurden die Wellenlängen in und direkt „neben“ der Sauerstoffabsorptionsbande gewählt, um die Intensitäten der beiden Signaturen miteinander in ein Verhältnis setzen zu können. Obenstehende Formel stellte die eigentliche Fluoreszenz dar, und nicht die Peakhöhe: Mit der Bezugsetzung von E_2 zu E_1 bei gleichzeitiger Einbeziehung der Bezugsetzung von I_2 zu I_1 wurde der Effekt herausgefiltert, wie stark der Bestand „normalerweise“ bei dieser und jener Sonneneinstrahlung reflektieren würde. Denn der Quotient I_1/I_2 zeigte an, wieviel Sonnenlicht neben der O_2 -Absorptionsbande bezüglich der Menge in der O_2 -Absorptionsbande eingestrahlt wurde. Genauso war es beim Quotienten E_1/E_2 , der bei der Rückrechnung der Formel entstand: Er zeigte die Intensität der Bestandesrückstrahlung neben der O_2 -Absorptionsbande bezüglich der Intensität der

Bestandesrückstrahlung in der O₂-Absorptionsbande an. E1, E2, I1 und I2 wurden als weitestgehend miteinander synchron gleitende Größen angenommen. Je mehr also E2 bzw. E1/E2 von I1/I2 abwich, d.h. je größer der Ergebniswert dieser Formel war, desto stärker fluoreszierte der Bestand.

Diese passive Methodik der Ableitung der Fluoreszenz von Messungen der Sonneneinstrahlung und Bestandesrückstrahlung machte es möglich, die Fluoreszenz von grüner Vegetation unter natürlichen Bedingungen und ohne zusätzliche experimentelle Veränderungen zu erfassen, wie z.B. die Anpassung der Beleuchtungsquelle (MAIER *et al.*, 2003). In der Sauerstoffabsorptionsbande wird die sonnenlicht-induzierte Chlorophyll-Fluoreszenz außerdem nicht durch andere atmosphärische Einflüsse gestört.

2.1.2 LI-COR 6400

Der LI-COR 6400 (Abb. 10) der Firma LI-COR inc. (Lambda-Instruments Corporation, Lincoln, Nebraska) war ein tragbares Photosynthesemeßgerät, das im Freiland die Nettophotosyntheserate, stomatäre Leitfähigkeit, photosynthetisch aktive Strahlung (PAR), Transpiration und Temperatur aufzeichnen konnte. Es bestand aus einer Zentraleinheit und einem Meßkopf, in dessen Blattkammer das Blatt eingespannt wurde. Beide Einheiten waren für Stromversorgung, Gaszuführung und Datenübermittlung miteinander verbunden. Die Zentraleinheit stellte 128 MB Arbeitsspeicher und 164 MB Speicherplatz zur Verfügung. Die durch eine Gummimembran geschützte komplette ASCII-Tastatur und das graphische LCD-Display ließen eine leichte Bedienung des Geräts zu.

Die Gasanalysatoren in der im Meßkopf integrierten Blattkammer maßen die Absorption eines gebündelten Infrarotlichtstrahls durch die unterschiedlichen CO₂- und H₂O-Gasgemische, welche dann auf dem Display als Werte der Photosyntheserate ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) und der Transpirationsrate ($\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) erschienen. Dabei handelte es sich um Echtzeitdaten („Real time data“), da bei diesem Photosynthesemeßgerät direkt am Blatt gemessen wurde, im Gegensatz zu anderen Geräten, bei denen das zu messende Gas erst von der Blattkammer durch eine Röhre zu den Gasanalysatoren wandern mußte. Dasselbe galt für die Kontrolle und Anpassung der Gasgemische, welche durch das Fehlen von Zuführungsröhren ohne größere Zeitverzögerung erfolgen konnte. Die Blatt- sowie die Lufttemperatur wurden mit speziellen Sensoren (Thermistoren) gemessen. Außerdem konnte das

Gerät automatisch Messungen in definierten Zeitabständen ausführen bzw. Verlaufskurven der verschiedenen Variablen in gewünschter Kombination anzeigen.

Tabelle 2. Gemessene Parameter des LI-COR 6400 und ihre Einheiten

Parameter	Abkürzung	Einheit
Transpirationsrate	Trans	mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹
Stomatäre Leitfähigkeit	StomCond	mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹
Nettophotosyntheserate	PHS	μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹
PAR, innerhalb der Blattkammer gemessen	PAR _{innen}	μmol Quanten m ⁻² s ⁻¹
PAR, mit Quantensensor gemessen	PAR _{außen}	μmol Quanten m ⁻² s ⁻¹
Lufttemperatur	T _{Luft}	°C
Blattemperatur	T _{Blatt}	°C

Die Messung der Nettophotosyntheserate (CO₂-Aufnahme in μmol m⁻²s⁻¹) fand standardmäßig an einer Blattfläche von 6 cm² in unmittelbarer Blattnähe im Meßkopf statt, wobei die zu messende Blattgröße in ganzen Quadratzentimeterschritten angepaßt werden konnte, z.B. bei einem Gerstenblatt, das zu schmal war, um die Gesamtfläche der Blattkammer auszufüllen. Das Gerät arbeitete im Gegensatz zu anderen Photosynthesemeßgeräten mit einem offenen System, d.h. mit einem Luftstrom (Abbildung 10). Zuerst stellte der LI-COR 6400 ein vom Benutzer definiertes Gasgemisch her. Nach CO₂-Entzug im Zentralteil wurde die angesaugte Luft entwässert und ihr eine definierte Menge CO₂ aus einer CO₂-Patrone zugefügt. Nach Durchfließen der CO₂-Flußkontrollkammer wurde das nun definierte Gasgemisch durch eine Flußmengenkontrollkammer gepumpt und verteilte sich im Verhältnis 1:3 auf Referenz- bzw. Blattkammer im Meßkopf. Das Blatt wurde während der Messung mit diesem Gasgemisch umspült.

Die CO₂-Konzentration wurde alle zwei bis drei Sekunden dem neuesten Stand angepaßt, so daß sie um bis zu 5 μmol CO₂ m⁻²s⁻¹ um den eingegebenen Wert abweichen konnte, was kurzfristige Schwankungen der Variablen, v.a. der Photosyntheserate, bei sich sehr schnell verändernden Umweltbedingungen zur Folge hatte. Die Änderung der CO₂-Konzentration durch die Photosynthese wurde dann für die Messung mit dem unveränderten Gasgemisch in der separaten Referenzkammer verglichen. Danach wurde die verbrauchte Luft aus dem Meßkopf entlassen.

Der LI-COR 6400 nahm zwei verschiedene Einstrahlungsstärken auf: Ein GaAsP Sensor maß die photosynthetisch aktive Strahlung (PAR_{innen}) in der Blattkammer

selbst, die äußere Sonneneinstrahlung ($PAR_{\text{au\ss en}}$) wurde von einem auf dem Meßkopf angebrachten Quantensensor eingefangen. Bevorzugt wurde für die Auswertungen der Spektrometerdaten $PAR_{\text{au\ss en}}$, da ja auch das Spektrometer die unbeeinflusste Sonneneinstrahlung erfaßt. Für die Daten des LI-COR 6400 (v.a. die PHS) wurde PAR_{innen} als Referenz verwendet, da das in der Blattkammer eingespannte Blatt und damit die Photosyntheserate und andere Parameter wie die PAR_{innen} durch die über die Blattkammer gespannte transparente Folie vermutlich Veränderungen unterlagen. Die Unterschiede zwischen PAR_{innen} und $PAR_{\text{au\ss en}}$ betragen z.T. bis zu $400 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$, je nach Sonnenstand und Einstrahlungsstärke.

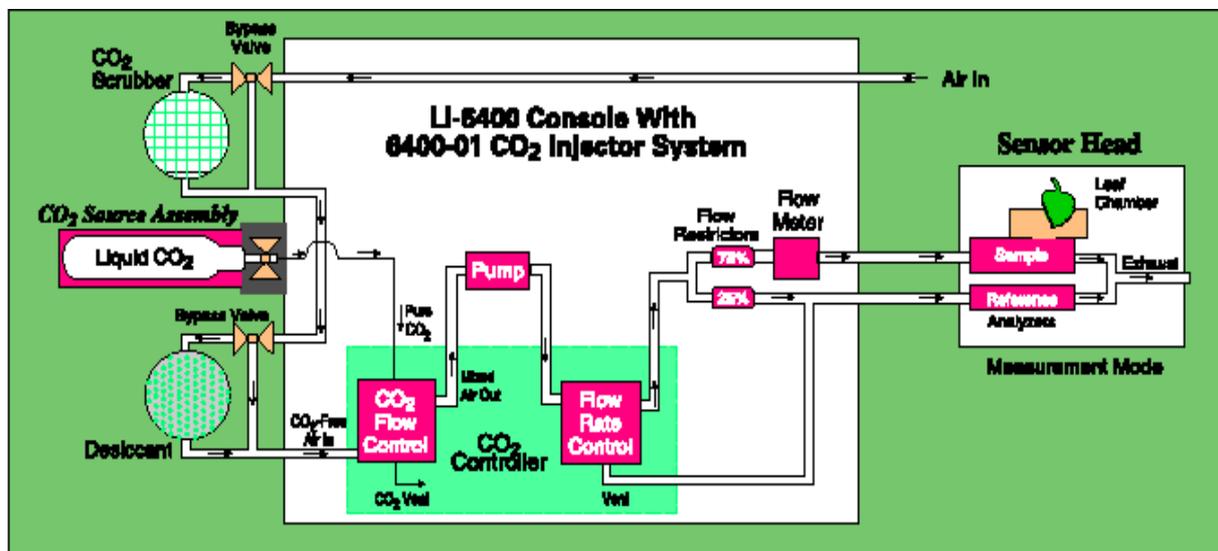


Abbildung 10. Funktionsschema des Gasstromes im LI-COR 6400 (© LI-COR inc.)

Um eine Parzelle mit dem LI-COR 6400 repräsentativ zu erfassen, waren erfahrungsgemäß fünf Messungen an fünf verschiedenen Blättern nötig. Hinzu kam, daß durch das Öffnen der Blattkammer für den Blattwechsel das Mikroklima in der Blattkammer empfindlich gestört wurde. Das Gasmisch mußte nach dem Wiederverschließen der Blattkammer mit dem neuen Blatt erst wieder durch das Gerät auf die konstanten Werte angepaßt werden, damit mit den Messungen fortgefahen werden konnte. Es konnte so im Extremfall bis zu 25 Minuten dauern, um eine ganze Parzelle anhand von fünf Blättern zu erfassen. Dadurch war der LI-COR 6400 der vor allem zeitlich limitierende Faktor für die Dauer eines Meßdurchlaufs sowie der Anzahl der erfaßbaren Parzellen und dadurch der Anzahl an Meßkampagnen pro Tag. Von ähnlichen Erfahrungen berichteten auch GAMON *et al.* (1997), was sich negativ auf den Vergleich ihrer Ergebnisse auswirkte,

da die Messungen von CO₂-Assimilation und die spektralen Messungen nacheinander angefertigt wurden und zwischen diesen mehr Zeit als gewünscht lag und sich inzwischen z.B. das Tageslicht verändert hatte.

Für eine zusätzliche Darstellung der Ergebnisse wurden zwei Parameter des LI-COR 6400 mit den Daten aus anderen Quellen in drei Kombinationen verknüpft:

Photosyntheseeffizienz (PE)

Aus den Daten von Photosyntheserate und photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR_{innen}) ließ sich die Photosyntheseeffizienz (PE), an FILELLA *et al.* (1996) angelehnt, errechnen:

$$\begin{aligned}\text{Photosyntheseeffizienz (PE)} &= \text{Photosyntheserate} / \text{PAR}_{\text{innen}} \\ &= \mu\text{mol fixiertes CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1} / \mu\text{mol Lichtquanten m}^{-2}\text{s}^{-1} \\ &= \mu\text{mol CO}_2 / \mu\text{mol Lichtquanten}\end{aligned}$$

Die Photosyntheseeffizienz ist also nach obenstehender Formel die Menge (μmol) an fixiertem CO₂ $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ pro μmol eingestrahlteten Lichtquanten $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Ein nach dieser Formel berechneter Wert der Photosyntheseeffizienz von z.B. 0,0088 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ pro μmol eingestrahlteten Lichtquanten $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ könnte auch folgendermaßen ausgedrückt werden: In diesem Falle wurden von der Pflanze 113,64 (= 1 / 0,0088) μmol Lichtquanten $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ benötigt, um 1 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ zu fixieren.

Photosyntheserate relativiert auf den Chlorophyllgehalt

Vor allem bei den Stickstoffsteigerungsversuchen kamen unterschiedliche Chlorophyllgehalte bei den Varianten zustande. Zur Darstellung, wieviel CO₂ ein mg Chlorophyll a zu einem bestimmten Zeitpunkt produziert, wurde die Photosyntheserate mit folgender Gleichung auf den Chlorophyllgehalt relativiert:

$$\text{PHS} / \text{Chl a} (\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1} \text{ pro mg Chlorophyll a g}^{-1} \text{ FS}^{-1})$$

Hierbei handelte es sich nicht um absolute Zahlen, sondern um einen Quotienten, um weitere Tendenzen, als die einzelnen Parameter zu zeigen vermochten, herauszuarbeiten.

Fluoreszenzquantenausbeute (FQA)

Entsprechend wurde auch der Versuch unternommen, die Werte der CF mit denen der $PAR_{\text{außen}}$ abzugleichen. Spektrometrische Daten zur Bestimmung der PAR konnten hierbei nicht hinzugezogen werden, da das Spektrometer nicht kalibriert war. Die Berechnung der Fluoreszenzquantenausbeute (FQA) gestaltete sich folgendermaßen:

$$\begin{aligned} \text{FQA} &= \text{CF} / \text{PAR}_{\text{außen}} \\ &= \text{Menge an abgestrahlter CF pro eingestrahlem } \mu\text{mol} \\ &\quad \text{Lichtquanten m}^{-2}\text{s}^{-1} \end{aligned}$$

Auch hier sollten durch die Quotientenbildung weitere Tendenzen herausgearbeitet werden.

2.1.3 SPAD-Meter

Der SPAD-Meter („Soil and Plant Analyze Developments“) oder auch N-Tester der Firma Hydro Agri GmbH & Co. KG (Dülmen) war ein handgehaltenes Gerät, in dessen klippartigem Meßkopf die Blätter in schneller Abfolge direkt auf dem Feld gemessen werden konnten. Das Prinzip beruhte auf der Messung der Lichtdurchlässigkeit der Blätter im infrarotnahen und roten Spektralbereich. Die daraus errechneten Einzelwerte von 30 verschiedenen Blättern wurden als repräsentativer, dimensionsloser Durchschnittswert (Chlorophyll-Index) angezeigt, der eine enge Beziehung zur Chlorophyll- und zur N-Konzentration der Blätter aufwies (SCHEPERS *et al.*, 1992; PELTONEN *et al.*, 1995; WOLLRING *et al.*, 1998). Die Werte des SPAD-Meters waren proportional zur Chlorophyllmenge im Blatt korreliert. Bei einem hohen Wert konnte je nach Pflanzenart und -sorte von hohem Stickstoff- und Chlorophyllgehalt ausgegangen werden.

Entsprechend der Pflanzenart wurden die oberen zwei (bei Winterweizen) bis drei Blattetagen (Kartoffel) getrennt gemessen. Dabei galt das jüngste, voll ausgebildete Blatt als oberste Etage.

2.1.4 LAI-2000 Bestandesanalysator

Der LAI-2000 der Firma LI-COR inc. (Lamda-Instruments Corporation, Lincoln, Nebraska) wurde als schneller und berührungsloser Direktanalysator für die Messung der Blattfläche eines Bestandes eingesetzt. Der Blattflächenindex (BFI, englisch LAI -

Leaf Area Index) zeigte das Verhältnis der vorhandenen Blattfläche zur Bodenfläche an und galt damit als ein Maß für das Pflanzenwachstum. Dafür wurden abwechselnd Messungen an der Bodenoberfläche sowie an der Bestandesoberkante durchgeführt. Plausible Meßergebnisse waren nur unter stark begrenzten Witterungsbedingungen (keine direkte Sonneneinstrahlung, bewölkter Himmel, trockene Bestände) zu erzielen.

2.1.5 Abgewandelte und zusammengesetzte Vegetationsindizes

Speziell für diese Arbeit wurden einige Vegetationsindizes umgeändert bzw. miteinander kombiniert:

Photochemical Reflectance Index (PRI)

Für den PRI (Photochemical Reflectance Index) wurden die Wellenlängen (R₅₂₈ und R₅₆₇) aus Formel (a) in Formel (b) eingesetzt, so daß für diese Arbeit folgende Formel für die Berechnungen des PRI verwendet wurde:

$$\text{PRI} = (R_{567} - R_{528}) / (R_{537} + R_{528})$$

Im Gegensatz zu Formel (a) ergeben sich positive Werte, die mit der Aktivität des Xanthophyllzyklus anstiegen.

In Anlehnung an *Qi et al.* (1994), die Kombinationen bzw. diverse Entwicklungsstufen von verschiedenen Vegetationsindizes verwendeten, z.B. den MSAVI₂ (Modified soil-adjusted vegetation index 2), welcher vom SAVI (Soil-adjusted vegetation index, nach HUETE, 1988) herrührte, wurden die Vegetationsindizes CF, RVI, GNDVI und PRI in folgenden Kombinationen angesetzt:

Sonnenlicht-induzierte Chlorophyll-Fluoreszenz relativiert auf die Biomasse (CF/RVI)

Die Komplexität zu vieler sich unter anderem auch gegenseitig beeinflussenden Faktoren wie z.B. Bestandesstruktur, Mikroklima im Bestand, gegenseitige Beschattung der Blätter, unterschiedliche Photosynthese in Blättern, Blattstielen und Sproßachsen, usw. machte es nahezu unmöglich, die auf maximal 6 cm² gemessene Photosynthese auf einen ganzen Bestand hochzurechnen. Um die CF mit der PHS auf einer Ebene vergleichbar machen zu können, wurde sie durch Quotientenbildung mit dem RVI relativiert.

Dazu wurden die Mittagswerte des RVI herangezogen. Das Ergebnis des Quotienten CF/RVI gab die sonnenlicht-induzierte Chlorophyll-Fluoreszenz pro

Biomasseeinheit als einen dimensionslosen, durchschnittlichen Wert an, welche dann wiederum mit der auf 6 cm² gemessenen Photosyntheserate verglichen werden konnte.

Sonnenlicht-induzierte Chlorophyll-Fluoreszenz relativiert auf den Chlorophyllgehalt (CF/GNDVI)

Laut MAIER *et al.* (2003) war die sonnenlicht-induzierte Chlorophyllfluoreszenz unter anderem mit dem Chlorophyllgehalt korreliert. Sie stellten in ihren Ergebnissen CF und GNDVI gegenüber, um deren unterschiedlichen Informationsgehalt zu betonen. Demnach könnte auch der Quotient CF/GNDVI (Green Normalized Vegetation Index) dazu dienen, die Fluoreszenzabstrahlung relativiert auf die Chlorophyllkonzentration allein anhand von spektrometrischen Daten abzuleiten. Dafür wurden wie bei dem Quotienten CF/RVI die Mittagswerte des GNDVI verwendet.

Sonnenlicht-induzierte Chlorophyll-Fluoreszenz relativiert auf die Aktivität des Xanthophyllzyklus (CF/PRI)

Bei den beiden vorhergehenden Quotienten bezog sich ein tagesvariabler Vegetationsindex (CF) auf einen tageskonstanten Vegetationsindex (RVI, GNDVI). Bei dem Quotienten CF/PRI trafen nun zwei tagesvariable Vegetationsindizes aufeinander: Der Xanthophyllzyklus dient dazu, überschüssige Sonnenenergie vor dem Auftreffen auf das Photosystem abzuleiten. Die Aktivität des Xanthophyllzyklus kann anhand des PRI (Photochemischer Reflektionsindex) abgeleitet werden (GAMON *et al.*, 1992; GAMON *et al.*, 1995). Es stellte sich die Frage, inwieweit die CF mit dem Xanthophyllzyklus verknüpft ist, denn beide sind – wenn auch unterschiedliche – Mechanismen der Pflanze, um überschüssige Sonnenenergie abzuleiten. Der Quotient CF/PRI kann die Intensität an abgestrahlter Fluoreszenz pro Mengeneinheit an Zeaxanthin (durch übermäßige Einstrahlung umgewandelt) im Xanthophyllzyklus anzeigen und neben den Vegetationsindizes CF und PRI wertvolle Erkenntnisse liefern.

Die hier vorgestellten neuen Quotienten CF/RVI, CF/GNDVI und CF/PRI waren dimensionslos und sollten die Ergebnisse verschiedener Geräte zwischen den verschiedenen Versuchsvarianten vergleichbar machen, welche weiter unten beschrieben sind.

2.2 Pflanzenmaterial

Die untersuchten Pflanzenbestände wurden unter folgenden Gesichtspunkten ausgewählt:

Für die Messungen mit dem Spektrometer sollte der Pflanzenbestand möglichst eine geschlossene Blätterdecke haben, damit das störende Bodensignal ausgeschlossen werden konnte. Zu geringe EC-Stadien waren also ungeeignet, da hier das Bodensignal überwiegen würde. Planophile Bestände waren aufgrund ihrer dem Spektrometer horizontal zugewandten Blattfläche besser meßbar, da dann die Bestandesrückstrahlung vor allem nach oben gerichtet war. Bei erectophilen Beständen und Beständen, deren nach oben gerichtete Blätter z.B. nach außen gekrümmt waren, strahlte der Bestand auch in andere Richtungen ab, so daß die Ausbeute durch den Spektrometer geringer ausfiel. Blüten im Bestand wie z.B. die weißen Blüten der Kartoffel wurden als nicht störend angesehen, da diese ja dann auch beim zukünftigen praktischen Einsatz des Spektrometers vorhanden sein würden.

Für die Messungen mit dem LI-COR 6400 waren Blätter mit einer Fläche von ca. 3 x 4 cm² ideal, da sie die 2 x 3 cm² große Blattkammer ganz ausfüllten. Dadurch mußten die Werte nicht an die jeweilige Blattfläche angepaßt werden.

Die meisten bemessenen Pflanzenarten waren landwirtschaftlich bedeutsame Nutzpflanzenarten, wobei Mono- und Dicotyledonen zu gleichen Teilen vertreten waren. Die Meßperiode der meisten landwirtschaftlichen Nutzpflanzen beschränkte sich von Ende April bis Anfang September, da die Bestände z.B. am Ende der Meßperiode durch die fortschreitende Abreife entweder einen zu geringen Bodendeckungsgrad aufwiesen (s. Kartoffel) oder da bereits die Seneszenz zu weit fortgeschritten war, die Blätter also nur noch wenig oder gar kein Chlorophyll enthielten. Im Juli bzw. August wurden die Nutzpflanzenbestände sukzessive abgeerntet. Deswegen mußte auf weniger bedeutsame Pflanzenarten und sogar eine Unkrautart ausgewichen werden.

Neben der Wahl der Pflanzenarten war die in den jeweiligen Versuchen eminent vertretene oder auch induzierte Streßart (Stickstoffmangel, Krankheitsdruck und Wassermangel) ausschlaggebend. Mit dem LI-COR 6400 als limitierenden Faktor für die Variantenanzahl wurden weitestgehend die Extreme der einzelnen Streßarten ohne Zwischenstufen bemessen.

2.2.1 Methodische Versuche

Für die methodischen Versuche (Abdunklungsversuche usw., siehe weiter unten), die stattfanden, als die meisten landwirtschaftlichen Nutzpflanzen bereits abgeerntet waren, wurden Franzosenkraut- (*Galinsoga* ssp.) sowie Rapsbestände (*Brassica napus* L.) ausgewählt. Der wilde Bestand des Ackerunkrautes *Galinsoga* ssp. bildete mit seinen kreuzgegenständigen und planophilen Blättern einen geschlossenen Blätterteppich aus, auf dem die oberste voll ausgebildete Blattetage den Boden vollkommen verdeckte. Deswegen war es zu diesem Zeitpunkt ein ideales Objekt für die in den Abdunklungsversuchen ausnahmsweise auf denselben kreisrunden Fleck mit ca. 25 cm Durchmesser beschränkten Messungen mit dem Spektrometer. Der Bestand eines blattreichen Futterrapses bildete aufgrund seines leicht rosettenförmigen Habitūs mit mehreren von oben sichtbaren Blattetagen eine eher inhomogene Blätterdecke, wodurch kleinere Flächenteile des Bodens durch die Blätterdecke hindurchschienen, was in den spektrometrischen Daten ein Bodensignal verursachen könnte. Beide Arten, Franzosenkraut wie Futterraps, befanden sich zum Meßzeitpunkt noch im vegetativen Stadium (ca. BBCH 39).

Für die Untersuchungen über den Einfluß der Chloroplastenbewegung auf die sonnenlicht-induzierte Chlorophyll-Fluoreszenz wurde eine Pflanzenart gewählt, deren epidermiale Chloroplasten nicht nur – wie bei den meisten höheren Pflanzen – in den Stomata, sondern auch in den übrigen Epidermiszellen zu finden waren, und das nicht nur auf der Blattunterseite, sondern auch auf der Blattoberseite, damit diese direkt vom Sonnenlicht getroffen werden. Solche Eigenschaften vereinten sich in *Beta vulgaris* ssp. *vulgaris* var. *altissima*. Die Messungen fanden an den Blättern der Zuckerrübensorte 'Tatjana' statt, an den der Sonne zugewandten Blattabschnitten, von welchen dann auch die Epidermisabzüge an der Blattoberseite entnommen wurden.

Die Frischpräparate, entnommen aus der horizontal ausgerichteten Blattmitte, wurden nicht, wie sonst üblich, entlüftet, sondern sofort mikroskopiert, um ein „Verrutschen“ der Chloroplasten während des Entlüftungsvorgangs zu vermeiden. Entsprechend „unansehnlich“ und deswegen aussageschwach waren auch die Photographien, die zusätzlich zu den traditionellen Bleistiftzeichnungen angefertigt wurden. Die Anwendung des Feintriebs während der Anfertigung der Bleistiftzeichnungen ließ die sich in den tiefer und höher liegenden Regionen einer Zelle befindlichen Chloroplasten zahlenmäßig reichhaltiger sichtbar werden, was mit

einem Photo nur teilweise gelang, das mit seiner Tiefenschärfe nur eine Ebene ablichtete. Bei der tabellarischen Auswertung der Chloroplastenbewegung wurden die Anzahl der sichtbaren Chloroplasten der übrigen Epidermiszellen und die Anzahl der an den Zellwänden anliegenden Chloroplasten sowie deren Anteil an den sichtbaren Chloroplasten in % angegeben. Die Chloroplasten der Stomata blieben unberücksichtigt.

2.2.2 Stickstoffsteigerungsversuche

Eine gesteigerte N-Düngung hat eine erhöhte N-Aufnahme und damit einen höheren Chlorophyllgehalt zur Folge. Dies spiegelte sich auch in der Reflexionssignatur wieder, z.B. stieg der REIP mit zunehmender Biomasse an (STICKSEL *et al.*, 2004). Die Abhängigkeit der sonnenlicht-induzierten Chlorophyll-Fluoreszenz von der N-Düngung bzw. vom Chlorophyllgehalt wurde sowohl im Winterweizen als auch in der Kartoffel in verschiedenen Versuchsaufbauten untersucht.

2.2.2.1 N-Steigerungs- und Sortenversuch in *Triticum aestivum* L.

Die Winterweizensorten 'Pegassos' und 'Xanthos' wurden in zwei extremen N-Stufen (N_0 mit 0 kg N ha^{-1} und N_{220} mit 220 kg N ha^{-1}) angebaut, wobei die Auswirkungen der unterschiedlichen N-Düngung und der Blattstellung auf die Reflexionssignatur und die Vegetationsindizes gezeigt werden sollte. Beide Sorten unterschieden sich folgendermaßen:

'Pegassos': planophile Blattstellung, etwas heller grüne Farbe,

'Xanthos': erectophile Blattstellung, etwas dunkler grüne Farbe.

Insgesamt waren pro Sorte und Düngungsstufe 8 Parzellen vorhanden, was je Meßdurchgang 32 Parzellen ergab. Kombiniert mit den Düngungsstufen waren hier drei Merkmale (Düngungsstufe, Blattstellung, Sorte) in je zwei Ausprägungen (N_0 – N_{220} ; planophil – erectophil; hellgrün – dunkelgrün) gegeben, deren Auswirkungen auf die sonnenlicht-induzierte Chlorophyll-Fluoreszenz und andere Vegetationsindizes sowie Biomasse, Trockenmasse, Bestandesdichte usw. gezeigt werden sollten.

2.2.2.2 *Solanum tuberosum* L. cv. 'Selma'

Die Kartoffelsorte 'Selma' wurde in den Extremvarianten ohne (N_0) und mit einer hohen Gabe (N_{160}) an Kalkammonsalpeter in je fünf Wiederholungen in Parzellen zu $5 \times 3 \text{ m}^2$ angebaut. Mit dem Spektrometer wurden je 50 Messungen pro Variante (zehn Messungen pro Parzelle) durchgeführt. Mit dem LI-COR 6400 wurden in zwei repräsentativen Parzellen je fünf Blätter mit je zehn Messungen erfaßt. Diese Messungen fanden im Zweistundentakt über den Tag verteilt statt, wobei zuerst mit dem LI-COR 6400, dann mit dem Spektrometer gemessen wurde. Die Meßperiode dauerte vom 22.07.2003 bis 08.08.2003; in diesem Zeitraum wurden wöchentlich Proben für die N- und Chlorophyll-Analyse entnommen sowie mit dem N-Tester gemessen.

2.2.3 Versuche zur Krankheitsfrüherkennung

Bestimmte Krankheiten können die Verminderung des Chlorophyllgehalts durch z.B. Chlorosen oder Nekrotisierungen nach sich ziehen, womit sich auch die Photosyntheseleistung eines Pflanzenbestandes ändern kann. Die Änderung von beidem, Chlorophyllgehalt und Photosyntheserate, somit auch einen Einfluß auf die Fluoreszenzabstrahlung, respektive die CF. Deshalb waren Versuchsreihen ideal, die neben einer unbehandelten Variante („Kontrolle“), bei der diverse Krankheitssymptome auftraten, auch unterschiedlich behandelte Varianten beinhalteten, bei denen dann ebendiese Krankheitssymptome sehr vermindert oder gar nicht auftraten. Dabei ging es primär um die Feststellung, ob und wann ein unterschiedliches Photosynthese- und Fluoreszenzverhalten zwischen der erkrankten Kontrolle und den behandelten Varianten auftrat, um Daten herzuleiten, die eine Krankheitsfrüherkennung mit spektrometrischen Daten möglich machen würden.

In der Braugerstensorte 'Duet' traten unter anderem folgende wirtschaftlich bedeutsame Krankheiten auf, die mit entsprechenden Fungiziden im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle behandelt wurden:

2.2.3.1 Aufgetretene Krankheiten

Netzfleckenkrankheit (*Drechslera teres*)

Die Netzfleckenkrankheit (*Drechslera teres* = *Pyrenophora teres* = *Helminthosporium teres*) der Gerste verursacht braun-schwarze längliche Flecken,

die im durchscheinenden Licht eine Netzstruktur aufweisen (Netztyp). Der Spottyp zeigt punktförmige Flecken. Diese sind vom gesunden Gewebe durch gelbliche Umrandungen abgegrenzt und schließen sich zu braunen Streifen zusammen, bis ganze Blätter absterben. Die Netzfleckenkrankheit tritt v.a. an Blättern, aber auch an Ähren auf.

Blattfleckenkrankheit (*Rhynchosporium secalis*)

Die Symptome der Blattfleckenkrankheit finden sich in den Blattachseln und auf den Blattspreiten zuerst als nässende Stellen, die dann zu gräulichen Flecken eintrocknen.

Der Blattfleckenkomplex

HESS (2005, nicht rezensierte Literatur) faßte die im Freiland auftretenden Blattflecken wegen der nicht eindeutig zu unterscheidenden Ursachen als Blattfleckenkomplex zusammen:

Der Befall der Blattflecken- oder Spreitelkrankheit (*Ramularia collo-cygni*) beginnt mit punktförmigen Aufhellungen, aus denen sich dunkelbraune bis braunschwarze Nekrosen entwickeln. Bei schwachem Befall haben die Flecken einen größeren Abstand zueinander. Dadurch sind sie in der Regel deutlich größer als bei Starkbefall und haben ein sehr charakteristisches Aussehen: Sie sind meist 1 bis 2 (bis 3) mm lang und 0,5 mm breit, wobei sie am Rand durch die Blattadern sehr scharf begrenzt sind. Längs zu den Blattadern bilden sie Chlorosen aus, verursacht durch das Toxin. Das Zentrum eines Flecks ist am dunkelsten gefärbt. Sonnenlicht fördert den Befall von *Ramularia collo-cygni* (HESS, 2005, nicht rezensierte Literatur).

Die physiologischen Blattflecken (Physiological Leaf Spots – PLS) werden auch als nichtparasitäre oder genetisch bedingte Blattflecken bezeichnet und treten etwa zur gleichen Zeit wie *Ramularia* auf. Ihre Ursache wird als physiologisch angesehen, wobei vorwiegend die Blätter betroffen sind. Die Größe der PLS ist sehr variabel und auch sortenabhängig. Die Flecken sind nicht wie bei *Ramularia* von einem chlorotischem Hof umgeben und sie sind auch nicht begrenzt.

2.2.3.2 Eingesetzte Fungizide

Opera[®]

Das Fungizid Opera[®] der Profiline der Firma BASF Aktiengesellschaft wirkt mit F500[®] (133 g l⁻¹) und Epoxiconazol (50 g l⁻¹) in Gerstenbeständen gegen:

- Echten Mehltau (*Erysiphe graminis*)
- *Rhynchosporium*-Blattflecken (*Rhynchosporium secalis*)
- Netzflecken (*Drechslera teres*)
- Zwergrost (*Puccinia hordei*)
- Hitze- und Trockenheitsstress
- unspezifische Blattflecken

Opera[®] soll das Getreide vor physiologischem Streß schützen und so die Schädigung des Blattapparates durch unspezifische Blattflecken vermindern. Es wirkt ertrags- und qualitätssteigernd durch bessere Stickstoffnutzung (Quelle: Broschüre „Kulturerlebnis Opera[®]“ Nr. 37028299 der BASF Aktiengesellschaft). Als „Nebenwirkung“ soll der sogenannte „Greening-Effekt“ auftreten, der sich durch einen erhöhten Chlorophyllgehalt und eine verzögerte Seneszenz der Blätter auszeichnet.

Chlorothalonilehaltiges Fungizid

Das Kontaktfungizid mit Chlorothalonil-Anteil (500 g l⁻¹) wird zur vorbeugenden Bekämpfung von *Septoria*-Blattdürre (*Septoria tritici*) sowie Blatt- und Spelzenbräune (*Septoria nodorum*) eingesetzt. Es schützt die Pflanzen von außen und muß deshalb vor oder bei Befallsbeginn eingesetzt werden. Aufgrund der nicht systemischen Wirkung wird ein bereits vorhandener Befall nicht bekämpft, währenddessen die Bestände jedoch vor weiteren Neuinfektionen zuverlässig geschützt werden. Der Wirkstoff Chlorothalonil reagiert im pilzlichen Stoffwechsel v.a. mit Glutathion und dem Coenzym A. Diese Moleküle, die als Ausgangsprodukt für viele weitere Reaktionen gelten, werden dabei in ihrer chemischen Struktur derart verändert, daß der pilzliche Stoffwechsel innerhalb kurzer Zeit zusammenbricht. Diesem Fungizid war auch ein Anteil Strobilurine beigegeben, welches den Anteil an grüner Biomasse durch den „Greening“-Effekt und damit auch die Photosyntheseleistung steigern soll.

Prothioconazolehaltiges Fungizid

Das kurative sowie protektive Emulsionskonzentrat hat ein breites Wirkungsspektrum gegen folgende Krankheiten in der Gerste:

- Halmbrechkrankheit (*Pseudocercospora herpotrichoides*)
- Echter Mehltau (*Erysiphe graminis*)
- Zwergrost (*Puccinia hordei*)
- *Rhynchosporium*-Blattflecken (*Rhynchosporium secalis*)
- Netzflecken (*Drechslera teres*)
- *Ramularia*-Blattflecken (*Ramularia collo-cygni*)
- „Unspezifische bzw. nichtparasitäre Blattflecken“

Das prothioconazolehaltige Fungizid dringt nach Applikation rasch in das Blattgewebe ein. Anschließend wird es gleichmäßig im Blattgewebe verteilt, wo es lange verbleibt, ohne sich in der Blattspitze anzureichern. Der Stoffwechselweg der Steriolbiosynthese in den Pilzmembranen wird empfindlich gestört, wodurch ganze Konidienketten zusammenbrechen. Prothioconazole unterdrücken das Keimschlauchwachstum und die Bildung von Appressorien.

Harvesan[®]

Harvesan[®] der Firma DuPont[™] enthält eine Kombination aus folgenden Wirkstoffen: Flusilazol wirkt systemisch und unterbindet die Ergosterol-Biosynthese. Carbendazim stört die pilzliche Zellteilung. So wirkt Harvesan[®] als systemisches, resistenzbildungsvorbeugendes Breitbandfungizid gegen:

- Echten Mehltau (*Erysiphe graminis*)
- Blattfleckenkrankheit (*Rhynchosporium secalis*)
- Netzfleckenkrankheit (*Drechslera teres*)
- Zwergrost (*Puccinia hordei*) in der Gerste.

2.2.3.3 Untersuchte Gerstenbestände

***Hordeum vulgare* L. ‘Duet’ (Oberding, 2003)**

Die Wintergerstensorte ‘Duet’ wurde von der Firma BASF in Oberding bei Erding (Oberbayern) im Fungizidvergleichsversuch angebaut. Dabei wurden zwei Varianten,

eine unbehandelte und eine mit Opera[®] behandelte, im Zeitraum vom 13. Mai 2003 (EC47) bis zum 10. Juni 2003 (EC73) bemessen. Die Variante Opera wurde an zwei Terminen (26. April und 22. Mai 2003) mit jeweils einer Aufwandmenge von 1,5 l ha⁻¹ Opera[®] behandelt. Eine einmalige Deckspritzung gegen *Physarium* erfolgte in sehr frühem Stadium.

Bei Meßbeginn waren noch keinerlei Krankheitszeichen festzustellen. Die unbehandelte Variante zeigte später die sog. Sonnenbrandflecken und andere Krankheiten wie echter Mehltau, Zwergrost sowie *Rhynchosporium*-Blatt- und Netzflecken.

Am 14. Mai 2003 waren wenige kleine Sonnenbrandflecken auf einigen der oberen Blätter (entnommene Blattproben) von der unbehandelten Variante zu finden. Am 19. Mai 2003 konnten bereits Symptome von *Rhynchosporium* und anderen Flecken diagnostiziert werden. Am 22. Mai 2003 war eine beginnende Erkrankung unverkennbar. Die letztendliche Erkrankung erfolgte am 28. Mai 2003, wobei zu diesem Zeitpunkt zwischen den Varianten visuell kaum mehr Unterschiede auszumachen waren. Am 10. Juni 2003 waren beide Varianten seit ca. zwei Wochen krank, wobei dann aber wieder zwischen der unbehandelten und der mit Opera[®] behandelten Variante differenziert werden konnte.

Pro Meßgang wurden fünfmal jeweils 10 Messungen mit dem Spektrometer, dann 10 Messungen mit dem LI-COR 6400 abwechselnd durchgeführt, was 50 Messungen pro Gerät, Meßgang und Variante ergab. Dieses Vorgehen garantierte eine gewisse „Gleichzeitigkeit“ der Ergebnisse. Die Meßgänge fanden nach Möglichkeit stündlich statt.

***Hordeum vulgare* L. ‘Duet’ (Mitterfeld, 2004)**

Die Wintergerste ‘Duet’ wurde vom Lehrstuhl für Phytopathologie (TUM, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Betreuer: Michael Hess) im kombinierten Fungizidvergleichs- und Timingversuch angebaut, mit dem Ziel, den Einfluß des Blattflächenkomplexes und der eingesetzten Fungizide auf den Ertrag in Abhängigkeit vom Applikationstermin zu untersuchen. Dazu wurden ein chlorothalonilehaltiges Kontaktfungizid bei Variante C und ein prothioconazolehaltiges Breitbandfungizid bei Variante P angewendet. Alle Varianten und die ansonsten unbehandelte Kontrolle wurden am 29. April 2004 (BBCH 32) mit einer Deckspritzung mit Harvesan (0,8 l ha⁻¹) versorgt, um den Effekt anderer

Krankheiten auszuschließen. Die Kontrolle erhielt keine zusätzliche Spritzung, die Variante C wurde mit 2 l ha⁻¹ des chlorothalonilhaltigen Mittels und die Variante P mit 1,25 l ha⁻¹ des prothioconazolehaltigen Mittels behandelt.

Da auch die Wahl des Einsatztermins eine unterschiedliche Wirkung gegenüber dem Blattfleckenkomplex zeigte (HESS, 2005, nicht rezensierte Literatur), wurden beide Fungizide an drei verschiedenen Terminen (BBCH 39, 49 und 61; entspricht dem 4., 19. und 26. Mai) im Timingversuch appliziert (s. Tab. 3). Pro Variante und Applikationstermin wurden vier Wiederholungen im Timingversuch angelegt, was mit der Kontrolle zusammen 28 Parzellen ergab.

Tabelle 3. Bonituren des Nekrotisierungsgrades (%) der oberen vier Blattetagen von 'Duet' (2004) zu verschiedenen Terminen (freundliche Überlassung durch Michael Hess, Lehrstuhl für Phytopathologie, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, TUM)

Behandlung		Applikations-termin	Blattetage	28. Mai 04 BBCH 65	09. Jun 04 BBCH 75	21. Jun 04 BBCH 77-81	25. Jun 04 BBCH 81
Kontrolle	-	F		1	5	33	3
			F-1	3	12	57	12
			F-2	0	12	97	37
			F-3	15	95	100	100
Variante C	04. Mai 04 (BBCH 39)	F		1	9	11	10
			F-1	3	9	35	70
			F-2	0	8	75	100
			F-3	20	68	100	100
	19. Mai 04 (BBCH 49)	F		1	2	5	6
			F-1	3	3	23	49
			F-2	0	7	79	93
			F-3	5	68	100	100
	26. Mai 04 (BBCH 61)	F		2	2	3	5
			F-1	2	3	15	34
			F-2	1	3	53	98
			F-3	10	68	100	100
Variante P	04. Mai 04 (BBCH 39)	F		1	9	6	5
			F-1	3	11	13	23
			F-2	0	2	28	45
			F-3	15	30	100	95
	19. Mai 04 (BBCH 49)	F		1	3	6	6
			F-1	3	3	10	14
			F-2	0	9	38	64
			F-3	20	88	100	100
	26. Mai 04 (BBCH 61)	F		1	3	3	4
			F-1	2	4	12	22
			F-2	3	7	37	80
			F-3	10	78	100	100

Tabelle 4. EC Stadien in der Wintergerste 'Duet' (Mitterfeld, 2004)

Datum	EC Stadium	Datum	EC Stadium	Datum	EC Stadium
02. Mai 04	35	24. Mai 04	63	18. Jun 04	77 bis 81
04. Mai 04	37	25. Mai 04	64	03. Jul 04	85
10. Mai 04	39 bis 45	04. Jun 04	69	09. Jul 04	87
17. Mai 04	49 bis 51	06. Jun 04	70		

Der Erreger von *Ramularia collo-cygni* konnte am 10. sowie am 17. Mai 2004 durch PCR bereits lange vor dem Auftreten der ersten Symptome nachgewiesen werden. Die sichtbare Sporulation wurde am 24. Juni 2004 diagnostiziert. Alle drei Varianten zeigten eine kontinuierlich fortschreitende Nekrotisierung (Tab. 3). Am 28. Mai waren noch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten erkennbar. Am 9. Juni 2004 aber differenzierte der Bestand zwischen den Behandlungsvarianten im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle, wobei ein erhöhter Nekrotisierungsgrad in den Blättern F-1 (12 %) und F-2 (12 %) bei der Kontrolle festzustellen war (Tab. 3). Die Bonituren vom 28. Mai bis 25. Juni zeigten einen durchschnittlichen Anstieg des Nekrotisierungsgrades von 5 bis 38 % bei der Kontrolle, von 4 bis 64 % bei Variante C und von 5 bis 46 % bei Variante P. Somit hatte laut Bonitur Variante P eine bessere Wirkung als Variante C (vergl. Tab. 4, unten).

Variante P hatte mit insgesamt durchschnittlich 27 % einen noch geringeren Nekrotisierungsgrad als Variante C mit 34 %. Dabei zeigte sich bei Variante C der letzte Applikationstermin mit durchschnittlich 31,19 % am wirksamsten, während der erste immerhin 38,69 % aufwies. Bei Variante P aber erwies sich der erste Applikationstermin als der beste (24,13 %), die beiden letzten Termine unterschieden sich mit 29,1 % nicht voneinander.

Auf einen Einsatz des LI-COR 6400 mußte bei diesem Versuch verzichtet werden, so daß die Datenerhebung allein mit dem Spektrometer stattfand. Die Meßgänge mit dem Spektrometer fanden aber dafür umso häufiger bis zu siebenmal mit einer höheren Parzellenanzahl an einem Tag statt. Limitierender Faktor waren dann aber die Ladezeiten des Geräts: Es wurde mindestens so lange am Netz gelassen, um einen vollständigen Meßgang über alle 28 Parzellen ohne Unterbrechung garantieren zu können. Die Chlorophyllanalysen wurden durch den Lehrstuhl für Phytopathologie (Wissenschaftszentrum Weihenstephan, TUM) in Weihenstephan vorgenommen. Gedroschen wurde am 20. Juli 2004.

2.2.4 Wasserstreßversuche:

Da es zwei unterschiedliche Arten von „Wasserstreß“ zu betrachten gab, wurden entsprechend zwei verschiedene Versuchsreihen aufgesetzt: Für die Versuche zu den Primärfolgen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit (vor allem gekennzeichnet durch einen unterschiedlichen Turgor) wurden einzelne Parzellen nach einer längeren Trockenperiode unterschiedlich stark bewässert. In den Versuchen zu den Sekundärfolgen von Wassermangel, der vor allem durch eine verminderte Wasseraufnahme, eine dadurch verursachte verringerte N-Aufnahme und ein verminderter Chlorophyllaufbau gekennzeichnet war, wurden Pflanzenbestände über mehrere Wochen hinweg unterschiedlich bewässert.

2.2.4.1 Versuche zu den Primärfolgen unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit

Ein erhöhtes Wasserangebot nach einer längeren Trockenperiode führt zu einer verstärkten Wasseraufnahme, was wiederum einen steigendem Turgor und dadurch eine Stomataöffnung zur Folge hat. Weiter geöffnete Stomata lassen eine erhöhte Photosynthese zu, was wiederum – durch eine veränderte Umverteilung der aPAR im PSII – das Fluoreszenzsignal verändern könnte. Mit den Untersuchungen zu den Primärsymptomen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit sollte der Ansatz für eine Methodik zur Früherkennung von beginnendem Wassermangel erarbeitet werden.

Hierbei wurden also nicht die Folgen von beginnendem Trockenstreß betrachtet, sondern die unmittelbaren Effekte, die sich bei der angegossenen Variante im Gegensatz zur unbewässerten Variante ergaben. Das Ziel dabei war, die Folgen eines unterschiedlichen Wasserangebots schon kurze Zeit nach der Wassergabe nicht nur visuell, physiologisch und labortechnisch, sondern auch auf Basis von spektrometrischen Daten ableiten zu können. Zusätzlich zu den Messungen mit dem Spektrometer und dem LI-COR 6400 wurden Blattproben für Farbpigment- und N-Analysen entnommen. Auch die Bodenfeuchte und der Wassergehalt der Blätter wurden bestimmt.

***Rheum rhabarbarum* L.**

Im März 2003 hatte es nur 20,2 mm geregnet, im April bis zum Meßzeitpunkt nur 18,7 mm. Nach dem Vorbild von NIU *et al.* (2004) wurde die wassergestreßte Variante (Variante „Ungewässert“) nicht angegossen und die nichtgestreßte Kontrolle

mit ca. 40 l m⁻² und Tag gewässert (Variante „Angegossen“). Zum Meßzeitpunkt hatten die Pflanzen mehrere voll ausgebildete Blätter, sie befanden sich aber noch in der vegetativen Phase.

Am 29. April 2003 wurde ein Referenztagesgang an einem Exemplar von *Rheum rhabarbarum* L. noch während der Trockenperiode aufgenommen. Am 2. Mai 2003 wurden die Kontrolle und die am selben Tag kurz zuvor angegossene Variante von 8:00 Uhr bis 19:00 Uhr mit dem Spektrometer und dem LI-COR 6400 in insgesamt zehn Meßgängen gemessen, wobei sich die Durchschnittswerte aus jeweils 50 Einzelmessungen zusammensetzten. Mit dem Spektrometer wurde immer derselbe zentrale, horizontale Blattausschnitt erfaßt, mit dem LI-COR 6400 wurde gerätebedingt am Blattrand gemessen, und zwar an abwechselnd drei benachbarten Stellen desselben Blattes. Somit war weitestgehend gegeben, daß die Blattabschnitte nicht allzu sehr durch das Einspannen in die Blattkammer gestreßt wurden. Bei beiden Meßverfahren an beiden Varianten („Ungewässert“ und „Angegossen“) konnte aufgrund des jeweils gleich großen bemessenen Blattausschnitts (je nach Geräteart) von der gleichen, weil vergleichbaren Blattfläche ausgegangen werden, da hier weder Blattetagen noch andere Faktoren wie die Bestandesstruktur berücksichtigt werden mußten: Das Objektiv des Spektrometers wurde ca. 25 cm über die horizontale Blattfläche gehalten und erfaßte somit eine Fläche von durchschnittlich 100 cm². Das betroffene Rhabarberblatt aber besaß eine durchschnittliche Gesamtfläche von ca. 900 cm². Bei der Größe dieser Blätter war es möglich, gleichzeitige Messungen mit Spektrometer und Photosynthesemeßgerät an ein und demselben Blatt simultan durchzuführen.

***Triticale* ‘Modus’**

Anschließend an den vorhergehenden Versuch wurde die zweite Versuchsreihe zu den Primärsymptomen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit gestartet: Für die ungestreßte Kontrolle des *Triticale* ‘Modus’ (EC37) wurde am Morgen des ersten und zweiten Meßtags (6. und 8. Mai 2003) eine Parzelle (ca. 2 x 5 m²) mit jeweils 40 l m⁻² nach einer längeren Trockenperiode angegossen. Davor hatte es im April 2003 insgesamt 18,7 mm bei einer Durchschnittstemperatur von 8 °C geregnet, im Mai waren es 70 mm bei 13,5 °C, wobei es bis zum 8. Mai 2003 insgesamt nur 9 mm geregnet hatte.

Bereits kurz nach dem Angießen am 6. Mai vor Meßbeginn erschienen erste visuelle Unterschiede zwischen den Varianten. Die Blätter der angegossenen Variante entrollten sich langsam, im Gegensatz zu den weiterhin gerollten Blättern der ungewässerten Variante. Am 8. Mai 2003 war bei der ungewässerten Variante kein Morgentau erkennbar und die Blätter rollten sich zunehmend mit steigenden Temperaturen. Außerdem zeigten sich leichte Sekundärsymptome des Wassermangels wie eine geringere Wüchsigkeit und ein verminderter Chlorophyllgehalt im Gegensatz zur angegossenen Variante. Bei der angegossenen Variante dagegen hingen bis ca. 10:00 Uhr morgens dicke Wassertropfen an den sich ob des schweren Gewichts nach unten biegender Blattspitzen. Die Blätter der angegossenen Variante rollten sich nur andeutungsweise während der Mittagshitze. Wiederum wurden simultan je 50 Messungen mit dem Spektrometer und 50 Messungen mit dem LI-COR 6400 über den Tag verteilt durchgeführt.

2.2.4.2 Versuche zu den Sekundärfolgen von Wassermangel

Ein vermindertes Wasserangebot über einen längeren Zeitraum zieht eine verminderte N-Aufnahme und auch Photosyntheseleistung nach sich, da die Stomata nicht so weit geöffnet sind wie bei einem ausreichendem Wasserangebot und so auch die Photosyntheserate gedrosselt wird. Dies wirkt sich unter anderem negativ auf den N-Gehalt bzw. die Chlorophyllkonzentration der Pflanzen aus. Minderwuchs sowie eine gelblichgrüne Färbung sind einige Folgeerscheinungen.

***Triticum aestivum* L. 'Triso'**

Die Sommerweizensorte 'Triso' wurde unter einem mit Regensensoren ausgestattetem Rollhaus vom Lehrstuhl für Pflanzenernährung (Dürnast, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, TUM) angebaut. Den verschiedenen Varianten konnten so unter kontrollierten Bedingungen unterschiedliche Wassermengen durch ein Tröpfchenbewässerungssystem zugeführt werden. Dadurch ließen sich unterschiedliche Intensitäten der Sekundärfolgen von Wassermangel induzieren. Nach einer einheitlichen Bewässerung aller Varianten im Juli begann die unterschiedliche Wasserstreßinduktion am 4. August 2003 mit 60 l m⁻² und Tag für die Variante „Unbewässert“ und mit 150 l m⁻² und Tag für die Variante „Bewässert“. Die unterschiedliche Bewässerung wurde am 24. August 2003 mit der Gabe von 30 l m⁻² an beide Varianten beendet. Am 25. August 2003 (EC59) wurde ein ganzer Tagesgang mit dem Spektrometer in je 5 Parzellen pro Variante

und dem LI-COR 6400 in je einer Parzelle pro Variante im Zweistundentakt gemessen.

Triticum aestivum L. 'Ludwig'

Am Standort der Winterweizensorte 'Ludwig' (Schloßgut Erching, Hallbergmoos) zeichnete sich der Boden durch starke Inhomogenitäten in Bezug auf das Wasserhaltevermögen aus. Die Pflanzen in den sandigeren Bereichen mit niedrigerem Wasserhaltevermögen zeigten deutliche Zeichen von Sekundärsymptomen von Wassermangel in Form einer niedrigeren Bestandesdichte und Wüchsigkeit sowie einer gelblichen Färbung der Blätter. Die nicht wassergestreßten Pflanzen in den lehmigeren Bereichen standen dicht, hatten einen fetteren Wuchs und breitere, längere Blätter, welche deutlich blau gefärbt waren. Die Pflanzen waren aufgrund der höheren Wasserverfügbarkeit auf ihrem Standort imstande, vermehrt Stickstoff aufzunehmen und Chlorophyll zu bilden. Es wurden insgesamt zwei 5 x 5 m² große Parzellen abgesteckt, und zwar eine Parzelle mit gut gewachsenen und dunkelgrünen Pflanzen, die andere mit schlechter gewachsenen und hellgrünen Pflanzen. Im April 2003 hatte es insgesamt 18,7 mm und die erste Maihälfte 35,7 mm geregnet. Am 16. Mai 2003 wurde ein ganzer Tagesgang mit Spektrometer und Photosynthesemeßgerät gemessen. Am 20. Mai ließ ein unangekündigter Hagelsturm nur einen einzigen Meßdurchgang zu, dessen interessante Ergebnisse hier trotz des Fehlens eines vollständigen Tagesganges vorgestellt werden sollen. Der Bestand befand sich zum Meßzeitpunkt in EC 37 (Wassermangelvariante) bis 39 (nichtgestreßte Kontrolle). Wie im *Triticale* 'Modus' wurden pro Meßgang je 50 Einzelmessungen mit dem Spektrometer und je 50 mit dem LI-COR 6400 je Parzelle durchgeführt.

2.2.5 Multivariater Versuch

Die bisher aufgeführten Versuche haben nur eine einzige Streßart an verschiedenen Pflanzenarten bzw. -sorten zu verschiedenen Meßzeitpunkten behandelt. Eine größere Vergleichbarkeit der Ergebnisse ergibt sich aber, wenn mehrere unterschiedliche Streßarten in einer Sorte zum selben Meßzeitpunkt am selben Standort erfaßt würden. Dazu wurde ein multivariater Versuch in der Kartoffelsorte 'Edelstein' angelegt, in dem außer bei der Kontrolle die verschiedenen Streßarten induziert wurden, denn damit konnte gezielt der Ansatz verfolgt werden, ob und im Falle auf welche Weise sich mit spektrometrischen Methoden (CF und

andere Vegetationsindizes) die Streßarten unterscheiden ließen bzw. ob sogar eine Früherkennung möglich wäre.

Die 2002 zugelassene Kartoffelsorte 'Edelstein' galt als besonders anfällig gegen *Alternaria* und gering bis mittelanfällig gegen *Phytophthora infestans*. Sie wurde in insgesamt 12 Parzellen angebaut: die Variante Kontrolle mit 3 Parzellen und 3 Varianten mit 3 Parzellen je induzierter Streßart, Variante „Ungewässert“ mit

Tabelle 5. Versuchsrelevante Kulturmaßnahmen für den multivariaten Versuch in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Edelstein'

	Behandlung	Parzellen	EC
05. Nov 03	Saatbettvorbereitung	alle	
14. Apr 04	0,2 kg dt ⁻¹ Monceren	4 bis 12	0
	Legen (4 Knollen m ⁻²)	alle	
28. Apr 04	Häufeln	alle	
21. Mai 04	0,3 kg ha ⁻¹ Sencor + 25 g ha ⁻¹ Cato	alle	
10. Jun 04	50 kg N	alle	15
17. Jun 04	0,7 kg ha ⁻¹ Tanos	4 bis 12	
	75 ml ha ⁻¹ Karate Zeon	alle	
22. Jun 04	100 kg N ha ⁻¹	1 bis 6 und 10 bis 12	51
30. Jun 04	0,7 kg ha ⁻¹ Tanos	4 bis 12	55
	75 ml ha ⁻¹ Karate Zeon	alle	
22. Jul 04	2 kg ha ⁻¹ Acrobat Plus WG	4 bis 12	75
	75 ml ha ⁻¹ Karate Zeon	alle	
27. Jul 04	0,4 l ha ⁻¹ Shirlan	4 bis 12	
	2 kg ha ⁻¹ Acrobat Plus WG		
04. Aug 04	Bewässerung	1 bis 9	81
05. Aug 04	Bewässerung	1 bis 9	
09. Aug 04	Bewässerung	1 bis 9	85
06. Okt 04	Ernte	alle	97

Wassermangel, Variante „N50“ mit Stickstoffmangel und Variante „Ungebeizt“ mit Krankheitsdruck. Die 3 Parzellen der Variante „Kontrolle“ wurden durch eine optimale Versorgung an N, Fungiziden und Wasser so „streßfrei“ wie möglich gehalten.

Aus der Kulturführung in Tabelle 5 lassen sich die versuchsrelevanten Maßnahmen und deren Zeitpunkt entnehmen. So wurde eine unterschiedliche N-Düngung am 22. Juni 2004 appliziert, gegen *Phytophthora* wurde am 17. und 30. Juni 2004 gespritzt. Die unterschiedlichen Wassergaben setzten am 4. August 2004 ein.

Eingesetzte Pflanzenschutzmittel:**Monceren® Plus**

Die Trockenbeize Monceren® Plus der Firma Bayer enthält die Wirkstoffkombination Pencycuron (75 g kg^{-1}) und Tolyfluanid (100 g kg^{-1}), mit der sich effektiv gegen die knollenbürtigen Infektionen von *Rhizoctonia solani* und Silberschorf (*Helminthosporium solani*) bekämpfen lassen. Eine gute Nebenwirkung zeigt es gegen die *Colletotrichum*-Welkekrankheit.

Sencor WG®

Sencor WG® der Firma Bayer CropScience ist ein Blatt- und Bodenherbizid, das eine Reihe von aufgelaufenen sowie noch nicht aufgelaufenen Samenunkräutern und -ungräsern bekämpft. Es zeigt aber keinerlei Wirkung gegen die Gemeine Quecke, das Kletten-Labkraut und ausdauernde, tiefwurzelnde Unkräuter, z.B. Disteln.

Cato®

Cato® der Firma DuPont ist ein Herbizid zur Bekämpfung von Ungräsern und Unkräutern in Mais und Kartoffeln im Nachauflauf, einschließlich Quecke und Klettenlabkraut.

Tanos®

Tanos® der Firma Stähler ist ein Fungizid gegen Kraut- und Knollenfäule (*Phytophthora*) und Dürffleckenkrankheit (*Alternaria*) an Kartoffeln.

Karate® Zeon

Karate® Zeon der Firma Syngenta ist ein außerordentlich wirksames Insektizid zur Bekämpfung von beißenden und saugenden Insekten.

Shirlan®

Das Kontaktfungizid Shirlan® der Firma Syngenta ist ein Suspensionskonzentrat zur Bekämpfung von *Phytophthora infestans* und enthält Fluazinam ($38,5 \text{ g g}^{-1}$), das zur chemischen Gruppe der Phenylpyridylamine gehört und die oxidative Phosphorylierung unterbricht.

Acrobat Plus WG®

Acrobat Plus WG® der Firma BASF ist ein Fungizid, das Mancozeb (600 g kg^{-1}) und Dimethomorph (90 g kg^{-1}) enthält.

Bei der Kontrolle (Parzellen 4 bis 6) wurde der normale Kulturplan ohne Änderungen durchgeführt, d.h. der Kontrolle wurden alle in Tabelle 5 aufgeführten Behandlungen in vollen Umfang zuteil. Zum Ausschluß anderer Krankheiten wurden alle Varianten mit Deckspritzungen behandelt. Bei der ungebeizten Variante (Parzellen 1 bis 3) sollte zusätzlich ein Krankheitsdruck induziert werden, weswegen die anderen Parzellen 4 bis 12 vor dem Legen mit Monceren© gebeizt wurden. Die ersten Symptome einer Erkrankung wurden am 20. Juli diagnostiziert. Die Bonituren des Nekrotisierungsgrades der einzelnen Parzellen erfolgten in 10%-Schritten (s. Tab. 25).

Die unterschiedliche Stickstoffdüngung begann am 22. Juni: Alle Parzellen bis auf die Parzellen 7 bis 9 der N₅₀-Variante wurden mit insgesamt 150 kg ha⁻¹ N gedüngt, allein die N₅₀-Variante erhielt nur eine einmalige Gabe von 50 kg ha⁻¹ (s. Tab. 5).

Alle Parzellen, bei denen kein Wassermangel induziert werden sollte, wurden nach einer längeren Trockenperiode am 4. August mit ca. 20 l m⁻² angegossen, das zweite Mal am darauffolgenden Tag genauso und ein letztes Mal am 9. August. Bei der unbewässerten, also in dieser Zeit gar nicht bewässerten Variante (Parzellen 10 bis 12) sollten vor allem die Auswirkungen von unterschiedlicher Bewässerung zuerst hinsichtlich auf die Symptome bei wiederbewässerten Beständen im Gegensatz zur weiterhin unbewässerten Variante untersucht werden.

Der Bestand befand sich am 12. Mai in EC 32 und am 9. Juni 2004 in EC 49. Am 30. Juni konnten vereinzelt Blüten geortet werden (EC60). Die Meßperiode erstreckte sich vom 30. Juni (ca. EC 55 bis 60) bis zum 17. August 2004 (ca. EC 91). Neben einzelnen mittäglichen Punktmessungen konnten drei ganze Tagesgänge aufgenommen werden. Messungen mit dem SPAD-Meter und dem LAI-2000 wurden begleitend durchgeführt. Zusätzlich wurden Blattproben für die Pigment- und N-Analyse sowie Bestimmung des „Leaf Fuel Contents“ entnommen. Zuletzt fand eine allgemeine Erntedatenerhebung für Ertrag, Knollengröße und Stärkegehalt statt.

2.3 Analysen

Parallel zu den Messungen mit Spektrometer und Photosynthesemeßgerät wurden Einzelblätter nach Etagen (F, F-1 sowie F-2 zusätzlich bei z.B. Kartoffel) sortiert für die Analyse der Photosynthesepigmente und des Gesamtstickstoffgehalts entnommen. Dabei wurde wöchentlich bei den meist doppelt, also in mindestens einer Wiederholung angelegten Parzellen von der Probeparzelle entnommen,

während die spätere Ernteparzelle den zerstörungsfreien Messungen mit den Geräten vorbehalten war. Je nach Verwendung wurden die Proben sofort in flüssigem Stickstoff tiefgefroren oder zum Trocknen in einen Trockenschrank gelegt.

2.3.1 Photosynthesepigmente

Die Bestimmung der Photosynthesepigmente, vornehmlich der Fraktionen der Chlorophylle *a*, *b* sowie deren Gesamtgehalt, erfolgte quantitativ. Dafür wurden ca. 20 g Einzelblätter, nach Etagen geordnet, geerntet. Bei Weizen und Gerste waren dies die Etagen F und F-1, bei Kartoffeln die Fiedern der jüngsten drei voll ausgebildeten Blätter. Bei großblättrigen Pflanzenarten wie Rhabarber und Zuckerrübe wurde das jüngste voll ausgebildete Blatt geerntet, wobei die dicken, chlorophyllarmen Blattadern entfernt wurden. Diese Proben wurden sofort in zuvor sorgsam beschrifteten Aluminiummäppchen samt enthaltenem nochmals beschriftetem Etikett in flüssigem Stickstoff schockgefroren und bis zur weiteren Verarbeitung im Winter bei ca. $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ eingelagert. Nach Entfernung weiterer Blattadern bei den Fiederblättchen der Kartoffel bzw. Blattspitzen und -basen bei den Süßgrasarten wurden die so präparierten Blätter im Labor verraspelt und gut vermengt. Davon wurden zwischen 1,0 und 1,2 mg in drei Wiederholungen in 15 ml einer ammoniakalischen Acetonlösung folgender Zusammensetzung eingewogen:

Für ca. 100 Proben:

800 ml Aceton p.a.

195 ml $\text{H}_2\text{O}_{\text{bidest}}$

5 ml konz. Ammoniak-Lösung (25% Gewicht)

In einem Horizontalschüttler eingespannt wurde die eingewogenen Blattproben dann in kleinen Kunststoffröhrchen (20 ml) für ca. 96 Stunden in einer Klimakammer mit Temperaturen bei ca. 2°C ständig bewegt, um einer temperaturbedingten Degeneration des Chlorophylls entgegenzuwirken. Die Extinktion der Chlorophylllösung wurde am nächsten Tag mit einem UV/VIS-Photometer (Lambda 20 & 40 der Firma PerkinElmer, Neuried) bei den Wellenlängen 664, 663, 652, 647 und 645 nm ermittelt. Die Berechnung der Chlorophyllkonzentrationen der Lösungen erfolgte nach SCHOPFER (1986) mit folgenden Formeln:

$$c_{\text{Chl } a} (\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}) = 11,78 E_{664} - 2,29 E_{647} [\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}],$$

$$c_{\text{Chl } b} (\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}) = 20,05 E_{647} - 4,77 E_{664} [\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}],$$

$$c_{Chl\ a+b} \text{ (mg * l}^{-1}\text{)} = 20,2 E_{645} + 8,0 E_{663} \text{ [mg * l}^{-1}\text{]}.$$

Die Ergebnisse obenstehender Formeln wurden mit folgenden Formeln von mg * l^{-1} in mg g^{-1} umgerechnet:

$$c_{Chl\ a} \text{ (mg * g}^{-1}\text{)} = \{ \{ c_{Chl\ a} \text{ (mg * l}^{-1}\text{)} * 15 \} / \text{Einwaage (g)} \} / 1000 \text{ [mg * g}^{-1}\text{]},$$

$$c_{Chl\ b} \text{ (mg * g}^{-1}\text{)} = \{ \{ c_{Chl\ b} \text{ (mg * l}^{-1}\text{)} * 15 \} / \text{Einwaage (g)} \} / 1000 \text{ [mg * g}^{-1}\text{]},$$

$$c_{Chl\ a+b} \text{ (mg * g}^{-1}\text{)} = \{ \{ c_{Chl\ a+b} \text{ (mg * l}^{-1}\text{)} * 15 \} / \text{Einwaage (g)} \} / 1000 \text{ [mg * g}^{-1}\text{]}.$$

Die drei Wiederholungen wurden gemittelt und u.a. den Ergebnissen der Stickstoffanalyse gegenübergestellt.

2.3.2 Bestimmung des Gesamtstickstoffgehalts nach Kjeldahl

Für die Analyse des Gesamtstickstoffs nach Kjeldahl wurden ca. 50-100 g Blattmaterial parallel zu jenem für die Analyse der Photosynthesepigmente gesammelt und mit Etikett in sorgfältig beschrifteten Papiertütchen für ca. 24 Stunden bei 50 °C getrocknet. Nach Vermahlen der Proben in der Scheibenschwingmühle wurden die Proben nochmals bei 65 °C für ca. 12 Stunden für die nachfolgende Analyse angetrocknet. Eine vollkommene Trocknung des Gutes erreichten die Exsikkatoren während der nachfolgenden Stunden.

Der Gesamtstickstoff in den Blättern von Weizen und Gerste wurde nach einem modifizierten Kjeldahl-Verfahren bestimmt, welches das im Pflanzenmaterial enthaltene NO_3 nicht einschließt. Die Einwaage von 0,25 g wurde mit einer halben Kjeldahl-Tablette und 7,5 ml HCl versetzt und aufgeschlossen. Die Aufschlußzeit wurde folgendermaßen eingeteilt: eine bis sieben Stunden bei 100 °C, zwei Stunden bei 200 °C und drei Stunden bei 360 °C. Nach Auffüllen mit Aqua bidest. bis zur Eichmarke am Glaskolben (75 ml) konnte die Lösung filtriert werden. Anschließend wurde der im Filtrat als Ammonium vorliegende Stickstoff photometrisch in einem Continuous-Flow-Verfahren (Fa. Skalar Analytic GmbH) bestimmt.

Bei Kartoffelkraut und -knollen wurden 0,3 g Probenmaterial eingewogen, mit 2,5 ml Aufschlußmittel (Schwefelsäure-Selen-Salicyl-Säurelösung) versetzt und am folgenden Tag für zwei Stunden bei 100 °C erhitzt. Nach Zugabe von dreimal 1 ml Wasserstoffperoxid (30 %) erfolgte eine weitere Erhitzung auf 360 °C für zwei Stunden. Danach wurde wie bei den Weizen- und Gerstenproben Aqua bidest. zugegeben und weiter wie bei diesen fortgefahren.

2.4 Weitere Bestandenserhebungen

Begleitend zu den oben beschriebenen Analysemethoden wurden, in Abhängigkeit vom Versuch, noch weitere Untersuchungsmethoden angewandt:

Bestimmung des Entwicklungsstadiums

Das EC-Stadium wurde anhand der „Entwicklungsstadien mono- und dicotyler Pflanzen - BBCH-Monographie“ der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft bestimmt.

Bestimmung des Wassergehalts in den Blättern

Zur Bestimmung des Wassergehalts von Blättern wurden die Blattproben für die N-Analyse direkt nach der Entnahme und nach dem Trocknen (vor dem Mahlen) gewogen. Die Leaf Fuel Mass (engl. – „flüssige Blattmasse“) wurde dann nach GAO und GOETZ (1995) berechnet:

$$\text{LFM} = (M_F - M_T) / M_T$$

LFM - Leaf Fuel Mass
 M_F - Frischmasse
 M_T - Trockenmasse

Diese Ratio gibt den Flüssigkeitsanteil pro Trockenmasseeinheit wider. Je höher der dimensionslose Wert der LFM ist, desto höher ist der Flüssigkeitsgehalt in den Blättern.

Bestimmung des Wassergehalts im Boden

Für die Messung des natürlichen Wassergehalts im Boden wurde dieser mit einem Stechzylinder entnommen, ein Teil aus 20 cm Tiefe gewogen und nach Trocknung erneut gewogen. Der Wassergehalt (W) wurde dann nach folgender Formel berechnet:

$$W (\%) = (M_F - M_T) * 100 / M_T$$

W - Wassergehalt (%)
 M_F - Frischmasse
 M_T - Trockenmasse

Diese Ratio zeigt den Wassergehalt des Bodens, bezogen auf dessen Trockenmasse als prozentualen Wert an.

Bestandenserhebungen während und nach der Kultur

Für die Bestandenserhebungen während der Kultur wurden die Pflanzentriebe pro Parzelle gezählt sowie nach der Ernte die mittlere Knollenzahl je Pflanze von

Solanum tuberosum bestimmt. Danach wurde eine Größensortierung der Knollen nach folgenden zugrunde liegenden Fraktionen vorgenommen:

- > 55 mm (groß)
- 35 – 55 mm (mittel)
- < 35 mm (klein).

Der Stärkegehalt der Knollen wurde anhand der Unterwassergewichtsbestimmung von 5 kg Knollen nach PUTZ (1989) ermittelt.

2.5 Witterung

Als Referenzdaten wurden die versuchsrelevanten Wetterdaten der dem Meßstandort am nächsten gelegenen Wetterstation von der Webpage des Agrarmeteorologischen Meßnetzes Bayern, Wetterdatenabruf, von der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (www.lfl.bayern.de) herangezogen. Folgende in Frage kommende Wetterstationen standen zur Verfügung:

- Für Freising und Dürnast: Wetterstation Nr. 8, Freising, Regbez: Oberbayern, Lkr: Freising (FS), Gemeinde: Freising, Gkst.; (Schlüssel: 178124); ca. 1 km Entfernung zu den Meßorten.
- Für Oberding: Wetterstation Nr. 76, Straß, Regbez: Oberbayern, Lkr: Erding (ED) Gemeinde: Erding, St.; (Schlüssel: 177117), ca. 9 km Entfernung zum Meßort.
- Für die Messungen bei Schloßgut Erching (Hallbergmoos): Wetterstation Nr. 114, Eichenried, Regbez: Oberbayern Lkr: Erding (ED) Gemeinde: Moosinning, St.; (Schlüssel: 177130), ca. 6 km Entfernung zum Meßort.

Die Tagesdaten von o.g. Stationen sind dem Anhang entnehmbar. Die auch dort vorhandenen Wetterdaten im Zehnminutentakt aus den Jahren 2003/04 wurden der leider nicht mehr abrufbaren Webpage der Landtechnik der TUM-Weihenstephan entnommen.

Bei Fehlen der Daten des Photosynthesemeßgeräts wurde für die Versuchsauswertungen auf die Daten der Globalstrahlung von o.g. Stationen zurückgegriffen. Es gibt keine allgemeingültige Formel zur Umrechnung der Globalstrahlung ($W\ m^{-2}$) in $\mu\text{mol Quanten}\ m^{-2}\text{s}^{-1}$, nur ungenaue faktorielle Ansätze

v.a. deswegen, da sich der Energiegehalt eines Lichtquantums mit der Wellenlänge ändert. Um die Daten von LI-COR 6400 und Wetterstation für diese Arbeit vergleichbar zu machen, wurden die Daten beider Herkünfte von vergleichbaren Zeitpunkten und an ziemlich nah beieinander gelegenen Meßorten gegenübergestellt. Dabei ergab sich das in Abb. 11 dargestellte Integral samt Formel, welche in dieser Arbeit für Versuche verwendet wurde, bei denen kein Photosynthesemeßgerät zum Einsatz kam.

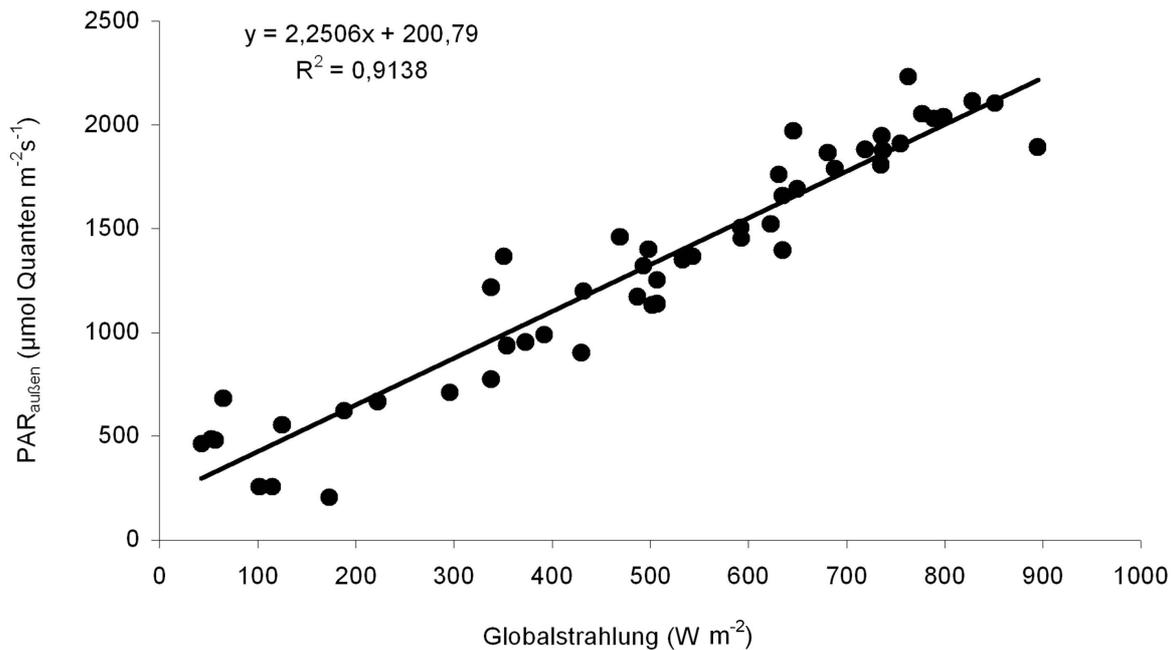


Abbildung 11. Gegenüberstellung von PAR_{außen} (LI-COR 6400) und Globalstrahlung (Wetterstation Nr. 8)

Vegetationszeitraum 2003

Eine überdurchschnittlich warme sowie trockene Witterung in der letzten April- und ersten Maidekade wurde von warmfeuchten Bedingungen in der zweiten Maihälfte abgelöst, was zu einer zügigen Entwicklung der Kartoffelbestände führte. Deren weitere Ertragsbildung wurde durch die mit Ausnahme der zweiten Julidekade stets überdurchschnittlichen Temperaturen begünstigt. Auch die Wasserversorgung war bis dahin ausreichend, da vor und nach dem trockenen Juni (53 % des langjährigen Mittels) hohe Niederschlagsmengen zu verzeichnen waren. Juli wie August 2003 waren extrem trockene, strahlungsreiche und heiße Monate. Der sehr geringe Niederschlag ging im Juli 2003 mit 81,4 und im August mit 32,3 mm

(s. Anhang) nieder. Der Sommer 2003 ging als „Jahrhundertsommer“ in die Annalen ein.

Vegetationszeitraum 2004

Eine feuchtwarme Frühjahrswitterung im März und April begünstigte die Etablierung der Weizenbestände. Wie im Vorjahr folgte nach dem Legen der Kartoffeln eine trockene Periode in der letzten Aprildekade. Allerdings war in Folge von geringen Niederschlägen im Mai (68 % des langjährigen Mittels) und unterdurchschnittlichen Temperaturen im Juni ($-0,8^{\circ}\text{C}$ gegenüber dem langjährigen Mittel) ein verringertes und verzögertes Krautwachstum der Kartoffeln zu beobachten. Dessen Entwicklung wurde auch durch die unzureichende Wasserversorgung im Juli (58 % der langjährigen Niederschlagssumme) gehemmt. Das Vegetationsjahr 2004 zeichnete sich durch einen heißen, strahlungsreichen und trockenen Sommer aus.

Sonnenhöhe und Azimut

Nicht nur die Einstrahlungsstärke, sondern auch der Sonnenstand konnte die Spektrometermessungen stark beeinflussen. Der Sonnenstand wird durch den Sonnenzenitwinkel und den -azimut definiert, welche abhängig von Datum, Uhrzeit und geographischer Lage sind. Die entsprechenden Daten dazu wurden mit einer auf der Webpage des Astronomical Applications Department des U.S. Naval Observatory (<http://aa.usno.navy.mil/data/docs/AltAz.html>) zur Verfügung gestellten Eingabemaske errechnet. Freising liegt bei $49^{\circ} 24'$ nördlicher und $11^{\circ} 44'$ östlicher Breite, was in die Berechnungen miteinbezogen wurde. Der Azimut berechnet sich aus dem Winkel zwischen der Vertikalebene eines Gestirns und der Südhälfte der Meridianebene für einen gegebenen Zeitpunkt und einen gegebenen Beobachtungsort.

2.6 Auswertung der Ergebnisse

Wie in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben, wurde eine Vielzahl von in hochkomplexer Art mit- und gegeneinander wirkenden Faktoren (Pflanzen- und Streßart, Klimafaktoren, untersuchte Faktoren wie CF, Photosynthese usw.) in dieser Arbeit miteinbezogen. Hierbei mußte erst durch vielfältige Feldmessungen eine „ground truth data“ erschaffen werden. Aufgrund dieser Multifaktorialität der Daten wurde ein deskriptiver Ansatz zur Beantwortung der in der Einleitung aufgeführten Fragestellungen favorisiert. Immer im Auge behalten wurde dabei das endgültige

Ziel, die CF für weitere v.a. pflanzenphysiologische Betrachtungen bzw. für das Remote Sensing nutzbar machen zu können.

Die Ergebnisse von MAIER *et al.* (2003) und dem gemessenen Tagesgang von STELMESS (2002, unrezensiert) zeigten, daß die Amplitude eines Tagesgangs weitaus größer als die Differenzen zwischen den CF-Werten der von MAIER *et al.* (2003) aufgenommenen verschiedenen Schlägen zu einer bestimmten Tageszeit sein konnten. Dieser Tatbestand, die später noch besprochene Ambivalenz einiger Ergebnisse und die hochkomplexe Multidimensionalität der beeinflussenden Faktoren erschwerte eine extensive statistische Auswertung: Mit fortschreitender statistischer Prozedur wurden die Ergebnisse zuerst bei den Standardtests und später auch bei anspruchsvolleren statistischen Methoden immer weniger nahvollziehbar, so daß hier die versuchsscharfen Ergebnisse einer einfachen statistischen Auswertung im Anhang aufgeführt wurden. Denn bei der jeweiligen Einzelansicht der Versuche konnten die Zusammenhänge der beeinflussenden Faktoren und Reaktionen der Pflanzen besser erkannt und beschrieben werden.

Im Anhang finden sich Auswertungstabellen über die Einzelmeßdaten (N als Anzahl der Einzelmessungen mit dem Spektrometer in den Tabellenüberschriften) der verschiedenen Versuche, die die Korrelation nach Pearson und die zweiseitige Signifikanz (errechnet mit dem Statistik-Paket SPSS 12.0) zeigen. Die Korrelationen nach Pearson können Werte von -1 bis +1 annehmen. Nähern sie sich 0, besteht eine geringere lineare Korrelation zwischen den betrachteten Merkmalen. Nähern sie sich +1, ist die positive lineare Korrelation größer, und sind sie -1 näher, besteht eine größere lineare, aber inverse Korrelation. Die Signifikanz (2-seitig) sagt aus, zu welcher Irrtumswahrscheinlichkeit die Koeffizienten signifikant sind: Der Test ist signifikant mit $p < 0,05$, hoch signifikant mit $p < 0,01$ und sehr hoch signifikant mit $p < 0,001$. Mit $p > 0,05$ ist der Test nicht signifikant.

3 Ergebnisse

Die einzelnen Versuchsarten sind unter Einbeziehung der jeweiligen Ergebnisse aufeinander aufbauend dargestellt. Begonnen wurde mit einem einzigen variablen Faktor, der photosynthetisch aktiven Strahlung. Zwei Arten von Experimenten sind dazu durchgeführt worden, zum einen die Abdunklungsversuche zum Beweis der Kautsky-Kinetik der sonnenlicht-induzierten Chlorophyll-Fluoreszenz, und zum anderen kontinuierliche Messungen unter durchziehenden Wolkenfeldern, unter denen sich vor allem die Sonneneinstrahlung ändert. Danach wurden ganze Tagesgänge aufgenommen, zunächst nur an einer einzigen Sorte und Variante, um den Verlauf von PHS und CF in Verbindung tagesveränderlichen Faktoren wie Temperatur und photosynthetisch aktiver Strahlung aufzunehmen. Danach folgt die Vorstellung von vergleichenden Versuchen zwischen Sorten und unterschiedlicher Stickstoffdüngung, und deren Einfluß auf die CF und die Photosyntheserate im Tagesgang. Nachfolgend finden sich verschiedene Vergleichsversuche zum Wassermangel und Fungizidvergleichsversuche. Abschließend ist ein multivariater Versuch zur Unterscheidung der verschiedenen Streßarten an einer einzigen Sorte auf demselben Feldschlag aufgeführt.

Zum besseren Verständnis werden nachfolgend die Begrifflichkeiten, die Einstrahlungsstärke betreffend, erläutert: „Geringere Einstrahlungsstärken“ treten morgens und abends bzw. bei höherem Bewölkungsgrad auf. Mit „höheren Einstrahlungsstärken“ sind Einstrahlungsstärken gemeint, die tagsüber, zumeist spätvormittags, frühnachmittags und vor allem mittags bei direkter Sonneneinstrahlung auftreten. Bei „höheren Einstrahlungsstärken“ sind PHS und PAR hoch korreliert und es tritt kein Mittagshitzestreß auf. Der sogenannte „Mittagshitzestreß“ ist der Zustand, in dem die Photosyntheserate durch extrem hohe Einstrahlungsstärken und Temperaturen gedrosselt wird, d.h. PHS und PAR sind nicht mehr miteinander korreliert.

3.1 Versuchsdurchführung

3.1.1 Methodische Versuche

3.1.1.1 Abdunklungsversuche

Mit den Abdunklungsversuchen sollte das gegenläufige Verhalten der sonnenlicht-induzierten Chlorophyll-Fluoreszenz und der Photosyntheserate von

dunkeladaptierten Pflanzen bei Wiederbelichtung unter sonst konstanten Faktoren festgestellt wurden (Induktionskinetik nach KAUTSKY und HIRSCH, 1931).

Während des gesamten Versuchs wurden an einem Blatt eines Pflanzenbestandes automatische Referenzmessungen vom LI-COR 6400 durchgeführt. Die Meßintervalle wurden dabei an die Meßdauer des Spektrometers angepaßt. Zur Abdunklung wurde eine Kiste (ca. 80 cm breit, 110 cm lang, 70 cm hoch) auf den Bestand gesetzt, den Sensorkopf des LI-COR 6400 vollständig miteinschließend, womit der Bestand vollkommen abgedunkelt war. Auch an der Stelle, wo die Kabel des Photosynthesemeßgeräts den unteren Kistenrand passierten, wurde das Licht hinreichend aus der Kiste ausgeschlossen. Ein aufklappbarer Deckel war am Rand mit überhängender schwarzer Folie abgeklebt, um auch hier eine vollständige Abdunklung zu erreichen. Die Änderung der physiologischen Parameter konnte an der sich außerhalb der Kiste befindenden Zentraleinheit des LI-COR 6400 abgelesen werden. Die Messung der sonnenlicht-induzierten Chlorophyll-Fluoreszenz mit dem Spektrometer konnte nur ohne die Abdunklung (also erst nach deren Wegnahme) durchgeführt werden.

Nach ca. 15 min der Abdunklungsphase wurde der dunkeladaptierte Bestand durch Deckelaufklappen wiederbelichtet und sofort mit Spektrometer und LI-COR 6400 fünf Minuten lang simultan und im Gleichtakt bemessen. Die aufgeklappte Kiste konnte dann zwischen zwei weiteren Messungen ganz entfernt werden. Die Durchführung der Versuche bei Sonnenhöchststand und wolkenlosem Himmel ließ die Unterschiede der Meßergebnisse zwischen abgedunkeltem und belichtetem Bestand noch deutlicher hervortreten.

3.1.1.2 Wolkendurchzugsfelder

Bei den Messungen unter durchziehenden Wolkenfeldern ändert sich von den ansonsten als konstant angenommenen Faktoren nur die Sonneneinstrahlung um die der Dichte und Höhe des Wolkenfeldes entsprechenden Intensität. Es wurden mit LI-COR 6400 und Spektrometer kontinuierlich Messungen im Abstand von 12 Sekunden unter durchziehenden Wolkenfeldern durchgeführt. Am besten geeignet war dabei ein ansonsten strahlungsreicher Tag mit durchziehenden größeren und kompakten Wolkenfeldern verschiedener Größe. Es wurden kontinuierliche Messungen über eine halbe Stunde mit insgesamt zwei Wolkendurchzugsfeldern aufgenommen.

3.1.2 Tagesgänge

Mit Spektrometer und LI-COR 6400 wurde versucht, vor allem ganze Tagesgänge aufzunehmen. Am besten geeignet hierfür waren durchweg sonnige, wolkenlose und trockene bzw. regenfreie Tage. Ein durchaus limitierender Faktor für das Aufnehmen ganzer Tagesgänge waren neben der weiter oben beschriebenen zeitlich limitierten Nutzung der Meßgeräte vor allem spontane, nicht vorhergesagte Wetterumschwünge, z.B. Gewitter.

Zuerst wurde ein repräsentativer Tagesgang an einer einzigen Pflanzenart (*Beta vulgaris* var. *altissima* L. 'Tatjana'), ohne irgendeine induzierte Streßeinwirkung aufgenommen: Zusätzlich zu den stündlich stattfindenden Messungen mit dem Photosynthesemeßgerät und dem Spektrometer wurde die Chloroplastenbewegung über den Tag hinweg verfolgt. Zuckerrüben besitzen nicht nur in den Stomata, sondern auch in den übrigen Epidermiszellen Chloroplasten und das nicht nur – wie sonst üblich – an der Blattunterseite, sondern auch an der Blattoberseite. Die stündliche Entnahme der ca. 2 x 2 cm² großen Blattteilstücke erfolgte vom jüngsten voll ausgebildeten Blatt von einem voll bestrahlten, d.h. der Sonne horizontal zugewandten Blattsektor. Der Abzug der oberen Epidermis dieses Blattsektors wurde so schnell wie möglich in einem Wassertropfen auf einem Objektträger präpariert. Die Untersuchung der Frischpräparate erfolgte mit dem Axioplan Mikroskop der Firma Carl Zeiss unter dem Objektiv 50 und dem Projektiv 3,2. Von diesen wurden traditionelle, blattfüllende Bleistiftzeichnungen auf DinA4-Seiten angefertigt, welche eingescannt und verkleinert wurden.

In den nachfolgend aufgenommenen Tagesgängen wurden meist zwei Extremvarianten einer Streßart (z.B. gar keine Stickstoffdüngung und eine Gesamtstickstoffgabe von 160 kg ha⁻¹) im 1,5- bis 2-Studentakt von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang bemessen. Pro Meßabschnitt wurden mit dem LI-COR 6400 pro Parzelle fünf Blätter mit je zehn Messungen, also insgesamt 50 Messungen, erfaßt. Mit dem Spektrometer erfolgten meist 50 Messungen pro Variante (z.B. zehn Messungen in fünf Parzellen).

Später wurden die Tagesgänge auch allein mit dem Spektrometer aufgezeichnet, wodurch die zu messende Parzellenanzahl gesteigert werden konnte. Bei diesen Gelegenheiten konnte auch gleich getestet werden, ob die Ergebnisse des Spektrometers allein auf der Basis der Ergebnisse von vorhergehenden

vergleichenden Messungen von Spektrometer und LI-COR 6400 nachvollziehbar sind.

3.2 Ergebnisse der Versuchsdurchführung

3.2.1 Methodische Versuche

3.2.1.1 Abdunklungsversuche

Für die Schilderung der Abdunklungsversuche wird im Folgenden zuerst auf den Status des hier untersuchten *Galinsoga*-Bestandes vor und während der Abdunklungsphase (Datenreihen der Tabelle 33a im Anhang) eingegangen; erst danach werden die Vorgänge in der Wiederbelichtungsphase nach Wegnahme der Abdunklung (Datenreihen der Tabelle 33b im Anhang) beschrieben:

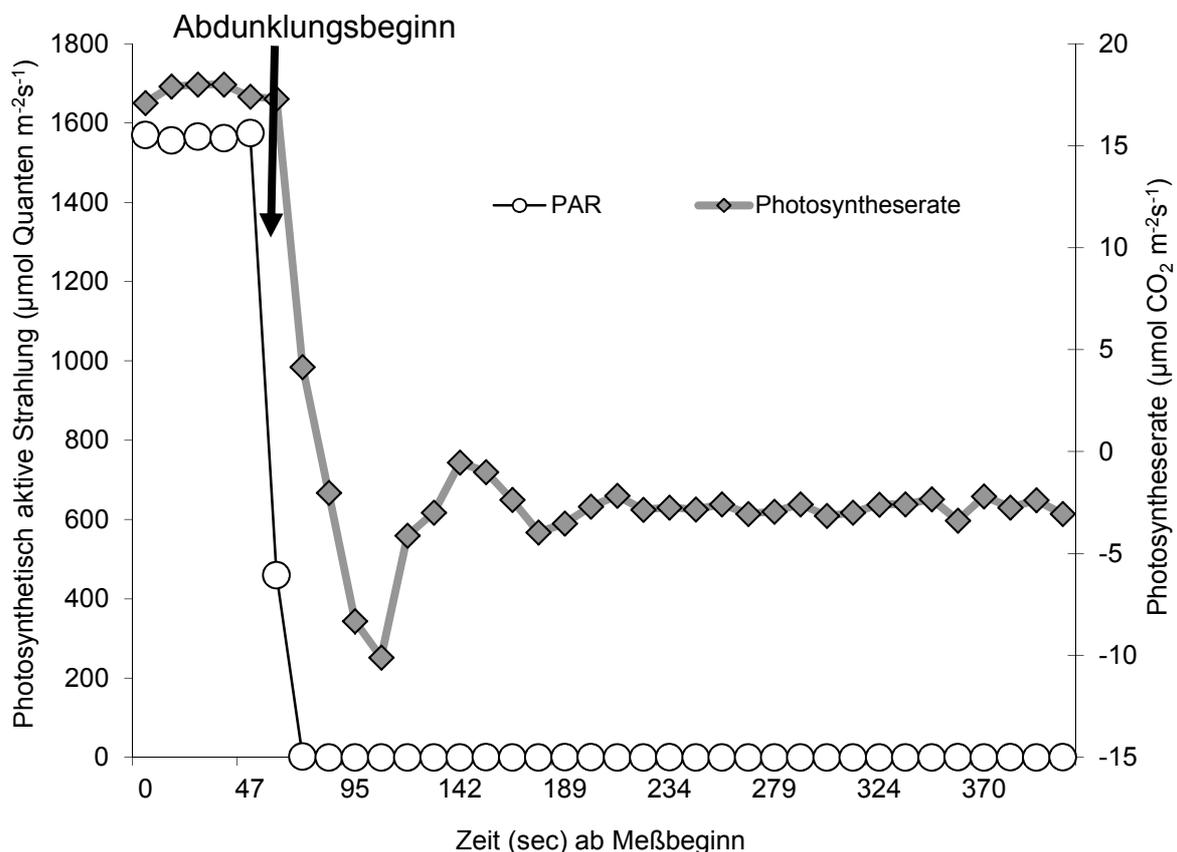


Abbildung 11. Dunkeladaption: Verlauf der photosynthetisch aktiven Strahlung und der Photosyntheserate kurz vor und während der Abdunklung am 19. August 2002 bei *Galinsoga* ssp., Meßbeginn: 12:56 Uhr

Vor der Abdunklung hatte die photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) einen Wert von ca. $1.566 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ und lag während der Abdunklungsphase zwischen 0 und $1 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Abb. 11): Es wurde also eine fast

vollständige Abdunklung erreicht. Die Lufttemperatur als Faktor veränderte sich durch die unterschiedlichen Belichtungsverhältnisse nur äußerst geringfügig (Abb. 12).

Der *Galinsoga*-Bestand assimilierte vor der Abdunklung ca. $15 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (59. Sekunde ab Meßbeginn, Abb. 11). Mit einsetzender Abdunklung sank die Nettophotosyntheserate innerhalb einer Minute mit Schwankungen ab. Ab der 200. sec ab Meßbeginn pendelte sich die PHS (Photosyntheserate) in einen Gleichgewichtszustand bei ca. $-3 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ein, was bedeutete, daß sich der bemessene Blattausschnitt in Atmung befand, also CO_2 abgab. Es war davon auszugehen, daß das lokale Minimum zur 119. Meßsekunde gerätebedingt war, da der LI-COR 6400 den Anteil von CO_2 und H_2O im Gasmisch den neuen Lichtverhältnissen anpassen mußte.

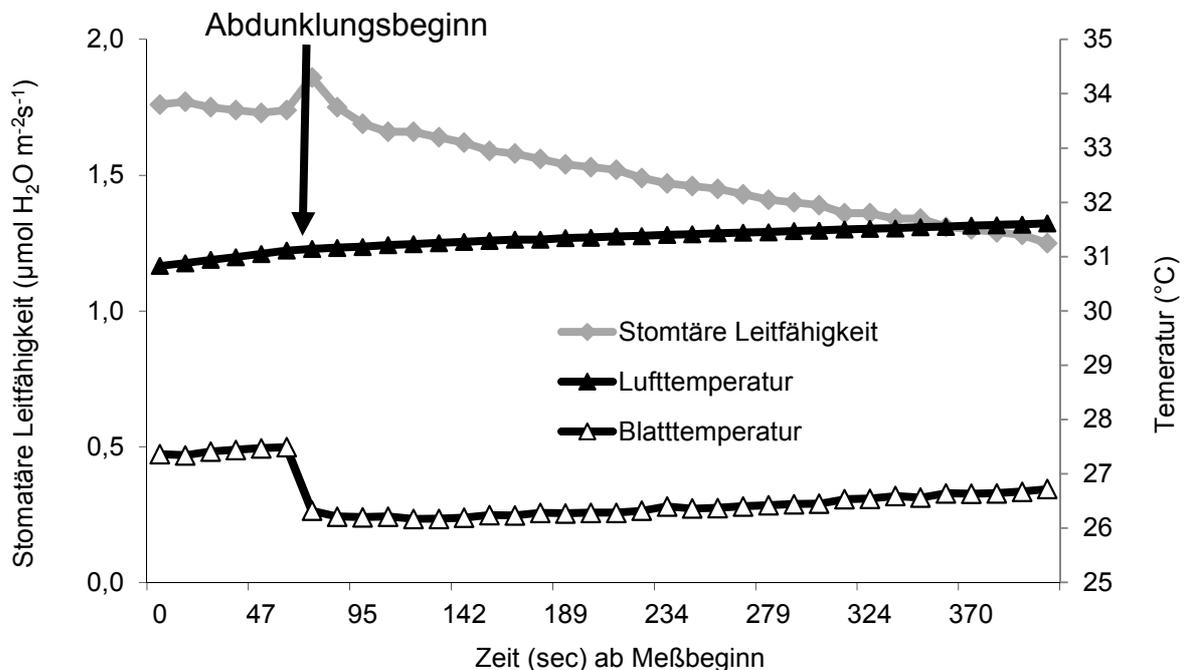


Abbildung 12. Dunkeladaption: Verlauf der stomatären Leitfähigkeit sowie der Lufttemperatur und Blatttemperatur kurz vor und während der Abdunklung am 19. August 2002 bei *Galinsoga* ssp., Meßbeginn: 12:56 Uhr

Die Lufttemperatur nahm während dieses ersten Versuchsteils scheinbar unabhängig von der Abdunklung von $30,8^{\circ}\text{C}$ auf $31,6$ (405. Meßsekunde) zu. Sehr viel mehr von der Abdunklung berührt war die Blatttemperatur, die bis zur Abdunklung bei durchschnittlich $27,4^{\circ}\text{C}$ lag, mit einem kontinuierlichen Anstieg ähnlich dem Anstieg der Lufttemperatur (Abb. 12). Mit der Abdunklung aber fiel die

Blatttemperatur rapide innerhalb von 12 Sekunden von 27,5 °C auf 26,2 °C ab, was einer Differenz von 1,3 °C entsprach.

Die stomatäre Leitfähigkeit (Abb. 12) nahm von durchschnittlich 1,76 mol H₂O m⁻²s⁻¹ ab Meßbeginn kontinuierlich auf 1,25 mol H₂O m⁻²s⁻¹ in der 405. Meßsekunde ab. In der 71. Meßsekunde stieg die stomatäre Leitfähigkeit kurzfristig auf 1,86 mol H₂O m⁻²s⁻¹ an, was wie die Schwankungen der PHS als gerätebedingt angesehen werden konnte.

Die Abdunklung wurde nun für ca. 20 min auf dem Bestand belassen, ein Erfahrungswert, bei dem sichergestellt sein konnte, daß der Bestand auch wirklich und vollständig dunkeladaptiert war. Kurz vor Ende der Abdunklungsphase wurden die automatischen Messungen mit dem LI-COR 6400 wieder aufgenommen, um die anhaltende Dunkeladaptation des Bestandes mit einer Atmungsrate von ca. -2 µmol CO₂ m⁻²s⁻¹ aufzuzeichnen (Abb. 13; 0. bis 150. sec).

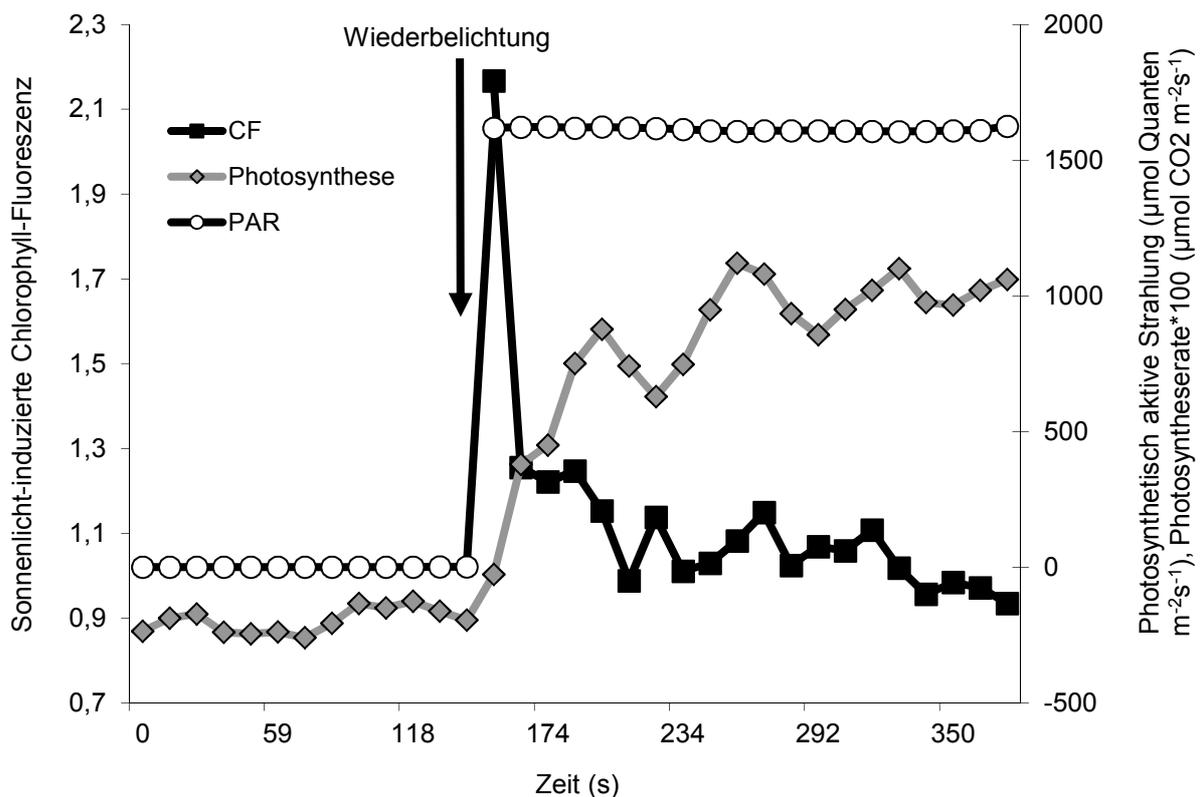


Abbildung 13. Wiederbelichtungsphase: Verlauf von photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR), sonnenlicht-induzierter Chlorophyll-Fluoreszenz (CF) und Photosyntheserate in einem Abdunklungsversuch (Wiederbelichtung ab der 150. Sekunde) am 19. August 2002 bei *Galinsoga* ssp., Meßbeginn 13:15 Uhr

Mit der Wiederbelichtung durch das Entfernen der Abdunklung nahm die PAR (photosynthetisch aktive Strahlung) abrupt von durchschnittlich $0,44 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (0. bis 150. sec ab Meßbeginn, Abb. 13) auf konstante $1.630 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (ab 151. Meßsekunde) zu. Die PHS aber wuchs kontinuierlich – unter gerätebedingten Schwankungen – an und erreichte nach ca. 3 min einen Gleichgewichtszustand bei durchschnittlich $13 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Der Bestand wurde sofort und unmittelbar mit dem Aufklappen des Kistendeckels mit dem Spektrometer bemessen. Dabei wurden die spektrometrischen Messungen simultan mit denen des LI-COR 6400 durchgeführt. Die erste Messung der sonnenlicht-induzierten Chlorophyllfluoreszenz (CF) fand also punktgenau mit der Messung des Photosynthesemeßgeräts in der 151. Meßsekunde statt. Die CF war zuerst hoch bei ca. 2,17 (Abb. 13) und fiel dann kontinuierlich mit kleinen Schwankungen auf durchschnittlich 1,07 ab, was einer Änderung von insgesamt 50,5 % entsprach. Die CF verlief also in derselben Zeitspanne (151. Meßsekunde bis Meßende) gegenläufig zur PHS: Während die CF noch hoch war, befand sich die PHS auf einem niedrigen Niveau. Und als die PHS anstieg, sank die CF auf ein niedriges Niveau. Hier lag ganz klar ein induktionskinetischer Verlauf von PHS und CF vor, wie bereits von MAIER et al. (2003) beschrieben. Die Bedeutung lag darin, daß hier eine Umverteilung der aPAR (absorbierte photosynthetisch aktive Strahlung) im PSII mit Meßgeräten in einem Freilandversuch aufgenommen werden konnte: Als kurz nach der Wiederbelichtung noch gar keine aPAR im PSII in die PHS geleitet wurde, floß die meiste aPAR in die CF und andere (hier nicht bemessene) Prozesse, z.B. Wärmeabgabe des PSII. Sobald aber die aPAR wieder vermehrt in die chemische Arbeit (PHS) einfloß, wurde weniger aPAR in die CF umgeleitet, die dann auch absank. Diese hier unter freiem Himmel bewiesene Kautsky-Kinetik bedeutete vor allem den Beweis, daß die CF wie die Photosynthese aus dem PSII originierte.

Während der fast 20 Minuten dauernden Abdunklungsphase war die Lufttemperatur von $31,6 \text{ }^\circ\text{C}$ (Abb. 12, letzter Meßwert in 405. sec) kontinuierlich auf $32,4 \text{ }^\circ\text{C}$ (Abb. 14, 0. Meßsekunde) und bis zur 372. Meßsekunde weiter auf $33,39 \text{ }^\circ\text{C}$ angestiegen: Hier fand keine gravierende oder spontane Veränderung des Verlaufs durch die Wiederbelichtung statt. Bei der Blatttemperatur hingegen fanden dramatischere Veränderungen durch die Wiederbelichtung statt (Abb. 14): Während der Abdunklungsphase ist die Blatttemperatur weiter kontinuierlich von $26,7 \text{ }^\circ\text{C}$ (Abb. 12, letzter Meßwert) auf $29,1 \text{ }^\circ\text{C}$ angestiegen, mit einer Differenz von $2,4 \text{ }^\circ\text{C}$

zwar stärker als die Lufttemperatur, die nur ca. 1 °C Differenz in diesem Zeitraum aufwies. Der Verlauf der Blatttemperatur war bei der Wiederbelichtung durch einen steilen Anstieg um 1,5 °C auf 30,6 °C in der 151. Meßsekunde gekennzeichnet. Bis

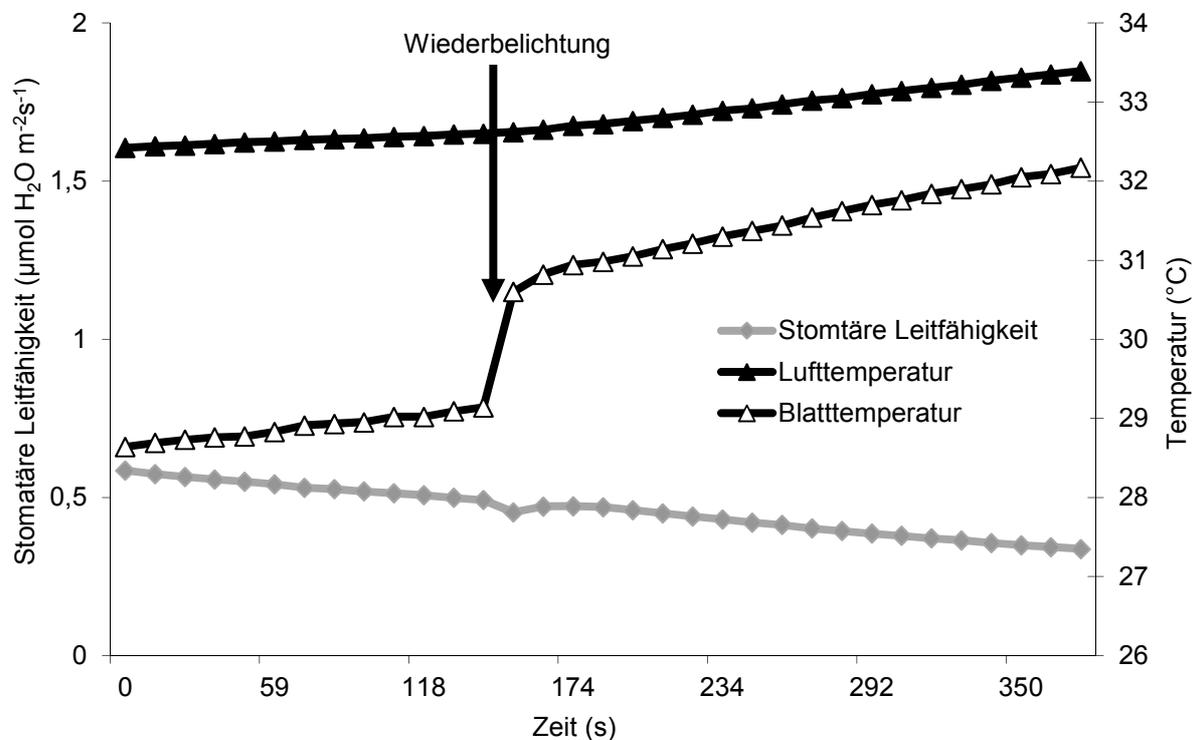


Abbildung 14. Wiederbelichtungsphase: Verlauf der stomatären Leitfähigkeit sowie der Blatttemperatur und Lufttemperatur in einem Abdunklungsversuch (Wiederbelichtung ab der 150. Sekunde) am 19. August 2002 bei *Galinsoga* ssp., Meßbeginn 13:15 Uhr

zum Versuchsende wuchs die Blatttemperatur wieder kontinuierlich, aber auch stärker als während der Abdunklungsphase um weitere 1,6 °C auf 32,2 °C an (372. Meßsekunde, Abb. 14). An der Steigerung der Blatttemperatur war vermutlich auch eine vermehrte Wärmeabgabe des PSII beteiligt.

Die stomatäre Leitfähigkeit nahm während der Abdunklungsphase kontinuierlich von 1,75 mol H₂O m⁻²s⁻¹ (Abdunklungsbeginn) auf durchschnittlich 0,34 mol H₂O m⁻²s⁻¹ (372. Meßsekunde, Abb. 14) ab. Dies hing damit zusammen, daß sich die Stomata aufgrund der geringen Lichtverhältnisse schlossen. Auch hier zeigten die Meßwerte wieder ein gerätebedingtes Minimum zur 152. Meßsekunde.

Während der Wiederbelichtungsphase aber nahm die stomatäre Leitfähigkeit weiterhin kontinuierlich ab, trotzdem die Photosyntheserate innerhalb weniger Minuten wieder angestiegen war. Ein kurzzeitiges Minimum von 0,45 mol H₂O m⁻²s⁻¹

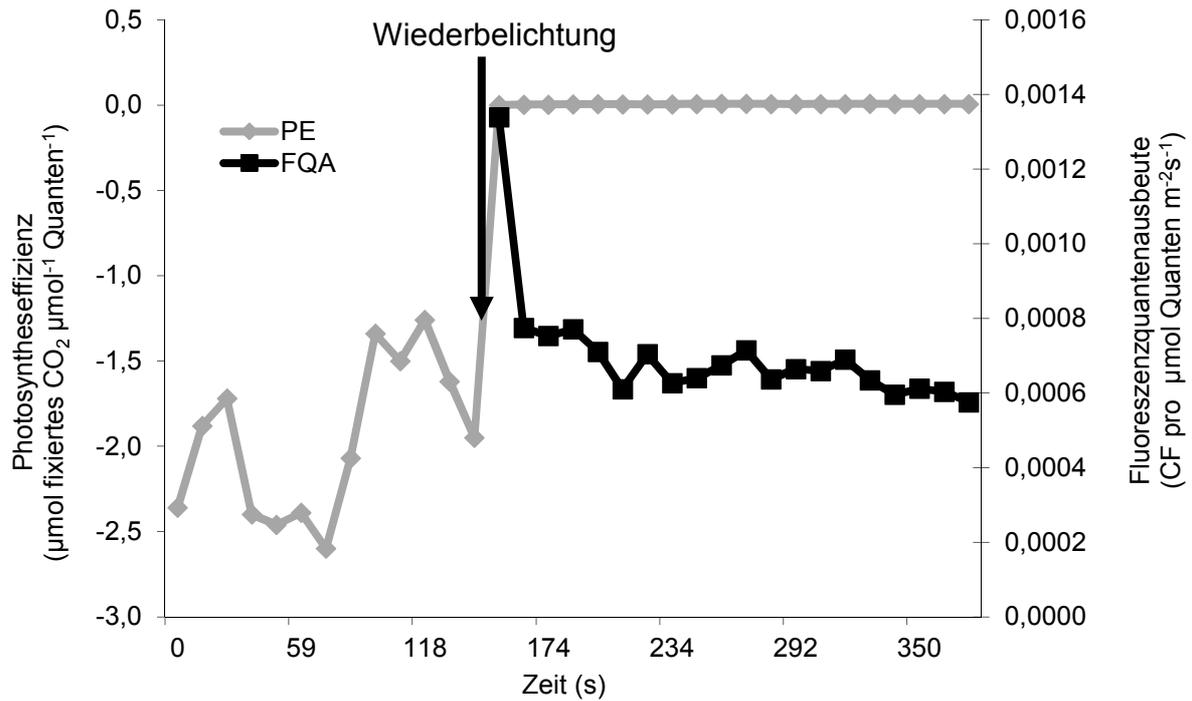


Abbildung 15. Wiederbelichtungsphase: Verlauf der PE und der FQA im Abdunklungsversuch (Wiederbelichtung ab der 150. Sekunde) am 19. August 2002 bei *Galinsoga* ssp., Meßbeginn 13:15 Uhr

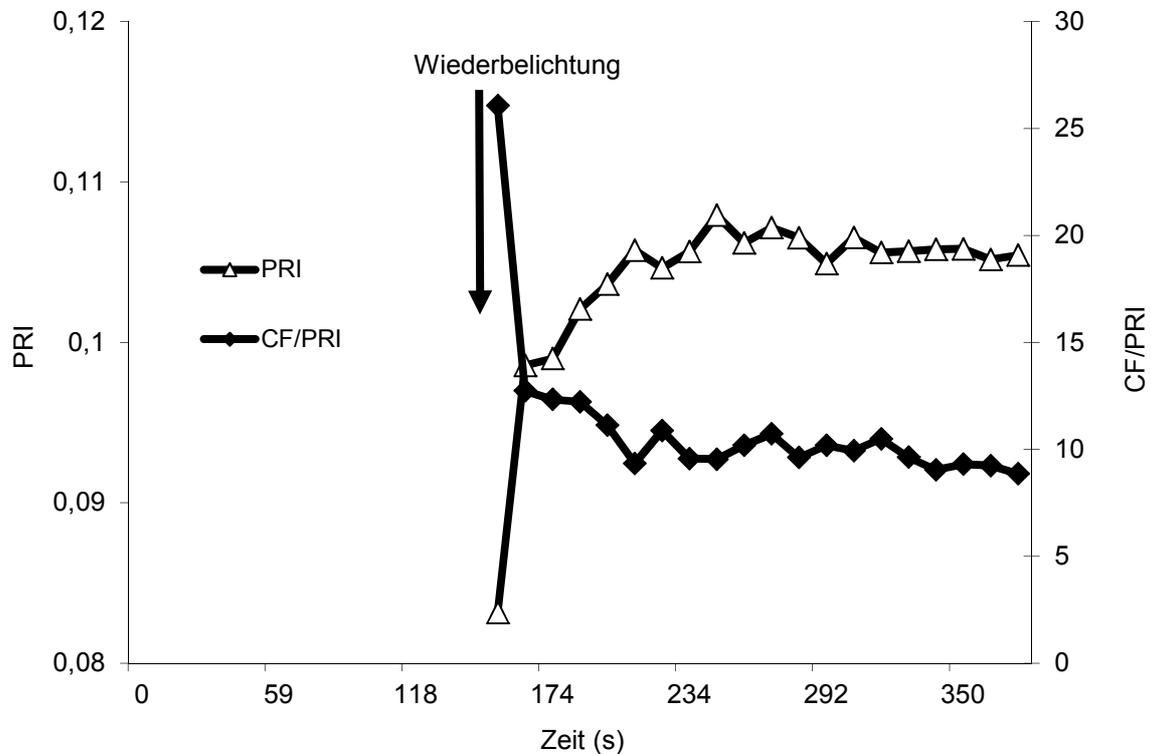


Abbildung 16. Wiederbelichtungsphase: Verlauf von PRI und CF/PRI im Abdunklungsversuch (Wiederbelichtung ab der 150. Sekunde) am 19. August 2002 bei *Galinsoga* ssp., Meßbeginn 13:15 Uhr

in der 151. Meßsekunde kurz nach Wiederbelichtung wurde als gerätebedingt eingestuft; genauso verhielt es sich mit dem Maximum von $1,86 \text{ H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ in der 71. Meßsekunde.

Interessehalber seien hier noch die Verläufe von PE (Photosyntheseeffizienz) und FQA (Fluoreszenzquantenausbeute) aufgeführt (Abb. 15): Die PE hatte kurz vor der Wiederbelichtung einen durchschnittlichen Wert von $-2 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ pro μmol eingestrahlt Lichtquanten $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, nach der Wiederbelichtung lag sie bei durchschnittlich $0,008 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ pro μmol eingestrahlt Lichtquanten $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ und hatte einen konstanten Verlauf. Anders dazu war die FQA bei der ersten Messung nach der Wiederbelichtung hoch mit einem Wert von 2,17 pro μmol eingestrahlt Lichtquanten $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ und danach geringer bei 0,0007 pro μmol eingestrahlt Lichtquanten $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

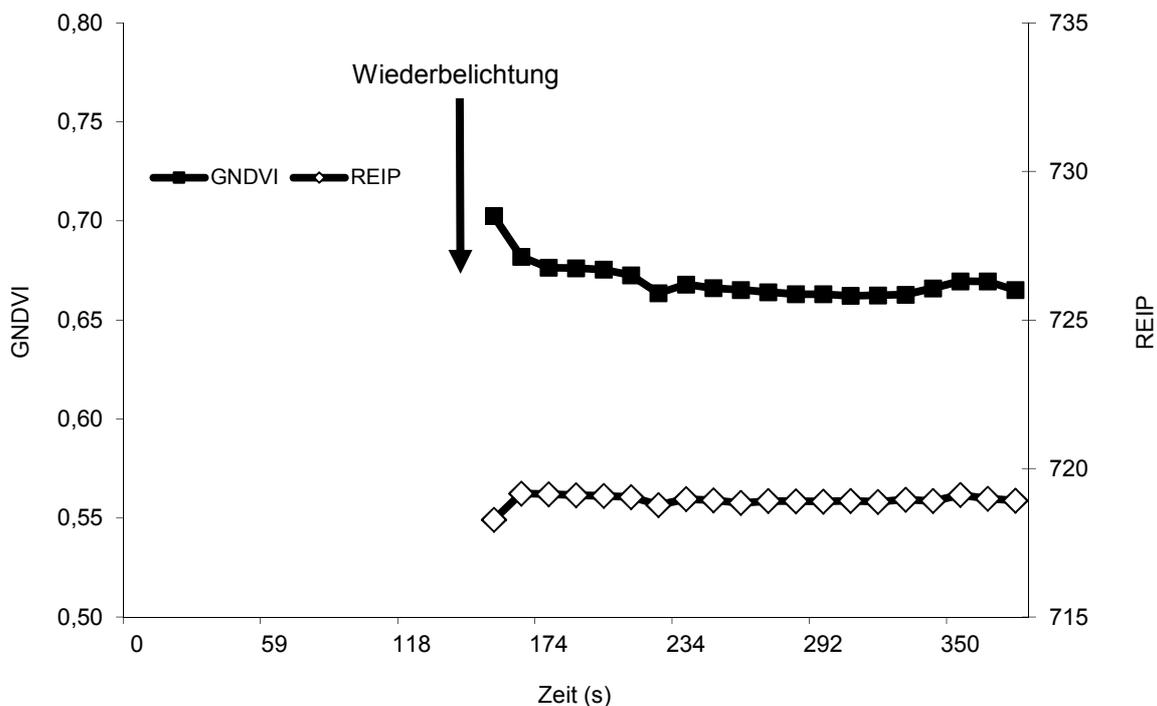


Abbildung 17. Wiederbelichtungsphase: Verlauf von Red Edge Inflection Point (REIP) und Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI) in einem Abdunklungsversuch (Wiederbelichtung ab der 150. Sekunde) am 19. August 2002 bei *Galinsoga ssp.*, Meßbeginn 13:15 Uhr

Von den Vegetationsindizes reagierte der tagesveränderliche PRI (Photochemical Reflectance Index) mit den größten Veränderungen: Er verlief entgegengesetzt zur CF, indem er kontinuierlich von 0,083 (151. sec, Abb. 16) um 26,9 % auf konstante 0,106 (ab 234. sec) zunahm, und mehr oder weniger gleichläufig mit der PHS verlief:

Hier wurde der Xanthophyllzyklus durch das hohe Lichtangebot aktiv. Der PRI zeigte hier einen inversen Verlauf zur CF in der Kautsky-Kinetik. Der Xanthophyllzyklus originiert nicht wie CF und Photosynthese direkt aus dem PSII, sondern ist diesem zwar vorgeschaltet, reagierte hier aber als ein ebenso lichtabhängiger Prozeß wie die CF und die PHS.

Der Quotient CF/PRI, beide lichtableitenden Prozesse vereinend, hatte bei der ersten Messung nach der Wiederbelichtung einen hohen Wert (CF/PRI = 26,1 in der 151. Meßsekunde; Abb. 16). Dann aber sank er auf ein Level von ca. 10,0 ab der 198. Meßsekunde) ab. Der hohe Wert von CF/PRI könnte so interpretiert werden, daß der Bestand in Relation zu einem geringen Aktivitätsniveau des Xanthophyllzyklus (geringer PRI) sehr stark fluoreszierte, später aber die CF im Vergleich zu einer hohen Aktivität des Xanthophyllzyklus (hoher PRI) schwächer war.

Die tageskonstanten Vegetationsindizes veränderten sich in der Wiederbelichtungsphase nur unwesentlich: Der REIP (Red Edge Inflection Point) als Parameter für die grüne Biomasse stieg von der ersten bis zur zweiten spektrometrischen Messung nur geringfügig an (s. Abb. 17 und Anhang). Ebenso waren GNDVI und RVI einer minimalen Änderung unterworfen (s. Abb. 17 und Anhang).

Mit diesem neuartigen und einfachen Versuchsaufbau konnte anhand der simultanen Messungen von PHS und CF die Induktionskinetik der CF unter Freilandbedingungen gezeigt werden. Diese Ergebnisse untermauerten die Vermutungen von MAIER *et al.* (1999), daß die CF wie die PHS aus dem Photosystem II stammt und die aPAR durch unterschiedliche Belichtungsverhältnisse im PSII in veränderlichen Mengen in diese beiden Prozesse umverteilt wird. Auch konnte eine dramatische und sekundenschnelle Veränderung der Blatttemperatur durch die Abdunklung und die Wiederbelichtung realisiert werden, an der höchstwahrscheinlich die Wärmeabgabe des PSII und auch des Xanthophyllzyklus einen nicht zu unterschätzenden Anteil hatten. Diese induktionskinetische Dynamik konnte an verschiedenen Pflanzenbeständen (*Galinsoga* ssp. und *Brassica napus* var. *napus*) wiederholt repliziert werden (s. Anhang).

3.2.1.2 Wolkendurchzugsfelder

Hier wurde das Verhalten von CF und PHS unter durchziehenden einzelnen Wolkenfeldern an einem ansonsten strahlend blauen Himmel untersucht. So galten

die sich ändernden Lichtverhältnisse als einziger variabler Faktor. Die Unterschiede zwischen den dadurch auftretenden veränderten Einstrahlungsstärken waren also geringer als in den Abdunklungsversuchen. Zur Versuchsdurchführung wurden kontinuierliche, simultane Messungen mit dem Spektrometer und dem LI-COR 6400 durchgeführt.

Die Wolkenfelder waren unterschiedlich groß, dick und dicht, so daß z. B. eine kleine und weniger kompakte Wolke den Meßort bei mehr oder weniger konstanter Windgeschwindigkeit kürzer und schwächer als eine große verdunkelt. Eine dichte und dicke Wolke verringert die Einstrahlung mehr als eine dünne Wolke. Auch die inhomogene Struktur innerhalb einer Wolke selber konnte zu unterschiedlichen Einstrahlungsstärken während des Durchzugs derselben führen.

So lag die Sonneneinstrahlung vor dem ersten Wolkendurchzug bei ca. $1.760 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ($\text{PAR}_{\text{außen}}$, Abb. 20). Die erste kleinere Wolke verringerte die Einstrahlung zwischen 13:06:30 Uhr (hh:mm:ss) und 13:07:07 Uhr auf ca. $700 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$, das zweite größere Wolkenfeld (13:09:33 bis 13:17:41 Uhr) auf durchschnittlich $492 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Die Einstrahlungsspitzen um 13:06:55 Uhr ($785 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$), um 13:09:45 Uhr ($915 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$) und um 13:14:50 Uhr ($790 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$) sowie der leichte, kontinuierliche Anstieg der $\text{PAR}_{\text{außen}}$ von $424 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (13:12:14 Uhr) auf $560 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (13:17:41 Uhr) waren durch Inhomogenitäten in der Wolkendichte verursacht. Um 13:18:24 Uhr war auch das zweite Wolkenfeld vollständig vorbeigezogen: ab diesem Zeitpunkt lag die $\text{PAR}_{\text{außen}}$ bei durchschnittlich $1.645 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Die Werte von $\text{PAR}_{\text{innen}}$ (nicht dargestellt) waren um durchschnittlich $163 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ geringer als die von $\text{PAR}_{\text{außen}}$.

Die Lufttemperatur (Abb. 18) war zuerst von einem leichten kontinuierlichen Anstieg von $33,4$ auf $34,7$ °C (12:58:00 bis 13:06:42 Uhr) und danach bis Meßende von einer Abnahme auf $32,9$ °C geprägt. Die Blatttemperatur (Abb. 18) lag um durchschnittlich $1,3$ °C unter der Lufttemperatur und war zu $80,6$ % mit $\text{PAR}_{\text{innen}}$ korreliert: Während des ersten Wolkenfeldes verringerte sich auch die Blatttemperatur innerhalb von Sekunden von $33,9$ °C (13:06:20 Uhr) auf $32,5$ °C (13:07:07 Uhr) und nahm kontinuierlich während des zweiten Wolkenfeldes von $32,9$ °C (13:09:45 Uhr) auf $31,1$ °C (13:17:53 Uhr) ab. Bemerkenswert neben der

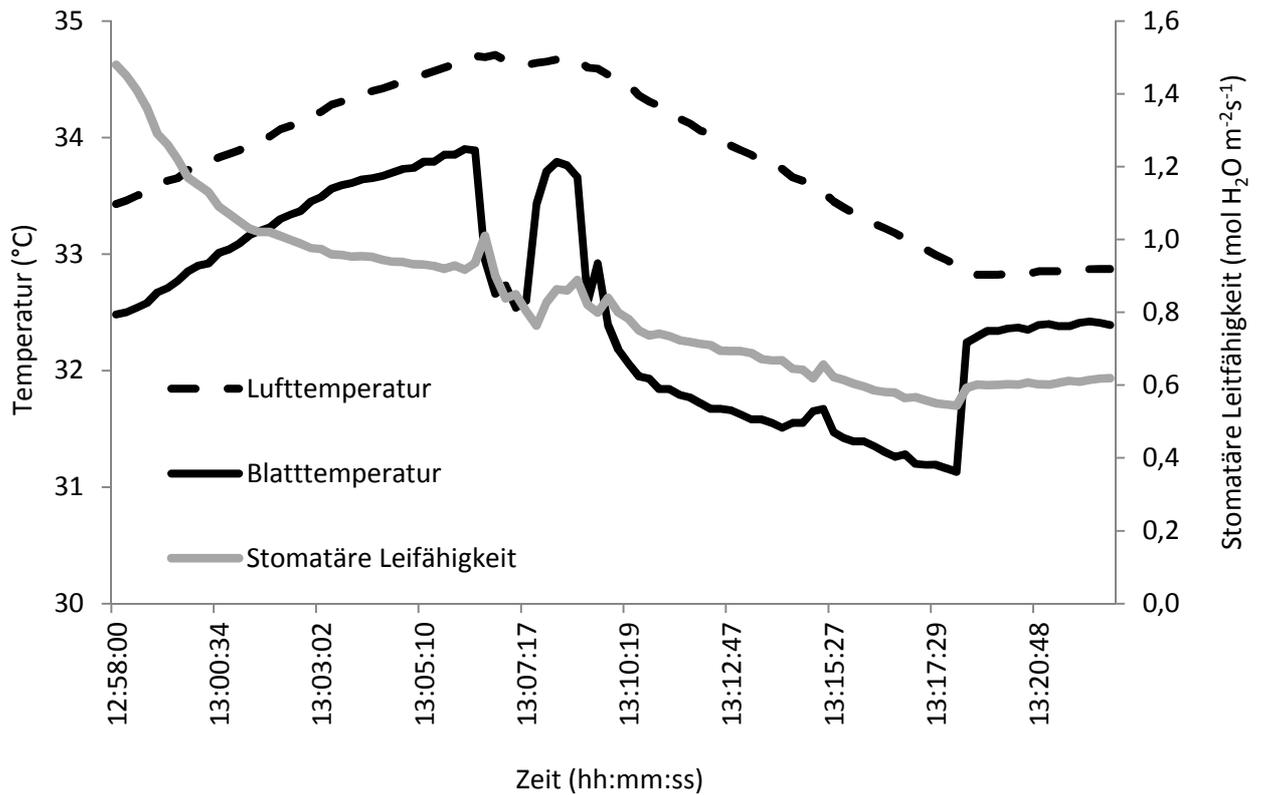


Abbildung 18. Verlauf von Luft- und Blatttemperatur sowie stomatärer Leitfähigkeit unter durchziehenden Wolkenfeldern bei Raps (29. August 2002)

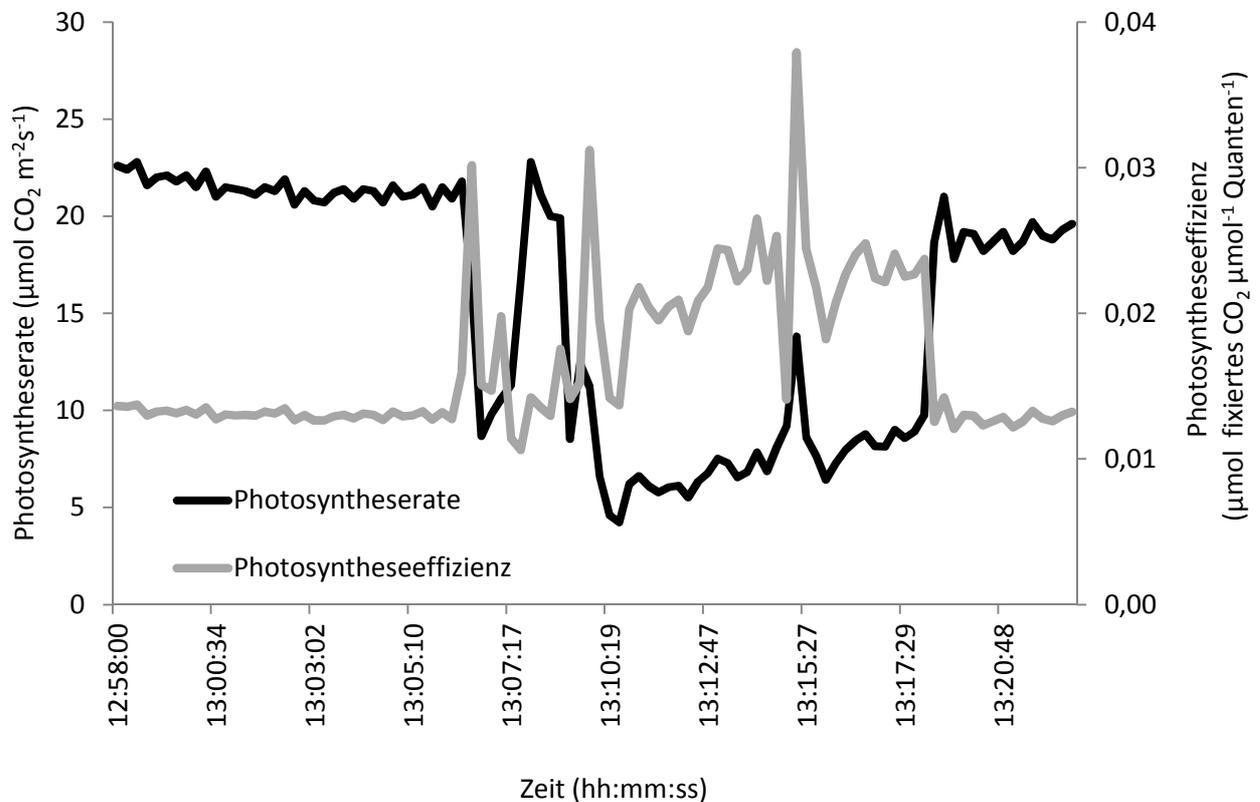


Abbildung 19. Verlauf der Photosyntheserate und der Photosyntheseeffizienz unter durchziehenden Wolkenfeldern bei Raps (29. August 2002)

außerordentlichen schnellen Anpassung der Blatttemperatur im Gegensatz zum kontinuierlichen Verlauf der Lufttemperatur waren außerdem drei kleine Peaks um 13:06:55, 13:09:45 und 13:15:01 Uhr: Das waren die Zeitpunkte, an denen auch die $PAR_{\text{außen}}$ kleine Peaks hatte (vergleiche Abb. 20).

Die stomatäre Leitfähigkeit (Abb. 18) nahm von Meßbeginn bis -ende kontinuierlich von 1,5 auf 0,5 mol $H_2O\ m^{-2}s^{-1}$ ab. Auch dieser Verlauf war von drei kleineren Peaks um 13:06:30 Uhr (simultan mit der Abnahme der $PAR_{\text{außen}}$), 13:09:10 (simultan mit der Abnahme der $PAR_{\text{außen}}$) und 13:15:01 Uhr gekennzeichnet. Um 13:18:24 Uhr war auch die stomatäre Leitfähigkeit wie die Blatttemperatur – wenn auch von einer kleineren – „Schulter“ gekennzeichnet.

Bei ungehindertem Sonneneinfall assimilierte der bemessene Ausschnitt eines Rapsblattes $21,5\ \mu\text{mol}\ CO_2\ m^{-2}s^{-1}$ (Abb. 19), unter dem ersten Wolkenfeld waren es durchschnittlich 11,3 und unter dem zweiten großen nur $7,8\ \mu\text{mol}\ CO_2\ m^{-2}s^{-1}$. Wo die Sonneneinstrahlung im zweiten Wolkenfeld kleine lokale Maxima hatte, war auch die PHS kurzzeitig erhöht mit 12,4 (13:09:45 Uhr) und $13,8\ \mu\text{mol}\ CO_2\ m^{-2}s^{-1}$ (13:15:01 Uhr), zu denselben Zeitpunkten, an denen auch die PAR kurzzeitig erhöht war. Die leichten Schwankungen im Verlauf der PHS waren gerätebedingt. Die Korrelation zwischen PAR_{innen} und der PHS lag bei 96,2 % (s. Anhang). Die PHS reagierte meist etwas zeitversetzt auf die Änderungen der PAR. Die PE (Photosyntheseeffizienz, Abb. 19) zeigte bei hohen Einstrahlungsstärken größer als $1.500\ \mu\text{mol}\ \text{Quanten}\ m^{-2}s^{-1}$ ein konstant verlaufendes niedriges Niveau (ca. $0,013\ \mu\text{mol}\ \text{fixiertes}\ CO_2\ \mu\text{mol}^{-1}\ \text{Quanten}^{-1}$) als bei geringeren Einstrahlungsstärken (ca. $0,022\ \mu\text{mol}\ \text{fixiertes}\ CO_2\ \mu\text{mol}^{-1}\ \text{Quanten}^{-1}$), hervorgerufen die Wolkenfelder: Bei geringeren Einstrahlungsstärken verlief die Photosyntheserate effizienter als bei höheren Einstrahlungsstärken. Wohl ließ sich hier also eine leichte Form des Mittagshitzestresses ableiten. Der Verlauf der PE war durch drei lokale Maxima gekennzeichnet: Die ersten beiden um 13:06:30 und um 13:09:57 Uhr fanden zu einem Zeitpunkt statt, als PAR und PHS abnahmen. Das dritte Maximum um 13:15:01 Uhr mit kurz zuvor und danach passierten lokalen Minima fand gleichzeitig mit dem Maximum der PHS statt. Auch hier waren die sehr großen Amplituden in der sehr kurzen Reaktionszeit gerätebedingt.

Die CF (Abb. 20) korrelierte mit $PAR_{\text{außen}}$ zu 98,9 % (s. Anhang): In den Phasen der direkten Sonneneinstrahlung war sie hoch bei ca. 1,75, unter der ersten Wolke

bei durchschnittlich 0,62 und unter der zweiten bei 0,38, was einer Änderung um bis zu 76,5 % des gemessenen Maximalwertes entsprach. Außerdem war die CF zu 94,7 % mit der PHS korreliert und verlief weitestgehend parallel mit ihr. Verwiesen sei hier auf das auffallend geringe Maximum von PAR und CF um 13:14:50 Uhr, während PHS und auch PE ein paar Sekunden später um 13:15:01 Uhr größere

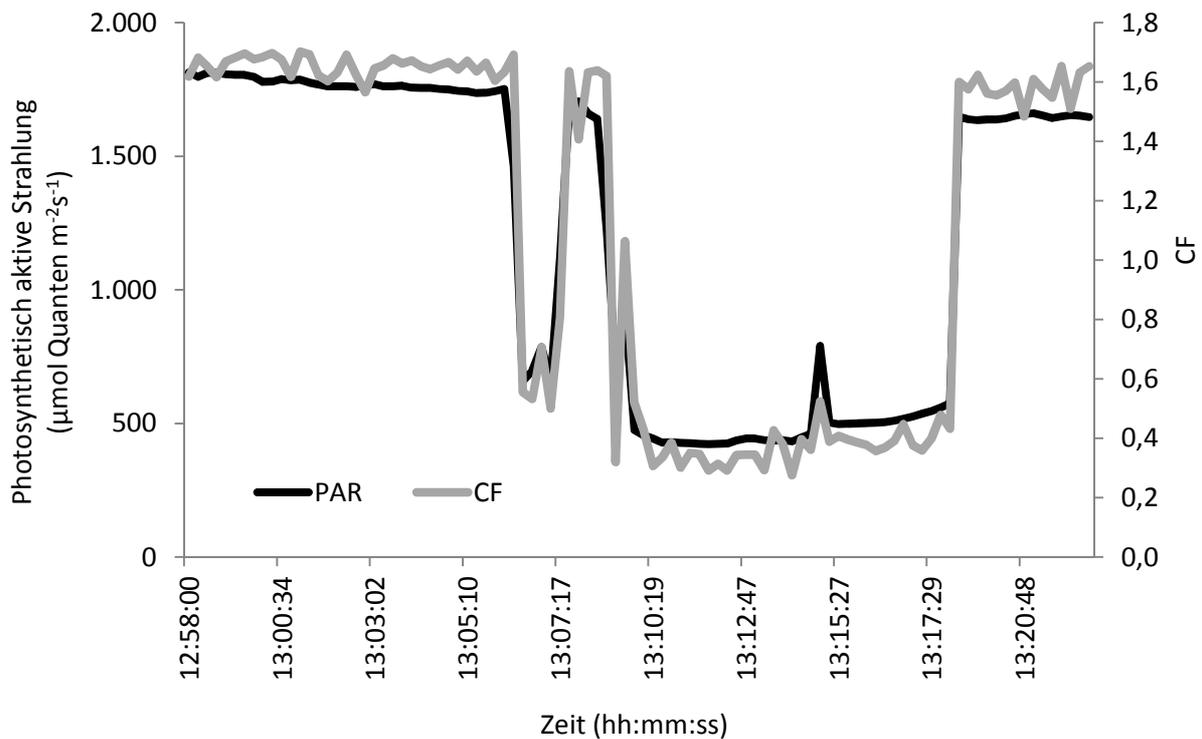


Abbildung 20. Verlauf der sonnenlicht-induzierten Chlorophyll-Fluoreszenz und $PAR_{\text{außen}}$ unter durchziehenden Wolkenfeldern bei Raps (29. August 2002)

Amplituden aufwiesen. Die leichten Schwankungen im Verlauf der CF konnten auf die Brise, die eine Bewegung der Blätter im Rapsbestand verursachte, zurückgeführt werden.

Die FQA (Abb. 22) lag bei voller Sonneneinstrahlung bei durchschnittlich $0,0009$ pro μmol eingestrahlt Lichtquanten $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ und unter den Wolkenfeldern bei durchschnittlich $0,0008$ pro μmol eingestrahlt Lichtquanten $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Der Verlauf der FQA war inhomogener als der von CF oder PAR alleine, v.a. unter den Wolkenfeldern. Daher war die Differenz zwischen den Werten unter und ohne Wolkenfelder geringer, bzw. nicht immer eindeutig, wie aus dem Kurvenverlauf von Abb. 19 zu ersehen. Bei gleichzeitiger Betrachtung der PE konnten induktionskinetische Vorgänge, d.h. Umverteilungsprozesse im PSII, nicht

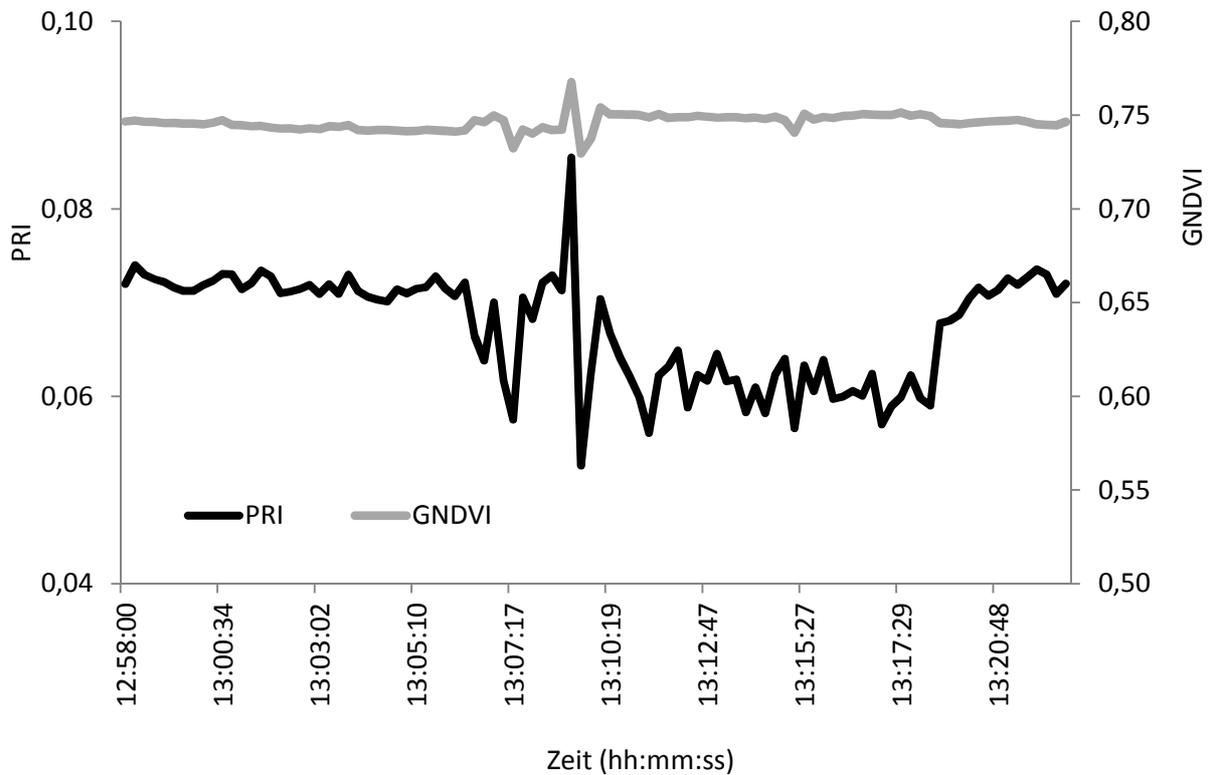


Abbildung 21. Verlauf von GNDVI und PRI unter durchziehenden Wolkenfeldern bei Raps (29. August 2002)

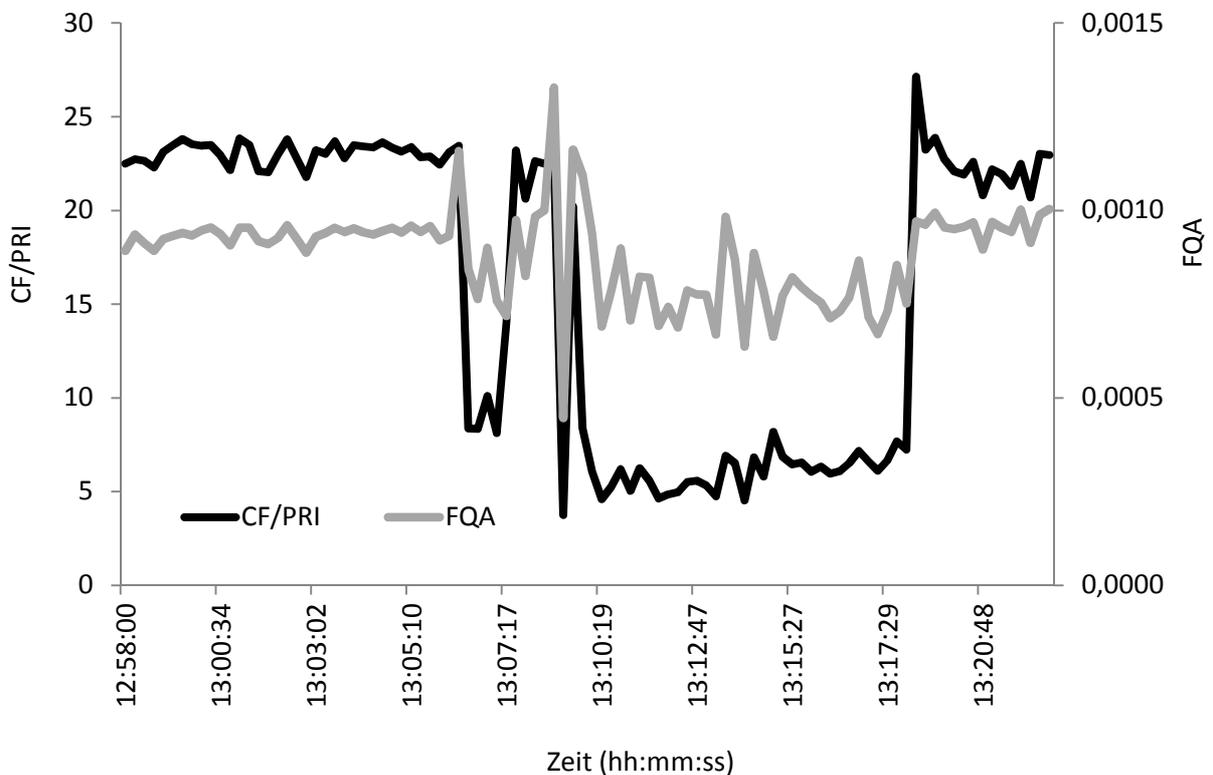


Abbildung 22. Verlauf von FQA und CF/PRI unter durchziehenden Wolkenfeldern bei Raps (29. August 2002)

ausgeschlossen werden, obwohl FQA und PE nur zu 47,6 % miteinander invers korreliert waren: War die PE hoch, verlief die FQA auf geringerem Level; betrieb das Rapsblatt aber weniger effizient Photosynthese, war die Fluoreszenzabstrahlung relativiert auf die Einstrahlungsstärke höher, und das, obwohl CF und PHS weitestgehend parallelläufig waren.

Der GNDVI (Abb. 21) zeigte wie REIP, RVI und RG-Ratio (nicht dargestellt) als tageskonstanter Vegetationsindex nur geringfügige Veränderungen unter den unterschiedlichen Einstrahlungsstärken bei ansonsten konstantem Verlauf. Ein lokales Maximum und Minimum um 13:09:33 Uhr und 12 Sekunden später waren höchstwahrscheinlich durch die Bewegungen der Blätter im Wind verursacht worden. Minimale Änderungen im Verlauf, so z.B. die Niveauänderung von durchschnittlich 0,749 auf durchschnittlich 0,746 um 13:18:24 Uhr, war tatsächlich auf die Änderungen der $PAR_{\text{außen}}$ zurückzuführen. Im Vergleich zu den Werten des 10 Tage zuvor durchgeführten Abdunklungsversuchs hatten die tageskonstanten Vegetationsindizes aber höhere Werte.

Der PRI (Abb. 21) war zu 85,6 % positiv mit $PAR_{\text{außen}}$, zu 84,0 % mit der PHS und zu 83,9 % mit der CF korreliert. Er veränderte sich um insgesamt 38,5 % seines Maximalwertes. Bei höheren Einstrahlungsstärken war der Xanthophyllzyklus aktiver war als bei niedrigeren Einstrahlungsstärken. Wo der GNDVI zwischen 13:09:10 und 13:10:08 Uhr seine größten Schwankungen zeigte, waren die Amplituden beim PRI sehr viel größer ausgeprägt. Im Gegensatz zum Verlauf der CF war der Verlauf des PRI vor allem unter den Wolkenfeldern inhomogener: Wo sich bei der CF klare Abstufungen entsprechend den veränderten Einstrahlungsstärken ergaben, z.B. zwischen 13:06:30 und 13:07:17 Uhr, war eine gleichzeitige Abnahme des PRI nur tendenziell ausgeprägt; an anderer Stelle aber trat eine Zunahme wieder gut ausgeprägt zutage, z.B. um 13:19:05 Uhr, ca. 40 sec, nachdem die Einstrahlung wieder abrupt zugenommen hatte (s. Abb. 21).

Erwähnt sei hier noch, daß derselbe Rapsbestand am 23.08.2002 nach der Durchführung des im vorhergehenden Kapitel behandelten Abdunklungsversuchs mit ca. 0,075 einen geringeren PRI bei einer höheren Einstrahlungsstärke (ca. $1.760 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$) aufwies. Unter den Wolkenfeldern hatte der PRI Werte von ca. 0,06, unter direkter Sonne lagen die Werte bei durchschnittlich 0,07.

Entsprechend dem inhomogenen Verlauf des PRI war auch der Verlauf des Quotienten CF/PRI unter den Wolkenfeldern einem Zickzackkurs mit größeren Amplituden unterworfen als bei konstanter Sonneneinstrahlung. Unter dem ersten Wolkendurchzugsfeld bei ca. 8,3 und unter dem zweiten bei ca. 6,7, in der vollen Sonne lag er bei ca. 23. Da in diesem Versuch CF und PRI bei höheren Einstrahlungsstärken höhere Werte zeigten als bei niedrigeren Einstrahlungsstärken, waren auch hier die Amplituden von CF/PRI bei höheren und bei niedrigeren Einstrahlungsstärken entsprechend hoch. CF/PRI hat seit den Abdunklungsversuchen 10 Tage zuvor zugenommen, von ca. 19 auf 23 bei ungehindertem Sonneneinfall.

3.2.2 Ein repräsentativer Tagesgang

In den Abdunklungsversuchen konnte der induktionskinetische Zusammenhang zwischen CF und PHS bewiesen werden unter sich ändernden Einstrahlungsstärken unter ansonsten weitgehend konstanten Bedingungen zeigten CF, Photosyntheserate und PAR sehr hohe Korrelationen miteinander. Die nächste Stufe der methodischen Versuche war, den Verlauf der verschiedenen Faktoren im Tagesgang zu untersuchen.

Im Laufe eines Tages ändern sich neben der Einstrahlungsstärke auch andere Faktoren wie Temperatur, Sonnenstand usw., die einen großen Einfluß auf die Physiologie einer Pflanze und damit auch eines ganzen Bestandes haben. Für einen repräsentativen Tagesgang wurde von einer Stunde nach Sonnenaufgang bis eine Stunde vor Sonnenuntergang die Sorte *Beta vulgaris* var. *altissima* L. 'Tatjana' im Einstudentakt mit Spektrometer und LI-COR 6400 gleichzeitig bemessen. Zusätzlich wurde der Einfluß der Chloroplastenbewegung auf die CF und Photosyntheserate untersucht.

Der Gesamtchlorophyllgehalt betrug am Meßtag (12. August 2003) $1,86 \text{ mg g}^{-1} \text{ FS}^{-1}$, der Spadmeterwert lag bei 474. Dieser Tag war als weitestgehend wolkenfreier, strahlungsreicher und heißer Sommertag ein „idealer“ Meßtag. Die außerhalb der Blattkammer des LI-COR 6400 gemessene $\text{PAR}_{\text{außen}}$ lag morgens bei ca. $204 \text{ } \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ und erreichte ihren Höchstwert von $1.971 \text{ } \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ um 13:22 Uhr (Abb. 23). Danach verminderte sich $\text{PAR}_{\text{außen}}$ kontinuierlich auf $666 \text{ } \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (18:14 Uhr). Die Form des

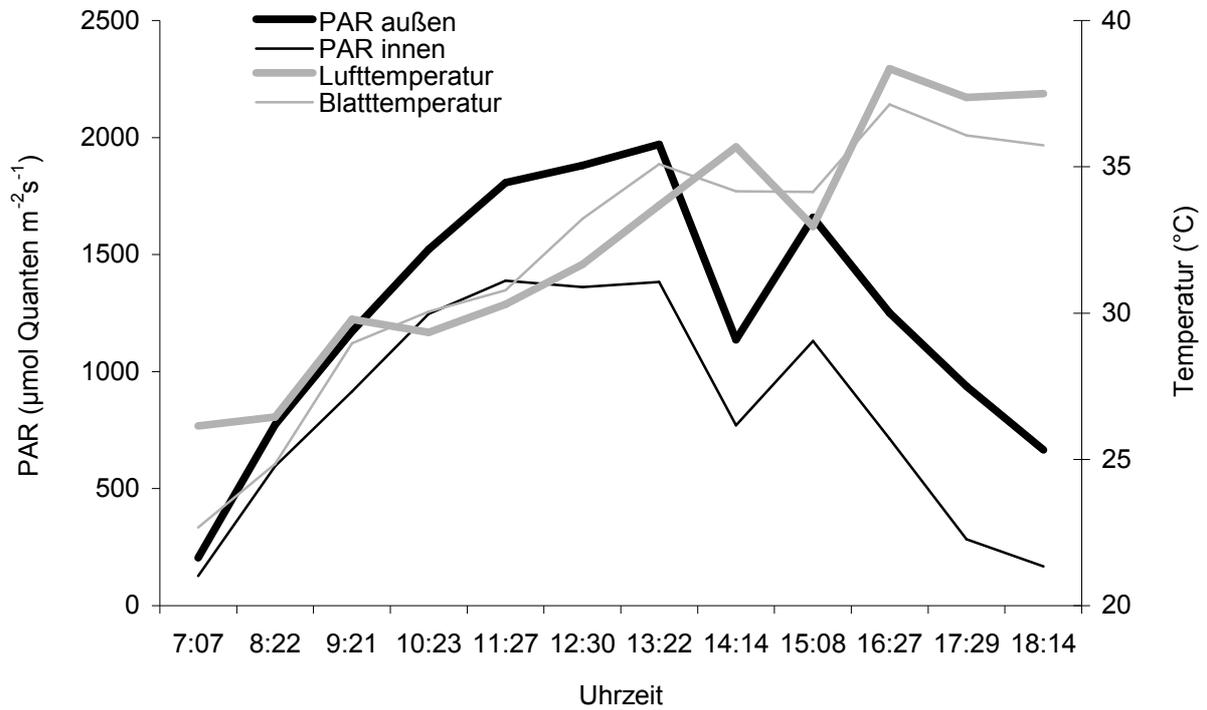


Abbildung 23. Tagesgang von PAR_{innen}, PAR_{außen}, Luft- und Blatttemperatur bei *Beta vulgaris* var. *altissima* L. 'Tatjana' (12. August 2003)

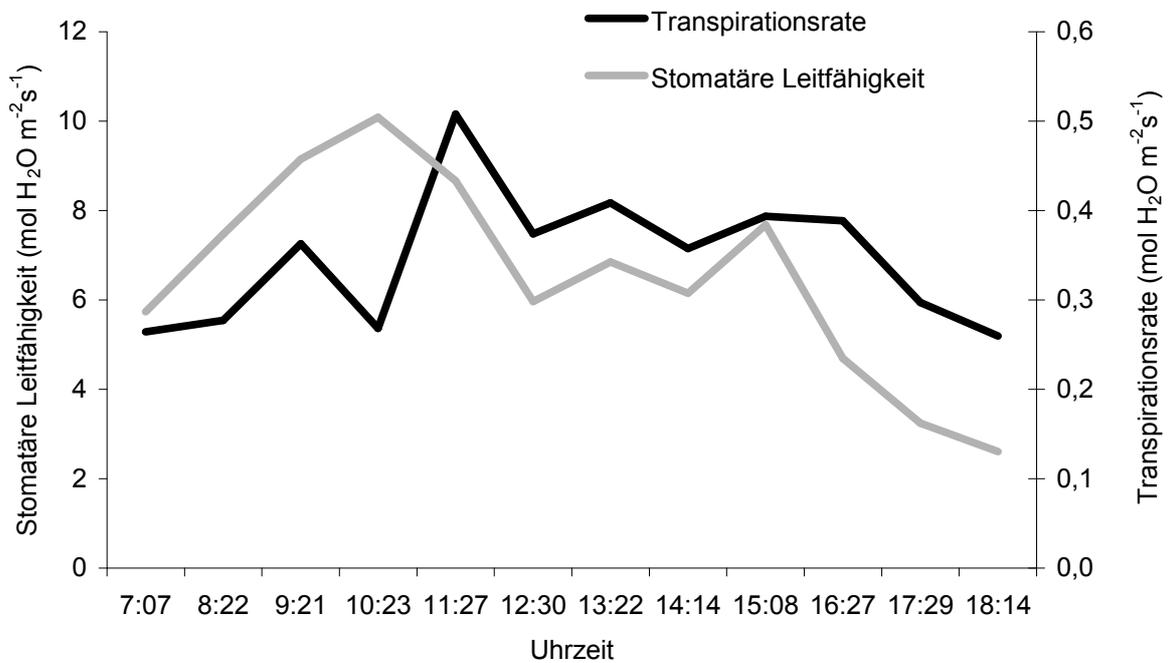


Abbildung 24. Tagesgang von stomatärer Leitfähigkeit und Transpirationsrate bei *Beta vulgaris* var. *altissima* L. 'Tatjana' (12. August 2003)

Verlaufs während des Tages war tendenziell hügelartig. Aufgrund eines durchziehenden Wolkenfeldes erlitt $PAR_{\text{au\ss en}}$ um 14:14 Uhr einen Einbruch auf $1.136 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Die Werte der innerhalb der Blattkammer des LI-COR 6400 gemessenen photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR_{innen}) lagen um durchschnittlich $408 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ niedriger als die der $PAR_{\text{au\ss en}}$.

Die Lufttemperatur wuchs im Laufe des Tages kontinuierlich von $26,0$ auf $37,5$ °C an (Abb. 23). Auch die Blatttemperatur stieg von $22,7$ °C auf $35,7$ °C an, wobei die Werte von 10:23 bis 13:22 Uhr über denen der Lufttemperatur lagen, z.B. um 12:30 Uhr mit einer Blatttemperatur von $33,2$ °C und einer Lufttemperatur von $31,7$ °C.

Die stomatäre Leitfähigkeit nahm zuerst von $0,29$ um 7:07 Uhr auf $0,5 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ um 10:23 Uhr zu (Abb. 24), d.h. die Stomata öffneten sich langsam im Laufe des Vormittags. Nach einem Wiederabsinken auf das morgendliche Niveau war der Verlauf der stomatären Leitfähigkeit nachmittags von einem konstanten Level bei durchschnittlich $0,33 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ gekennzeichnet. Danach sank die stomatäre Leitfähigkeit gegen Abend hin auf $0,13 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ab, d.h. daß sich die Stomata wieder schlossen. Die Transpirationsrate hatte einen zeitlich nach hinten versetzten Verlauf zu dem der stomatären Leitfähigkeit und war auch durch ein nachmittägliches Plateau gekennzeichnet: Um 7:07 Uhr hatte sie einen Wert von $5,28 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$, ihren Maximalwert erreichte sie mit $10,16 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ um 11:27 Uhr, ihren Minimalwert von $5,2 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ hatte sie um 18:14 Uhr. Der im Zuge der Standardkulturführung regelmäßig gewässerte Bestand litt keinen Wassermangel, schloß aber nachmittags vor allem aufgrund übermäßig steigender Temperaturen und Einstrahlungsstärken seine Stomata wieder, womit vor allem die Transpiration und auch die PHS gedrosselt wurden.

Die PHS hatte einen morgendlichen Wert von $14,5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ um 7:07 Uhr und erreichte ihr Maximum bei $15,88 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ um 11:27 Uhr. Der Verlauf der Photosyntheserate (Abb. 25) war mit dem der PAR_{innen} fast identisch mit einer $92,2$ %-igen Korrelation (s. Anhang), und korrelierte mit der stomatären Leitfähigkeit zu $67,1$ %. Auch hier sank die PHS kurzzeitig auf $9,4 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ um 14:14 Uhr verursacht durch das durchziehende Wolkenfeld ab. Die PE (Photosyntheseeffizienz) war trotz der zu- und abnehmenden Photosyntheserate im Laufe des Tages bis 15:08 Uhr konstant bei ca. $0,012 \mu\text{mol fixiertem CO}_2 \text{ pro } \mu\text{mol an eingestrahlt}$

Lichtquanten (Abb. 25). Der Maximalwert der PE von 0,016 um 17:29 Uhr wurde bei einer bereits sehr geringen PAR_{innen} und trotzdem noch sehr hohen Lufttemperatur gemessen, wohl waren hier idealere Bedingungen vorhanden, um die PHS optimal zu fahren.

Zur Veranschaulichung der Veränderlichkeit einer Reflexionssignatur im Laufe eines Tages sind in Abb. 26 und 27 je vier der zwölf gemessenen Reflexionssignaturen, einmal für vormittags und einmal für nachmittags, dargestellt.

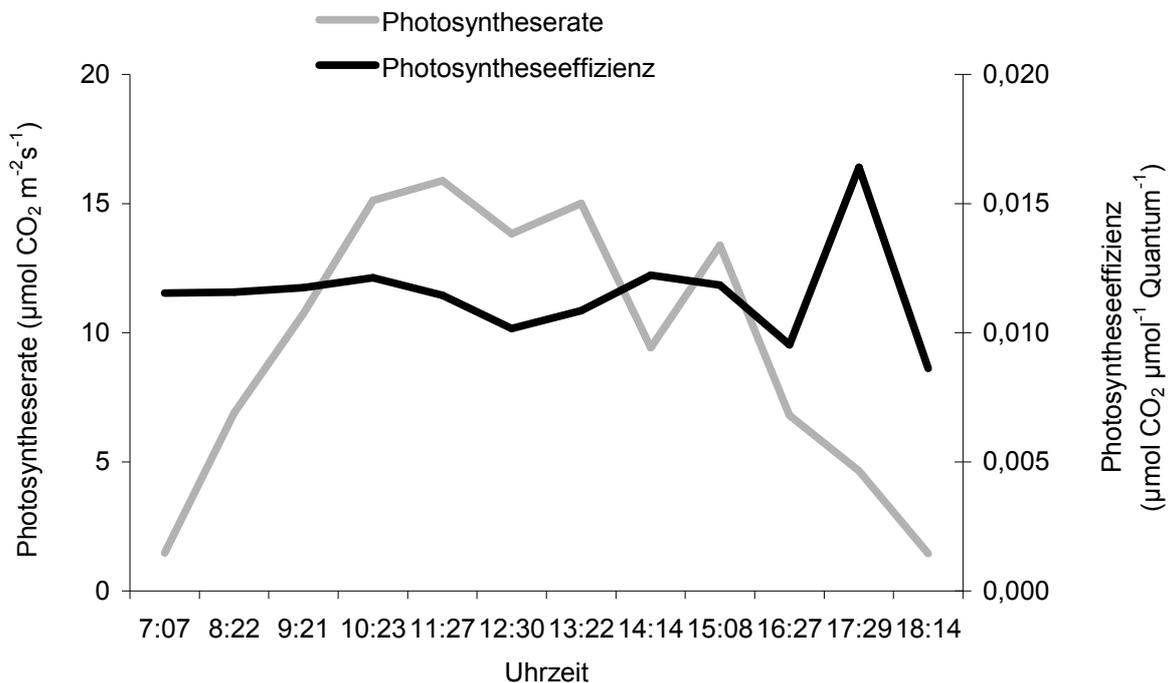


Abbildung 25. Tagesgang von Photosyntheserate und Photosyntheseeffizienz bei *Beta vulgaris* var. *altissima* L. 'Tatjana' (12. August 2003)

Diese Reflexionssignaturen wurden aus Durchschnittswerten der 50 spektrometrischen Einzelmessungen wellenlängenscharf errechnet. Die Veränderungen der Reflexionssignaturen traten vor allem im Infrarotbereich und schwächer ausgeprägt im Wellenlängenbereich zwischen 520 bis 600 nm auf. Als beispielhafte Referenz für die folgenden Ausführungen wurden für den Nahinfrarotbereich die Wellenlänge 800 nm, für den gelben Bereich 550 nm gewählt.

Um 7:07 Uhr (Abb. 26) lag der Nahinfrarotbereich (800 nm) der Reflexionssignatur bei 67,5 %, um 8:22 Uhr bei 92 % und um 9:21 Uhr bei 64,1% des

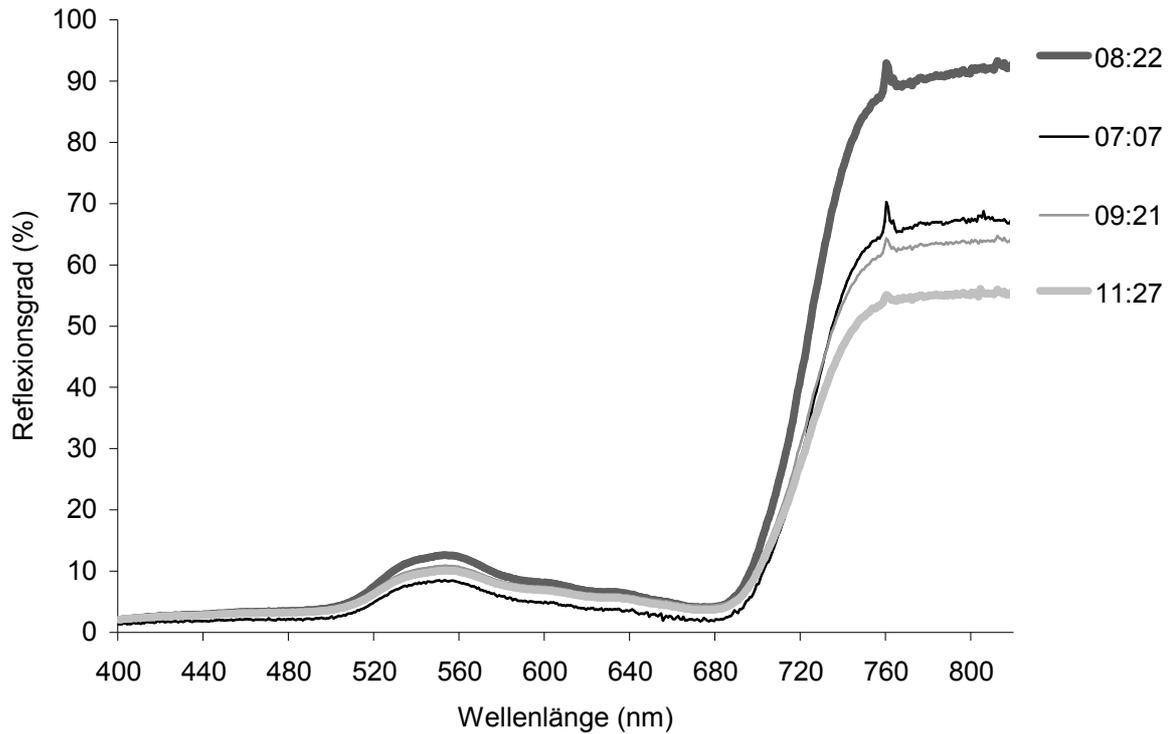


Abbildung 26. Vier Reflexionssignaturen gemessen zwischen 7:00 und 12:00 Uhr bei *Beta vulgaris* var. *altissima* L. 'Tatjana' (12. August 2003)

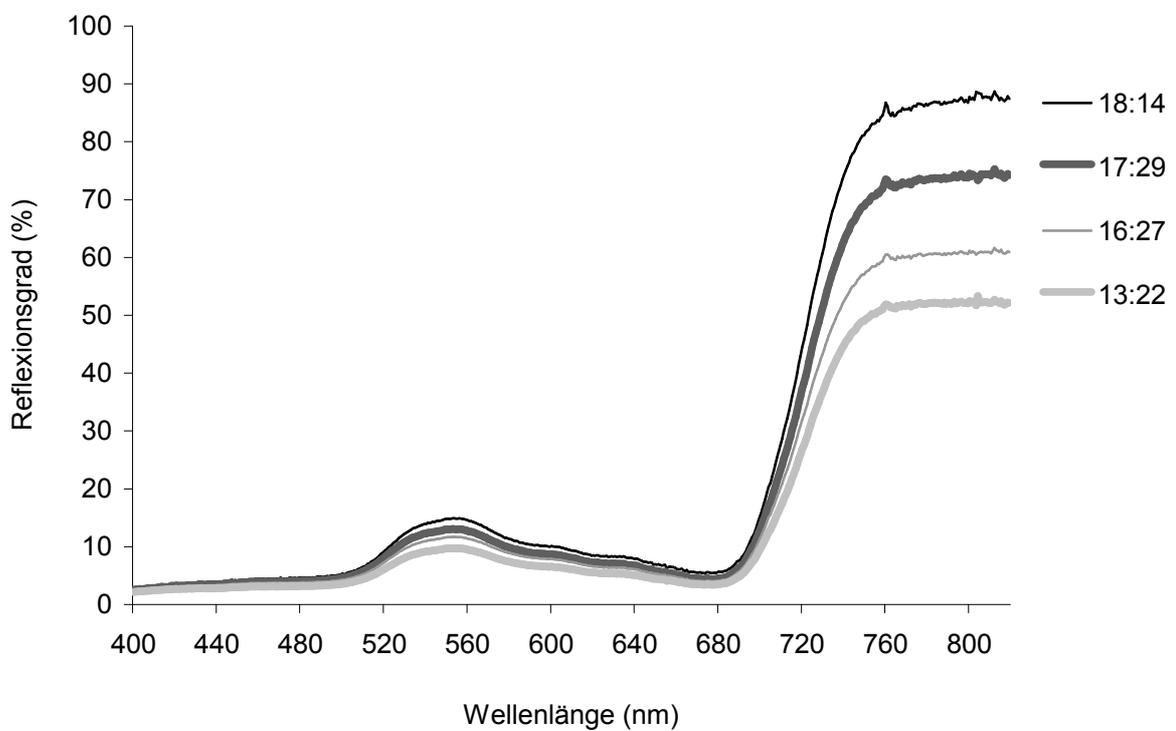


Abbildung 27. Vier Reflexionssignaturen gemessen zwischen 13:00 und 19:00 Uhr bei *Beta vulgaris* var. *altissima* L. 'Tatjana' (12. August 2003)

Reflexionsgrades. Bis zum Mittag um 13:22 Uhr sank der Reflexionsgrad auf ein Minimum von 52,5 % (Abb. 27) ab, um dann wieder kontinuierlich auf ein Niveau von 97,7 % um 18:14 Uhr anzusteigen. Die Reflexionssignatur war also im Nahinfrarotbereich einem Tagesgang unterworfen, nämlich in der Weise, daß die Nahinfrarotschulter bis zum Sonnenhöchststand kleiner wurde, und bis zum Sonnenuntergang wieder anwuchs.

Ähnlich, aber in weitaus geringerem Maße, nahm die hügelartige Anhebung der Reflexionssignatur im gelben Bereich (550 nm) bis zum Sonnenhöchststand ab, und wuchs zum Abend hin wieder an. Es war also auch hier ein Tagesgang vorhanden, in der Region, aus deren Wellenlängen auch der PRI gebildet wird.

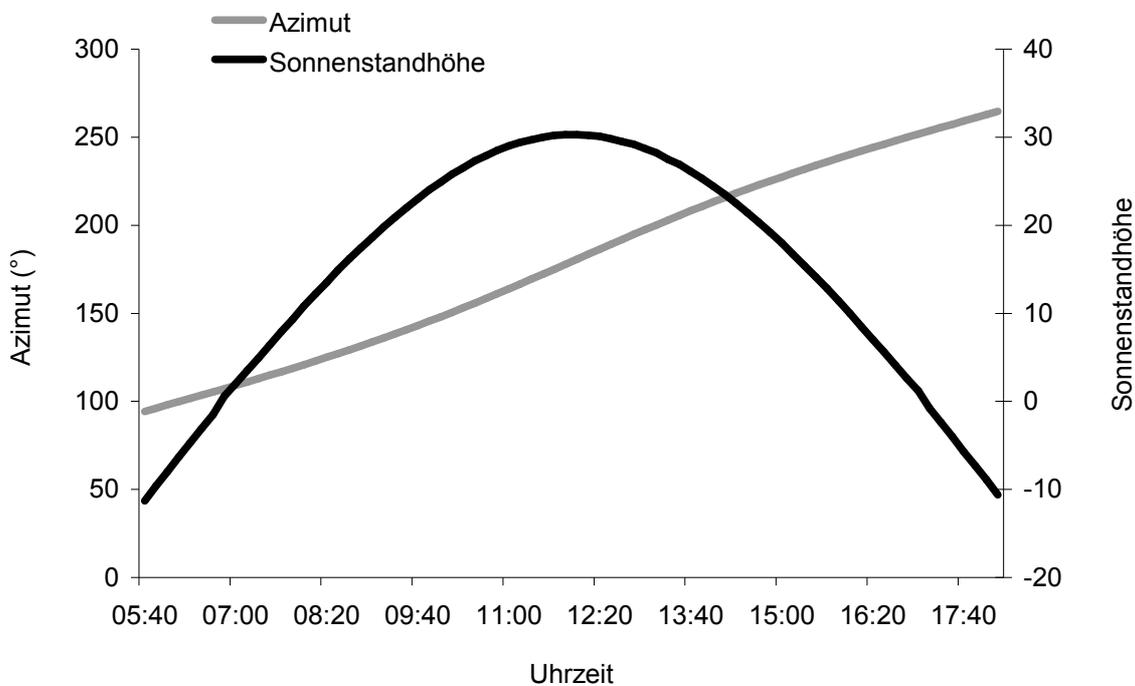


Abbildung 28. Verlauf von Sonnenstandhöhe und Azimut am 12. August 2003 für Freising (48°24' nördliche Breite, 11°44' östlicher Länge)

Zur ersten Messung an diesem Tag sei hier noch in Verbindung mit den sogenannten BRDF-Effekten hingewiesen: Die erste Messung wies ein weitaus niedrigeres Nahinfrarotplateau auf als die folgenden Messungen. Dies konnte mit dem niedrigen Sonnenstand bzw. der sehr niedrigen PAR in Zusammenhang gebracht werden. Zusätzlich war es aber auch möglich, daß hier BRDF-Effekte (Bidirektionale Reflektions-Distributions-Funktion nach KRAUS und SCHNEIDER, 1988) wirkten. Die Sonne hatte um 7:10 Uhr eine Höhe von 19,8 und einen Azimut

von $89,3^\circ$ (Abb. 28), weswegen es zu Schattenwerfungen innerhalb der Parzelle auch aufgrund des rosettenartigen Habitüs der Zuckerrübe kam. Um 8:20 Uhr bei einer Sonnenhöhe von $31,3$ und einem Azimut von $103,1^\circ$ befand sich die Nahinfrarotschulter auf hohem Niveau, bei geringer ausfallenden Schattenwerfungen innerhalb der Parzelle bzw. einer zunehmenden Einstrahlungsstärke.

Mit der sich während des Tages ändernden Höhe der Nahinfrarotschulter variierte auch die Höhe des darauf sitzenden Fluoreszenz-Peaks bei 760 nm (Abb. 26 und 27). Die Peakhöhe nahm von der ersten Messung am Morgen bis zum Mittag hin kontinuierlich ab, und zum Abend hin wieder zu. Um 13:22 Uhr war fast kein Peak mehr zu erkennen. Zum Abend nahm die Peakhöhe wieder zu.

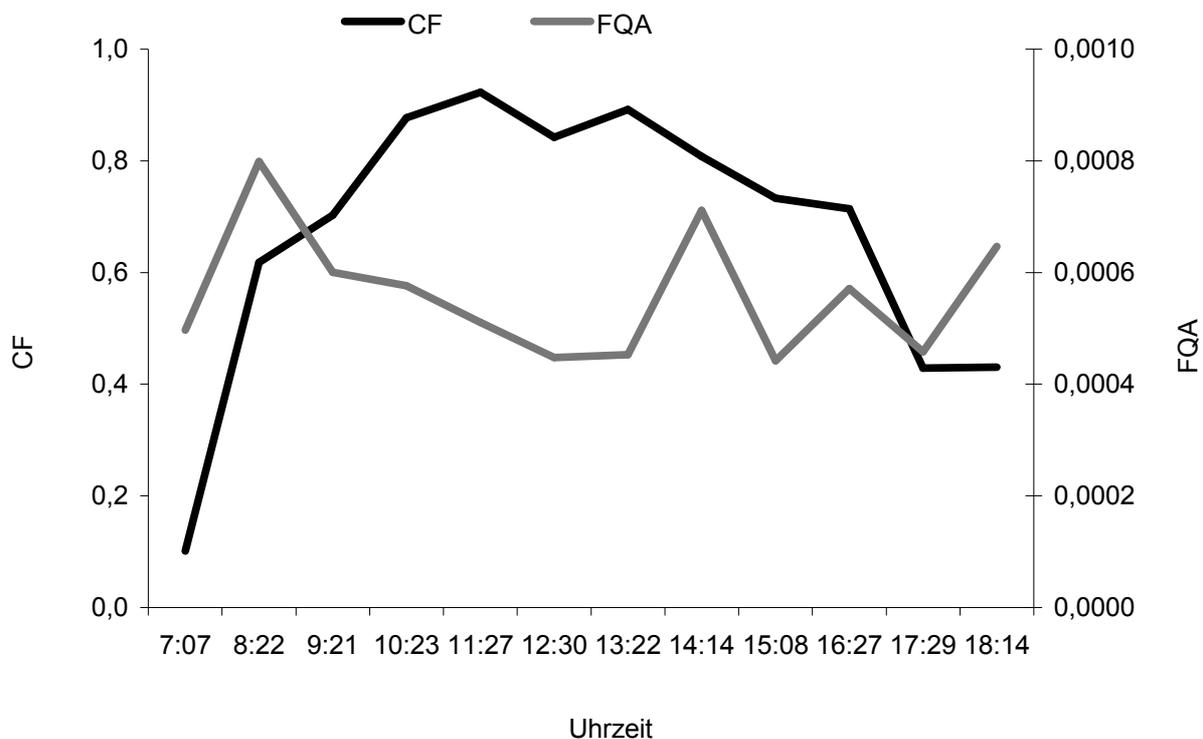


Abbildung 29. Tagesgang von sonnenlicht-induzierter Chlorophyll-Fluoreszenz (CF) und Fluoreszenzquantenausbeute (FQA = CF pro μmol eingestrahlt Lichtquanten $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) bei *Beta vulgaris* var. *altissima* L. 'Tatjana' (12. August 2003)

Der Tagesgang der CF war mit dem der $\text{PAR}_{\text{au\ss en}}$ zu 81 % korreliert (s. Abb. 29 und Anhang): Der Kurvenverlauf im Diagramm zeigte tendenziell eine Hügelform: Morgens waren die Werte der CF gering und das Tagesmaximum ereignete sich um 11:27 mit einem Wert von 0,92. Das Minimum von PAR und Photosyntheserate um 14:14 Uhr war bei der CF nicht vorhanden, da zum

Meßzeitpunkt der CF (also mit dem Spektrometer) das Wolkenfeld bereits vorbeigezogen war. Die Korrelation zwischen PHS und CF betrug 69,3 %, zwischen den drei Faktoren $PAR_{\text{außen}}$, PHS und CF lag sie bei 65,1 %.

Die FQA (Fluoreszenzquantenausbeute) bewegte sich in einem Korridor zwischen 0,0004 bis 0,0008 Einheiten emittierten Fluoreszenzlichts pro μmol eingestrahlt Lichtquanten $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Das Maximum um 8:22 Uhr bei gleichzeitigem konstanten Verlauf der PE zeigte, daß die CF seit der ersten Messung um 7:22 Uhr im Vergleich zur PHS stärker zugenommen hatte. Ähnlich gelagert war der Fall um 17:29 Uhr: Die CF sank rapide bei einer weniger fallenden PHS, einem Maximum der PE und einem Minimum der FQA ab. Diese Situationen kamen höchstwahrscheinlich durch Umverteilungsprozesse im PSII, also durch die Kautsky-Kinetik, zustande. Anders verhielt es sich mit dem Maximum der FQA um 14:14 Uhr, bei dessen spektrometrischer Messung das zuvor erwähnte Wolkenfeld bereits vorbeigezogen war, welches für eine gleichzeitige Verminderung der PAR und der PHS verantwortlich war. Zwischen 9:21 Uhr und 16:27 Uhr, mit Ausnahme der Messung um 14:14 Uhr verliefen PE und FQA auf einem sukzessive abnehmenden Niveau, einmal abgesehen von leichten Schwankungen in diesem Zeitraum, währenddessen auch PHS und CF mehr oder weniger gleich verliefen. Entsprechend den vorhergehenden Aussagen war um 16:27 Uhr die leicht erhöhte FQA mit einer leicht geringeren PE einhergegangen. Auch hier haben höchstwahrscheinlich induktionskinetische Umverteilungsprozesse im PSII stattgefunden.

Der PRI zeigte einen eher inhomogenen Verlauf in steigender Tendenz mit einer Amplitude von 0,054 (7:07 Uhr) bis 0,068 (18:14 Uhr), s. Abb. 30. Zwischen 7:07 Uhr und 8:22 Uhr sowie ab 14:14 Uhr wies der PRI ähnlich gelagerte Höhen und Tiefen wie die FQA auf. Um 9:21 Uhr fiel der PRI zuerst auf ca. 0,057 ab und verlief dann zwischen 10:23 Uhr und 13:22 Uhr auf einem hohen Plateau. Dieses Minimum um 9:21 Uhr fiel mit der Abnahme der FQA und einer geringeren Zunahme der CF bei einer stetig steigenden PHS, aber gleichbleibenden PE zusammen. Während der Messung um 17:29 Uhr aber war die PE bei fallender PHS von einem Maximum bei gleichzeitig geringen Werten von CF, FQA und PRI geprägt. Zu diesen Zeitpunkten und auch z.B. um 15:08 Uhr fand eine Kautsky-Kinetik im PSII statt.

Um 11:27 Uhr und 13:22 Uhr aber zeigte sich ein Bild der Gleichläufigkeit von PHS, PE, CF, FQA und PRI, einem Zeitraum, in dem PAR ihrem Tagesmaximum von

1.971 $\mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ entgegenschritt: Gerade bei diesen hohen Einstrahlungsstärken wären hohe CF-, FQA- und PRI-Werte bei geringerer PHS und PE zu erwarten gewesen. Das hypothetische Verhältnis CF/PRI war zu 72,9 % mit der Photosyntheserate und zu 67,9 % mit $\text{PAR}_{\text{außen}}$ korreliert (s. Anhang). Es schwankte im Tageslauf zwischen 1,9 um 7:07 Uhr und 14,2 um 11:27 Uhr. Der Tagesgang von CF/PRI war dem der CF ähnlich (Abb. 30).

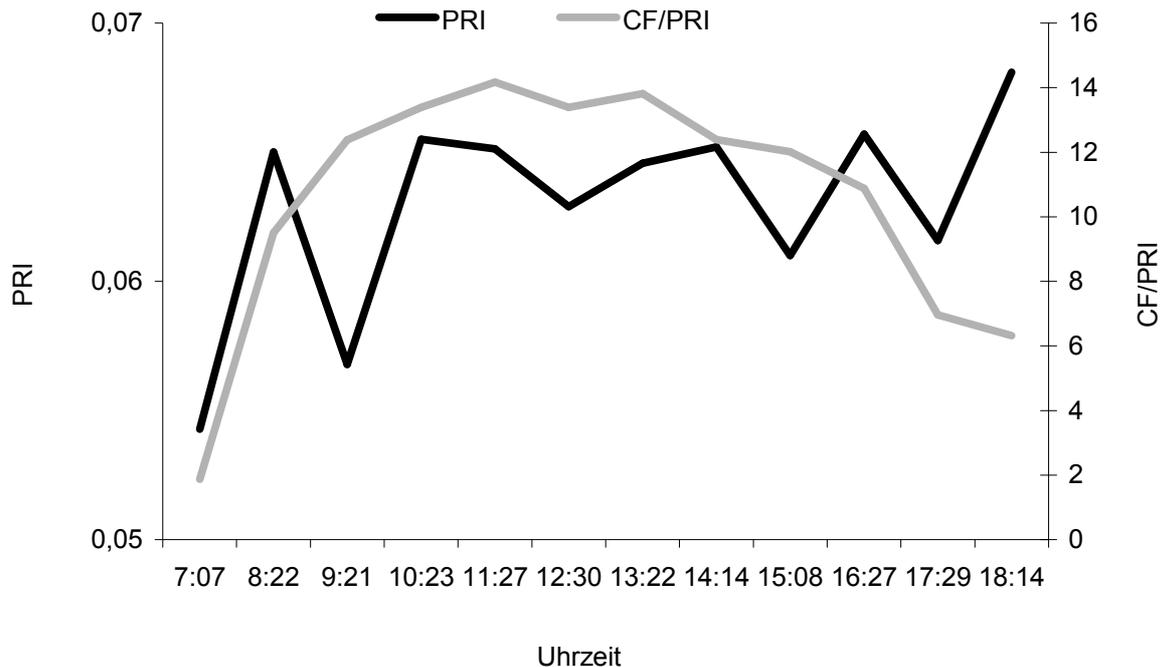


Abbildung 30. Tagesgang von PRI und CF/PRI bei *Beta vulgaris* var. *altissima* L. 'Tatjana' (12. August 2003)

Der GNDVI als tageskonstanter Vegetationsindex zeigte bis 10:23 Uhr eine insignifikante Abnahme von 0,76 auf 0,68 (Abb. 31) und besaß einen schwach u-förmigen Tagesgang. Aus diesem Grund wurden die Mittagswerte als repräsentative Werte herangezogen, z.B. 0,67 um 12:30 Uhr und 13:22 Uhr. Der REIP (Abb. 31) blieb bis auf die Morgenmessungen über den Tag hinweg konstant zwischen 720,6 und 722,2 mit einem Mittagswert von 720,6 um 13:22 Uhr. Die RG-Ratio (Abb. 32) war nach einem morgendlichen Abfall von 4,27 auf durchschnittlich 2,89 über den Tag hinweg konstant, so auch der RVI (Abb. 32) mit durchschnittlich 16,79. Die Mittagswerte bei Sonnenhöchststand waren also den Abend- und Morgenmessungen definitiv vorzuziehen, da sie die größte Konstanz im Tagesgang zeigten.

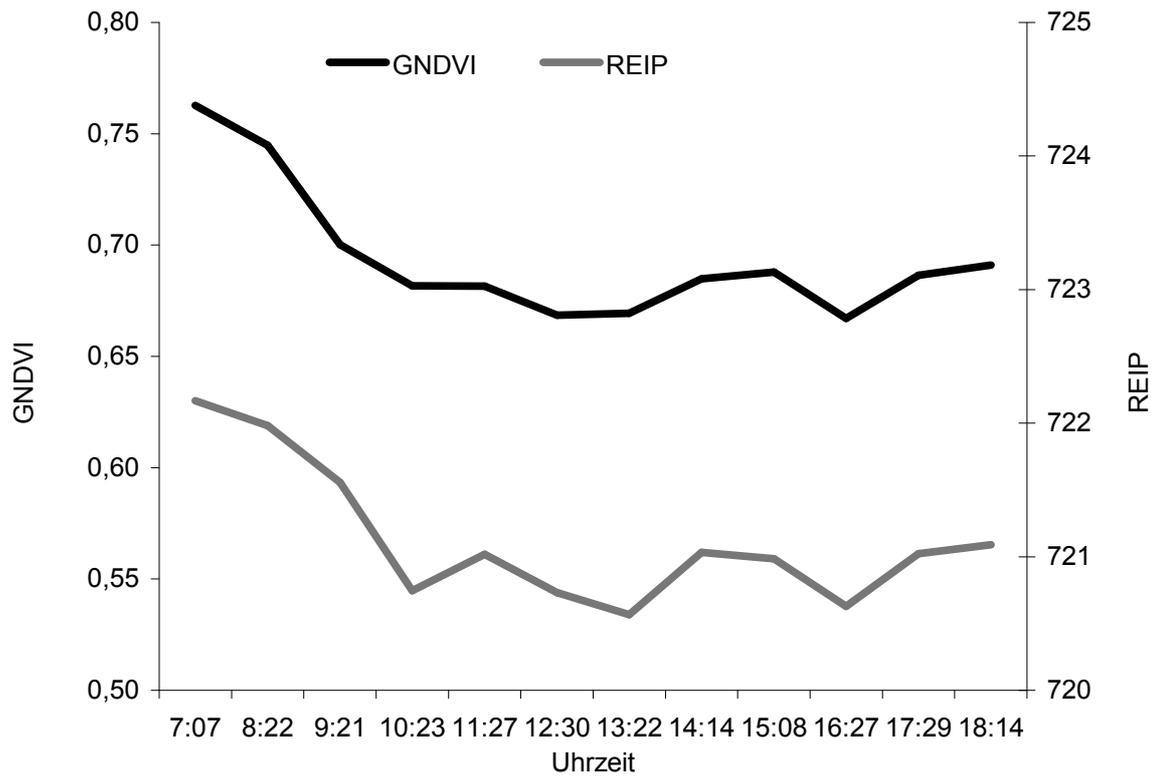


Abbildung 31. Tagesgang von GNDVI und REIP bei *Beta vulgaris* var. *altissima* L. 'Tatjana' (12. August 2003)

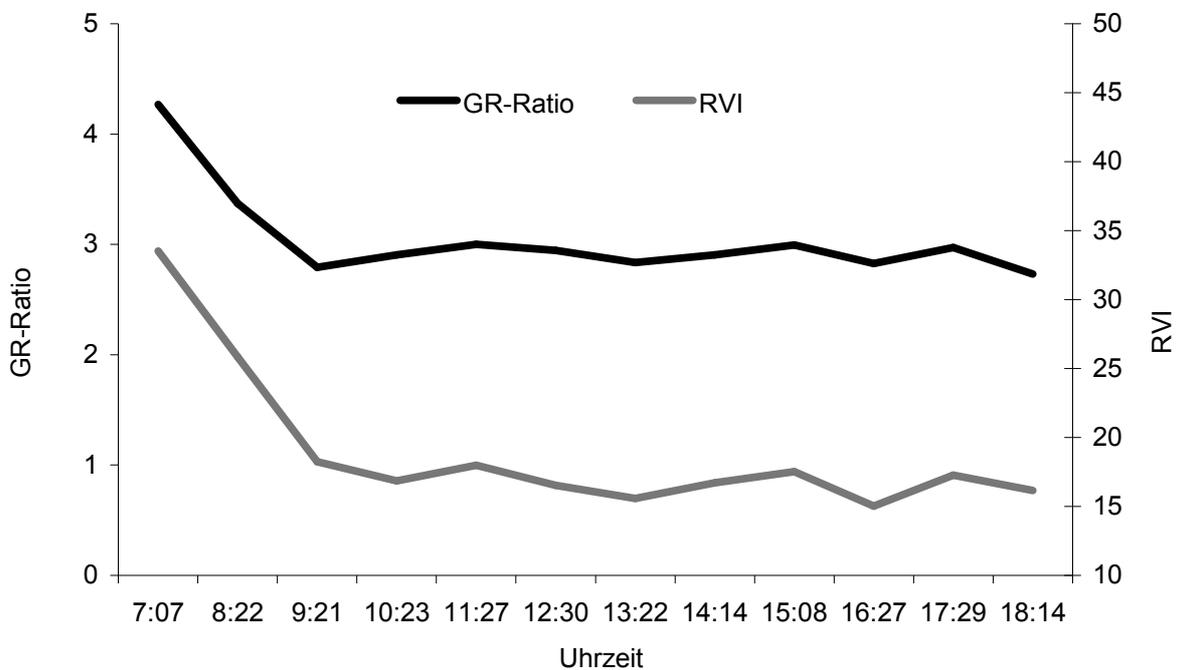


Abbildung 32. Tagesgang von RVI und RG-Ratio bei *Beta vulgaris* var. *altissima* L. 'Tatjana' (12. August 2003)

Die Verläufe von CF/RVI und CF/GNDVI waren identisch mit dem der CF, nur auf anderem Niveau, z.B. betrug der Wert von CF/RVI um 7:07 Uhr 0,01 und von CF/GNDVI bei 0,15, um 11:27 Uhr dagegen lag der Maximalwert von CF/RVI bei 0,56 und von CF/GNDVI bei 1,38.

In diesem Versuch wurde parallel zu den Messungen mit LI-COR 6400 und Spektrometer auch die Chloroplastenbewegung aufgezeichnet: In Abb. 33 ist jeweils ein Stoma, umgeben von den ebenfalls Chloroplasten enthaltenden, übrigen Epidermiszellen der Blattoberseite abgebildet. Als relevante Zellorganellen sind die Chloroplasten (kleine Kringel) und Vakuolen (gestrichelte Linien) dargestellt. Dabei handelte es sich um Epidermisabzüge von der der Sonne horizontal zugewandten Blattoberseite, denn anders als bei den meisten Pflanzen finden sich bei der Zuckerrübe auch auf der Blattoberseite Stomata.

Tabelle 6. Gesamtanzahl der sichtbaren Chloroplasten in den Epidermiszellen und Anzahl der an den Zellwänden anliegenden Chloroplasten von Abb. 32 bei *Beta vulgaris* var. *altissima* L. 'Tatjana'. Nicht mitgezählt wurden die Chloroplasten der Stomata.

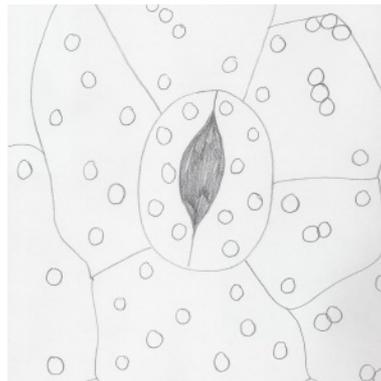
Uhrzeit	sichtbare Chloroplasten		Anteil (%)
	insgesamt	davon an den Zellwänden anliegend	
7:07 Uhr	31	0	0,00
8:22 Uhr	43	3	6,98
9:21 Uhr	51	13	25,49
10:23 Uhr	62	11	17,74
11:27 Uhr	65	15	23,08
12:30 Uhr	73	26	35,62
13:22 Uhr	43	25	58,14
14:14 Uhr	62	42	67,74
15:08 Uhr	74	59	79,73
16:27 Uhr	67	62	92,54
17:29 Uhr	55	28	50,91
18:24 Uhr	62	55	88,71

Zu Meßbeginn um 7:07 Uhr lagen die sichtbaren Chloroplasten gleichmäßig über die Epidermiszellen verstreut (Abb. 33, Bild links oben). Mit zunehmender Einstrahlungsintensität ab 8:23 Uhr waren teilweise Bildungen von Miniclustern zu beobachten. Ab 11:27 Uhr fand eine sichtbare Bewegung der Chloroplasten in Richtung Zellwände statt, die um 13:22 Uhr bei dem gemessenen Maximalwert der PAR ($1.971 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$) eine Anlagerung der Chloroplasten an die Zellwände zur Folge hatte. Dieser Zustand hielt sich permanent bis zum Abend hin trotz abnehmender PAR. Die kontinuierliche Zunahme des Anteils der an den Zellwänden anliegenden sichtbaren Chloroplasten konnte mit einem prozentualen

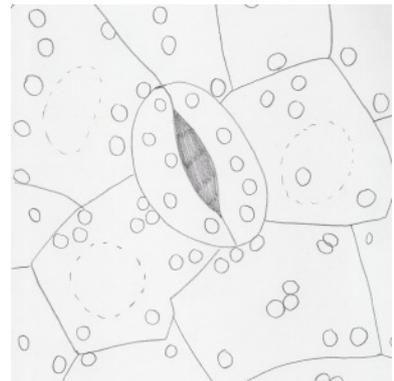
Anteil von bis nahezu 93 % um 16:27 Uhr verzeichnet werden (Tab. 6). Bis zum



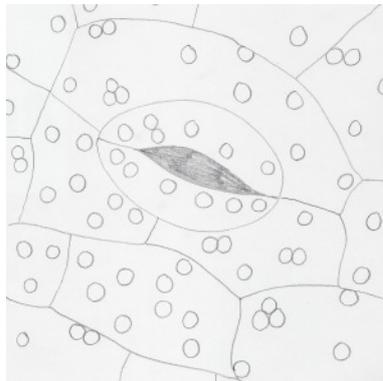
7:07 Uhr



8:22 Uhr



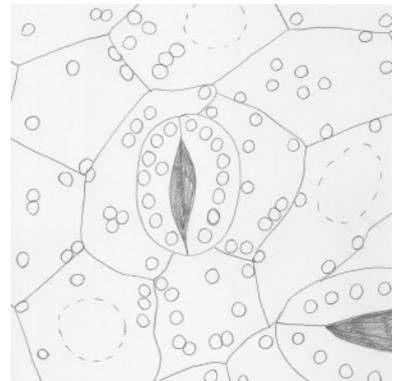
9:21 Uhr



10:23 Uhr



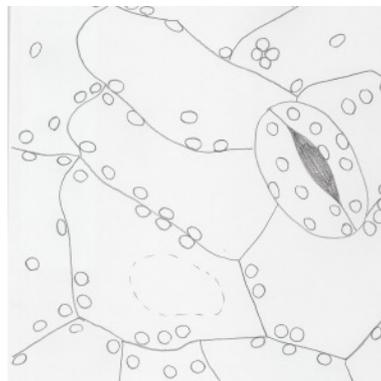
11:27 Uhr



12:30 Uhr



13:22 Uhr



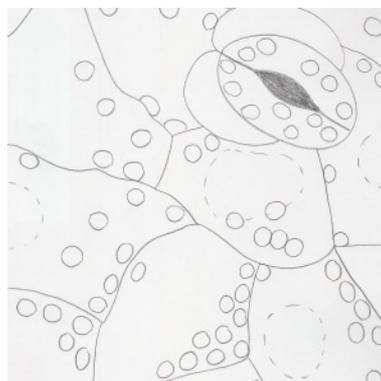
14:14 Uhr



15:08 Uhr



16:27 Uhr



17:29 Uhr



18:14 Uhr

Abbildung 33. Position der Chloroplasten (kleine Kringel) der oberen Epidermis von bei *Beta vulgaris* var. *altissima* L. 'Tatjana' im Tageslauf (gestrichelte Linien – Vakuolen)

Meßende hin nahm dieser Prozentsatz um durchschnittlich 23 % ab. Die Chloroplastenbewegung war in diesem Versuch mit $PAR_{\text{außen}}$ zu 33 %, mit der PHS zu 38 %, mit der PE zu 35 %, mit der CF zu 26 % und mit der FQA zu weniger als 1 % korreliert (s. Anhang). Der hohe Wert der Korrelation der Chloroplastenbewegung mit der Lufttemperatur von 82 % und mit der Blatttemperatur von 83 % belegte, daß die Chloroplastenbewegung offenbar nicht nur lichtinduziert, sondern auch später vor allem temperaturabhängig war: Hier verharrten die Chloroplasten trotz abnehmender Einstrahlung bei weiterhin hohen Temperaturen an den Zellwänden und bewegten sich erst wieder fort, als auch die Temperaturen wieder etwas abnahmen.

Eine leichte Chloroplastenwanderung in den Stomata war entfernt zu beobachten. Interessehalber seien hier aber noch die sich leicht verringernden Öffnungswinkel der Stomata zwischen 7:07 Uhr bis 13:22 Uhr erwähnt, was dem Verlauf der stomatären Leitfähigkeit (Abb. 24) entsprach. Unter dem Mikroskop beobachtet und in den Zeichnungen festgehalten werden konnte zusätzlich eine sukzessive Abnahme des Öffnungswinkels der Stomata von der Mittagszeit an, was sich auch in den Daten des LI-COR 6400 widerspiegelte (Abb. 24).

In diesem Versuch konnte kein hochgradiger Einfluß der Chloroplastenbewegung auf die sonnenlicht-induzierte Chlorophyll-Fluoreszenz wie bei BRUGNOLI und BJÖRKMANN (1992) festgestellt werden, denn die CF nahm noch zu, während sich die Chloroplasten bereits untereinander zu schieben begannen. Und die CF nahm nachmittags bereits wieder ab, als die meisten Chloroplasten noch übereinandergeschoben an den Zellwänden anlagerten.

Wohl aber schien es Zusammenhänge zwischen der Anlagerung der Chloroplasten an den Zellwänden und der PHS bzw. PE zu geben: Auffälligster Meßzeitpunkt war hier um 17:29 Uhr. Während bei den Chloroplasten keine „Entspannung“ im Sinne einer Wiedereinstreuung über die gesamte Zelle auftrat, hatte die PE bei sonst konstantem Verlauf ihr Tagesmaximum.

3.3 Stickstoffsteigerungsversuche

Die sonnenlicht-induzierte Chlorophyll-Fluoreszenz wird u.a. durch den Chlorophyllgehalt beeinflusst (MAIER *et al.*, 2003). Ein unterschiedlicher Chlorophyllgehalt kann u.a. durch verschiedene Stickstoffgaben induziert werden. Im Folgenden werden zwei Stickstoffsteigerungsversuche vorgestellt: Im ersten Versuch wird eine Punktmessung in einem kombinierten Sorten- und Stickstoffsteigerungsversuch im Winterweizen beschrieben, im zweiten Versuch sind fünf Tagesgänge in der Kartoffelsorte 'Selma' dargestellt.

3.3.1 *Triticum aestivum* L.

Die Folgen der gesteigerten N-Düngung in den Varianten der Winterweizensorten 'Xanthos' N₂₂₀ und 'Pegassos' N₂₂₀ zeigten sich vor allem in höheren Werten von N- und Chlorophyllgehalten, BFI, Trockenmasse und Bestandesdichte, verglichen zu den ungedüngten Varianten derselben Sorten 'Xanthos' N₀ und 'Pegassos' N₀ (s. Tab. 7). Die erectophile Sorte 'Xanthos' N₂₂₀ hatte dabei bei höheren Gesamtstickstoffwerten eine geringere Trockenmasse als die planophile Sorte 'Pegassos' N₂₂₀, welche wiederum zeigte einen geringeren Chlorophyllgehalt und N-Tester-Wert sowie eine heller grüne Farbe als 'Xanthos' N₂₂₀.

Tabelle 7. Parameter der vier Varianten von 'Xanthos' und 'Pegassos' im N-Steigerungsversuch am 21. Mai 2002 (EC 37)

	Xanthos N ₀	Xanthos N ₂₂₀	Pegassos N ₀	Pegassos N ₂₂₀
BFI	0,06	0,06	0,07	0,08
Bestandesdichte (Halme m⁻²)	393	460	407	578
TM (dt ha⁻¹)	11,2	24,0	15,0	30,8
N-Gesamtgehalt (%)	1,95	3,04	1,86	2,87
N-Tester	426	648	424	616
Chlorophyll a (mg g⁻¹ FS⁻¹)	1,36	2,00	1,33	1,70
Chlorophyll b (mg g⁻¹ FS⁻¹)	0,39	0,53	0,37	0,43
Chlorophyll a+b (mg g⁻¹ FS⁻¹)	1,75	2,53	1,69	2,14

Bei den meisten in Tab. 7 aufgeführten Parametern wie z.B. der Bestandesdichte zeigte sich zwischen den Düngungsvarianten von 'Xanthos' ein größeres Delta als zwischen den Düngungsvarianten von 'Pegassos'. Bei 'Pegassos' ließen sich Unterschiede im Blattflächenindex zwischen den Varianten N₂₂₀ (0,08) und N₀ (0,07) feststellen, während sich bei 'Xanthos' keine Unterschiede zwischen N₂₂₀ und N₀ –

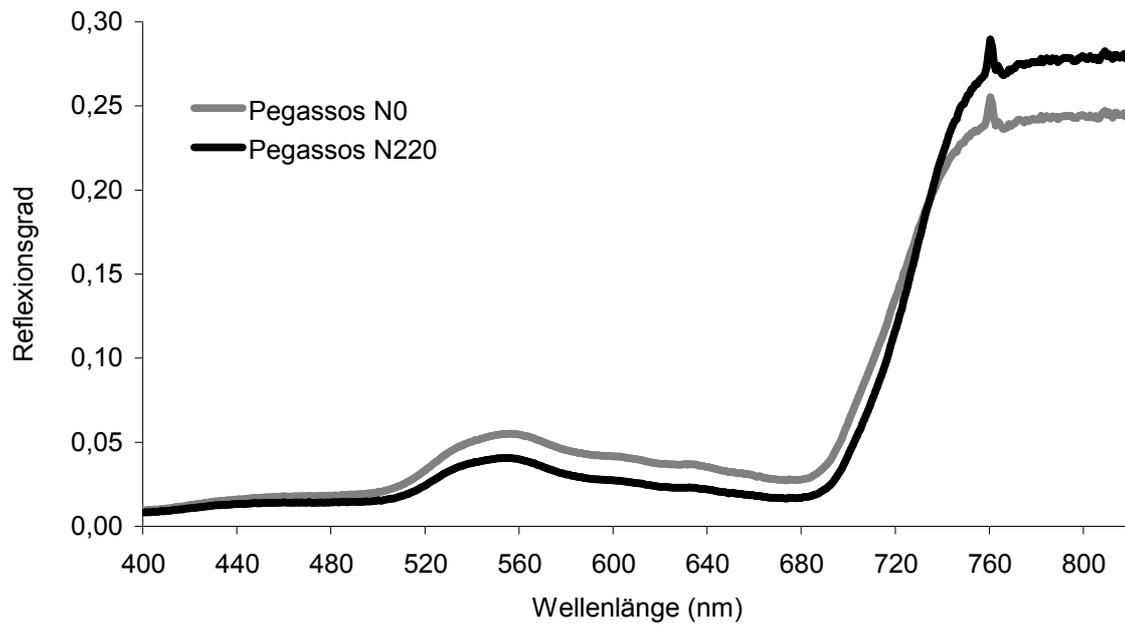


Abbildung 34. Reflexionssignaturen der Winterweizensorte 'Pegassos' im N-Steigerungsversuch am 21. Mai 2002 um 14:00 Uhr (EC 37)

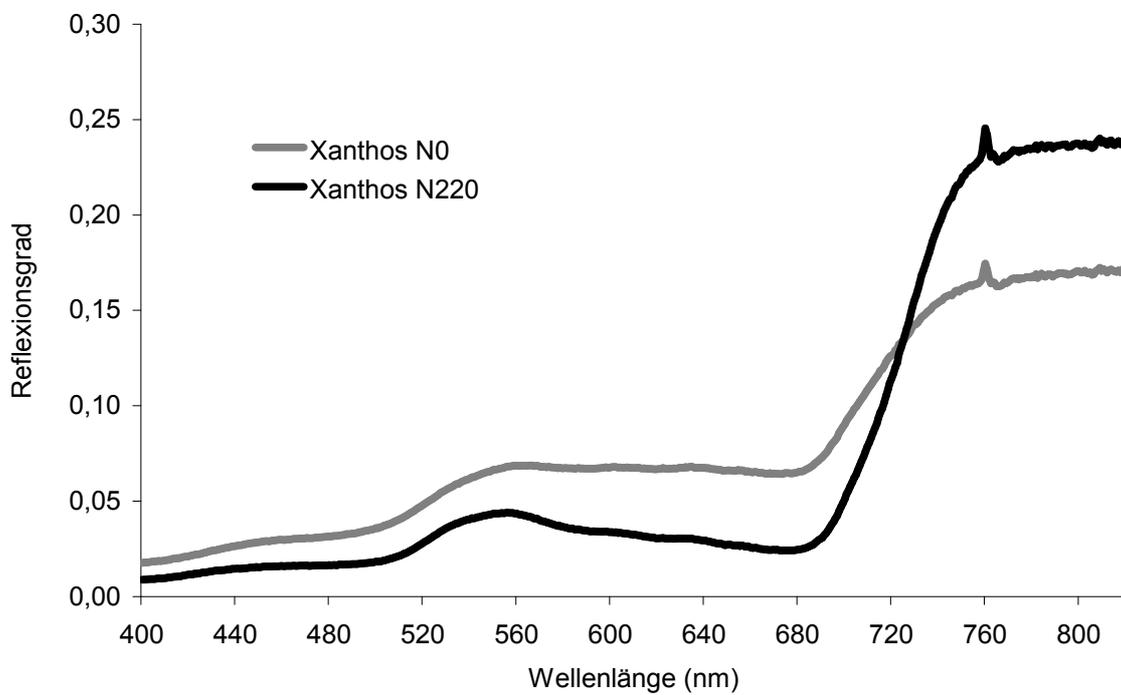


Abbildung 35. Reflexionssignaturen der Winterweizensorte 'Xanthos' im N-Steigerungsversuch am 21. Mai 2002 um 14:00 Uhr (EC 37)

wohl aufgrund der erectophilen Blattstellung – messen ließen, obwohl die Halmzählung 393 Halme m^{-2} bei der N_0 -Variante und 460 Halme m^{-2} bei der N_{220} -Variante bei 'Xanthos' ergab und auch bezüglich der Trockenmasse entsprechende Unterschiede vorhanden waren.

Zum Meßzeitpunkt mit dem Spektrometer um 14:00 Uhr (21. Mai 2002) lag die Lufttemperatur bei 19,2 °C und die Globalstrahlung 789,2 W m^{-2} , was nach der für diese Arbeit evaluierten Formel einer PAR von ca. 1.977 $\mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ entsprach. Von den vier Varianten sind die Reflexionssignaturen in Abb. 34 und 35 dargestellt, die sich aufgrund der unterschiedlichen Stickstoffdüngung und Sorteneigenschaften folgendermaßen unterschieden:

'Pegassos' bot durch die planophile Blattausrichtung nach oben hin eine größere Blattfläche für die Spektrometermessungen, wodurch der Reflexionsgrad im NIR-Bereich höher war als bei 'Xanthos'. Deren nach oben hin gezeigte Blattfläche war durch die erectophile Blattstellung geringer, was einen niedrigeren Reflexionsgrad im NIR-Bereich bewirkte. Im sichtbaren Wellenlängenbereich aber reflektierte 'Xanthos' deutlich mehr als 'Pegassos' (s. Abb. 34 und 35).

Die Reflexion der ungedüngten Variante von 'Pegassos' war im Wellenlängenbereich von 400 bis 725 nm höher als bei N_{220} , in Wellenlängenbereichen größer 740 nm aber geringer (Abb. 34). Ein ähnliches Bild bot sich bei 'Xanthos' (Abb. 35), wobei das „Tal“ bei 680 nm bei der Variante N_0 nur sehr schwach ausgeprägt war, was für eine geringere grüne Biomasse spricht (PEÑUELAS und FILELLA, 1998). Die Reflexionssignatur der Variante N_0 von 'Xanthos' war flacher in der Struktur, wobei sie in Wellenlängenbereichen kleiner als 700 nm weitaus höher und mit einer niedrigeren NIR-Schulter als die N_{220} -Variante von 'Pegassos' ausgestattet war. Hier bewirkten zwei Faktoren (die geringere Blattfläche durch die erectophile Blattstellung und der niedrigere Chlorophyllgehalt bei der N_0 -Variante von 'Xanthos') eine dramatischere Veränderung in Form und Höhe der Reflexionssignatur. Bei 'Pegassos' traten die Unterschiede zwischen den Reflexionssignaturen der verschiedenen Düngungsstufen nicht so sehr zutage, was vor allem der planophilen Blattstellung geschuldet war.

Entsprechend zeigte sich der Fluoreszenzpeak auf der Nahinfrarotschulter durch die unterschiedliche N-Düngung und auch durch die erectophile Blattstellung bei 'Xanthos' mehr, bei 'Pegassos' weniger in seiner Höhe beeinflusst: Die Höhe des

Peaks war bei der ungedüngten Variante von 'Xanthos' deutlich geringer ausgeprägt als bei der gedüngten (Abb. 35).

Die höhere N-Düngung wirkte sich grundsätzlich steigernd auf die tageskonstanten Vegetationsindizes aus, wobei die Werte von 'Xanthos' aufgrund der erectophilen Blattstellung unter denen von 'Pegassos' lagen (Tab. 8). Diese niedrige Reflexionsleistung von 'Xanthos' rührte von der erectophilen Blattstellung bei gleichzeitig geringerer Trockenmasse und Bestandesdichte her, obwohl die Sorte 'Xanthos' höhere Chlorophyll- und N-Gehalte besaß als 'Pegassos' (Tab. 7). So zeigten die höheren Werte des REIP bei den N₂₂₀-Varianten eine Verschiebung des Hauptwendepunkts der Reflexionssignatur in Richtung höhere Wellenlängen an, was für einen höheren Chlorophyll- und N-Gehalt sprach. Dabei lag der REIP von 'Xanthos' N₂₂₀ mit 722,1 über dem von 'Pegassos' N₀ mit 719,6, aber unter dem von 'Pegassos' N₂₂₀ mit 723,3. Ähnlich chiasmisch geprägte Konstellationen zwischen den N-Steigerungsstufen und Sorten fanden sich bei den Vegetationsindizes GNDVI und RVI (Tab. 7): Auch bei diesen Vegetationsindizes traten höhere Differenzen zwischen den Düngevarianten von 'Xanthos' als von 'Pegassos' auf. Der Wert der RG-Ratio von 'Xanthos' N₂₂₀ war mit 1,82 sogar niedriger als von 'Pegassos' N₀ mit 1,97.

Tabelle 8. Vegetationsindizes der Winterweizensorten 'Xanthos' und 'Pegassos' im N-Steigerungsversuch am 21. Mai 2002 um 14:00 Uhr

	Xanthos N ₀	Xanthos N ₂₂₀	Pegassos N ₀	Pegassos N ₂₂₀
CF	0,182	0,414	0,402	0,552
REIP	716,8	722,1	719,6	723,3
PRI	0,113	0,089	0,099	0,079
RG-Ratio	1,04	1,82	1,97	2,41
GNDVI	0,409	0,667	0,616	0,727
RVI	2,7	10,1	8,9	16,6
CF/RVI	0,067	0,041	0,045	0,033
CF/GNDVI	0,445	0,621	0,653	0,759
CF/PRI	1,61	4,65	4,06	6,99
FQA	0,00009	0,00021	0,00020	0,00028

Die N₂₂₀-Varianten emittierten eine höhere CF als die N₀-Varianten, wobei sich der Chlorophyllgehalt sowie wiederum die unterschiedliche Blattstellung auswirkten: 'Pegassos' N₂₂₀ hatte die höchste CF mit 0,55 und 'Xanthos' N₀ mit 0,18 die geringste CF. 'Xanthos' N₂₂₀ fluoreszierte mit 0,41 fast genauso stark wie 'Pegassos' N₀, wobei auch hier die Unterschiede zwischen den Varianten bei 'Xanthos' größer ausfielen als von 'Pegassos'. Die CF war in diesem Versuch signifikant zu 89 % mit

dem RVI sowie zu 88 % mit dem GNDVI korreliert, dafür aber gar nicht mit der Sorte (s. Anhang). Entsprechend den Differenzen der CF waren auch die Werte der FQA verteilt, da es sich hier um eine Punktmessung handelte, d.h. mehrere Einzelmessungen der CF sind alle durch denselben Wert ($1.977 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$) geteilt worden.

Nur bei den Werten des PRI fand eine Abnahme der Werte durch die gesteigerte N-Düngung statt, und zwar von 0,113 (N_0) auf 0,089 (N_{220}) bei 'Xanthos' und von 0,099 (N_0) auf 0,079 (N_{220}) bei 'Pegassos' (s. Tab. 8): Die höheren Werte bei den Varianten zeugten von einem aktiveren Xanthophyllzyklus bei den ungedüngten Varianten, bei 'Xanthos' sogar mehr als bei 'Pegassos'.

Der Quotient CF/RVI war bei den N_{220} -Varianten geringer als bei den N_0 -Varianten, bei 'Xanthos' um 0,26 und bei 'Pegassos' um 0,12 (Tab. 8). Demnach fluoreszierte in diesem Versuch eine Biomasseeinheit der N_{220} -Varianten weniger als eine Biomasseeinheit der N_0 -Varianten. Die erectophil ausgerichteten Blätter von 'Xanthos' fluoreszierten um durchschnittlich 0,15 Einheiten stärker als die planophilen von 'Pegassos', bezogen auf die Biomasse.

Bezogen auf den Chlorophyllgehalt fluoreszierten die N_{220} -Varianten um ca. 0,14 Einheiten stärker als die N_0 -Varianten (s. CF/GNDVI, Tab. 8), wobei 'Pegassos' höhere Werte als 'Xanthos' hatte. Auch der Quotient CF/PRI war bei den N_0 -Varianten sowie 'Xanthos' niedriger als bei den N_{220} -Varianten sowie 'Pegassos': Das bedeutete, daß z.B. die N_{220} -Variante von 'Xanthos' mit einem Wert von 4,65 mehr fluoreszierte, bezogen auf die Aktivität des Xanthophyllzyklus, als die N_{220} -Variante.

3.3.2 *Solanum tuberosum* L. cv. 'Selma'

Bei der Kartoffelsorte 'Selma' wurden die Auswirkungen der beiden Stickstoffdüngungsstufen 0 (N_0) und 160 (N_{160}) kg N ha⁻¹ auf die CF im Tagesgang untersucht. Die Bestände befanden sich in der Meßphase zwischen EC 81 und 89. Die verschieden gedüngten Varianten unterschieden sich visuell folgendermaßen: Die N_{160} -Variante besaß dunkelgrüne Blätter, die der N_0 -Variante waren heller und gelbgrün gefärbt. Die N_0 -Variante war weniger wüchsig mit einer durchschnittlichen Bestandesdichte von 240 Trieben pro Parzelle, die N_{160} -Variante mit 352 Trieben

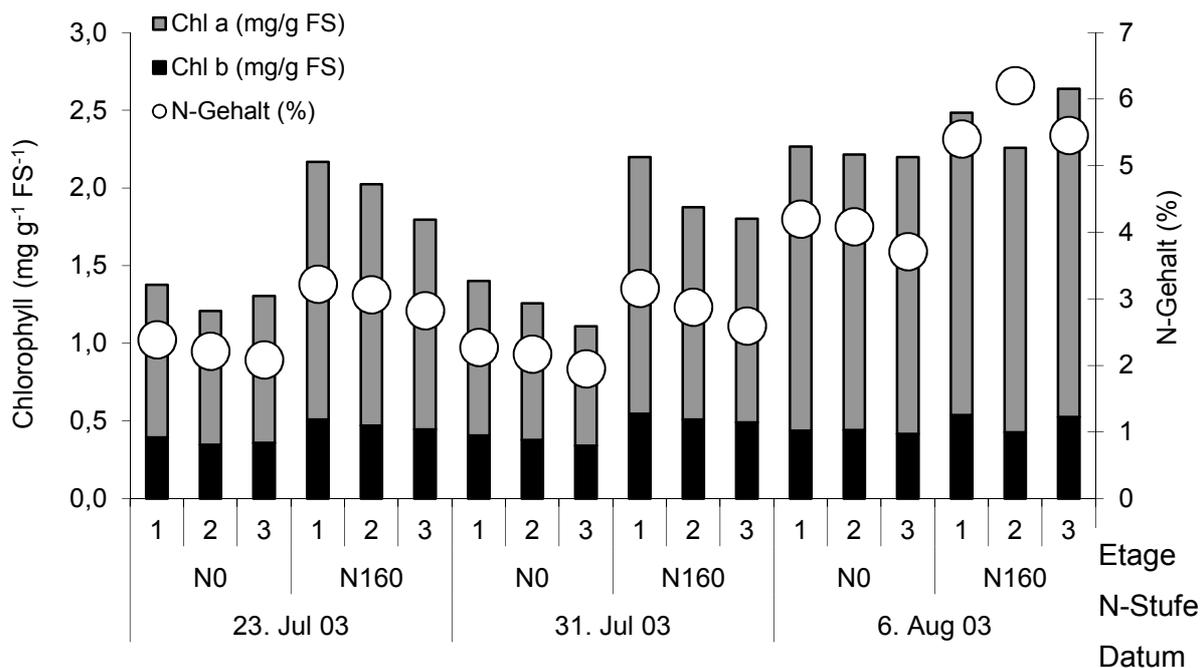


Abbildung 36. Konzentrationen von N-Gesamtgehalt (%) und Chlorophyll a+b ($\text{mg g}^{-1} \text{FS}^{-1}$) während der Meßperiode von *Solanum tuberosum* L. cv. 'Selma'

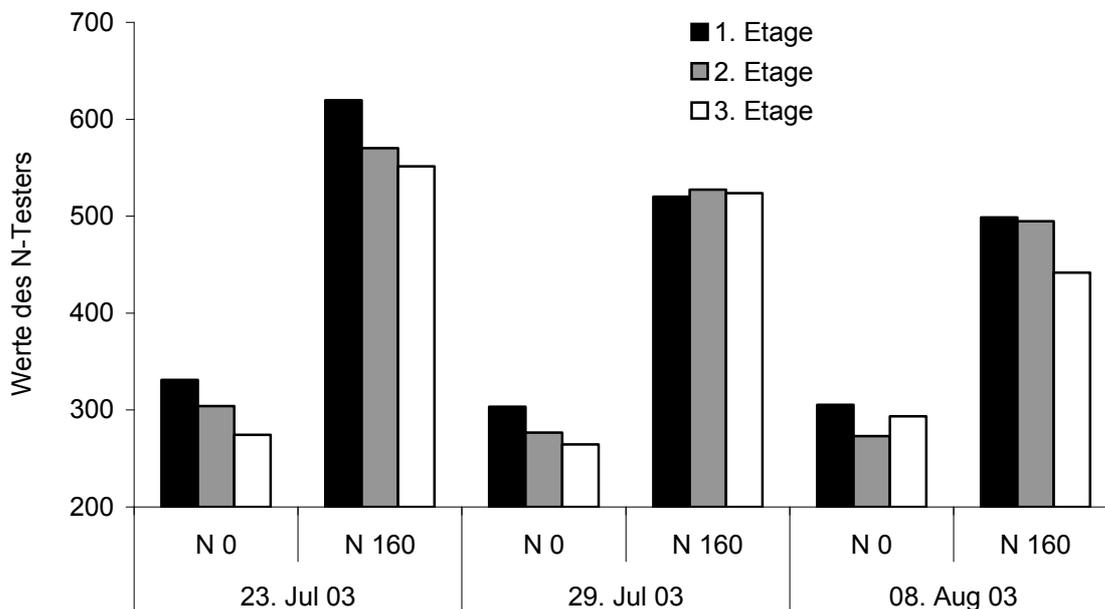


Abbildung 37. Werte des N-Testers der einzelnen Etagen bei *Solanum tuberosum* L. cv. 'Selma'

pro Parzelle. Es wurden insgesamt fünf möglichst vollständige wolkenfreie Tage aufgezeichnet. Im Folgenden wurde auf den 1. August 2003 als repräsentativen Tagesgang zur besseren Erläuterung genauer eingegangen, während gleichzeitig auch auf die anderen vier Meßtage im Vergleich dazu bezuggenommen wurde. Am

24. Juli 2003 mußten die Messungen aufgrund eines unvorhergesehenen Gewitters am Nachmittag abgebrochen werden und konnten nicht wieder aufgenommen werden. Dieser Tag sei der Vollständigkeit halber mitaufgeführt.

In der Meßperiode vom 22. Juli (EC61) bis 7. August 2003 (EC91) verdoppelten sich die Chlorophyll- und die Gesamtstickstoffgehalte der Varianten nahezu (Abb. 36). Dabei waren die höchsten Konzentrationen meist in den Fiederblättern der obersten Etage zu finden. Die Variante N₁₆₀ hatte signifikant höhere Chlorophyll- und Gesamtstickstoffgehalte als die Variante N₀. Im Laufe der Meßperiode verringerten sich die Unterschiede im Chlorophyllgehalt zwischen den Varianten als Zeichen der Abreife, während die Werte des Gesamt-N vor allem zum letzten Entnahmeterrin hin immer mehr auseinanderdrifteten.

Die Werte des N-Testers waren bei der N₀-Variante um durchschnittlich 45 % niedriger als bei der N₁₆₀-Variante (Abb. 37): Bei ersterer lagen sie über die gesamte Meßperiode bei durchschnittlich 292; bei zweiterer aber nahmen die Werte von 581 am 23. Juli auf 478 am 8. August 2003 ab.

Tabelle 9. Mittagswerte der N₀- und N₁₆₀-Variante von *Solanum tuberosum* L. cv. 'Selma'

	22. Jul 03	24. Jul 03	30. Jul 03	1. Aug 03	7. Aug 03
REIP N ₀	717,8	717,3	716,5	716,6	716,6
REIP N ₁₆₀	722,2	722,5	721,6	721,4	720,7
GNDVI N ₀	0,58	0,58	0,56	0,57	0,53
GNDVI N ₁₆₀	0,74	0,75	0,73	0,73	0,68
RVI N ₀	9,5	10,7	9,2	10,5	7,3
RVI N ₁₆₀	18,7	21,1	20,5	20,2	14,7
RG-Ratio N ₀	2,29	2,59	2,40	2,64	2,02
RG-Ratio N ₁₆₀	2,57	2,76	2,94	2,92	2,47

Die Mittagswerte der einzelnen Vegetationsindizes zeigten über die Meßperiode hinweg eine leichte, reifebedingte Abnahme (Tab. 9). Der REIP von N₀ lag bei durchschnittlich 717,0 und von N₁₆₀ bei 721,7, was auf eine deutlich höhere Biomasse bzw. einen höheren Blattflächenindex bei N₁₆₀ gegenüber N₀ schließen ließ. Die Werte des GNDVI (Tab. 9) entsprachen mehr denen des N-Testers (Abb. 37), weniger den Analyseergebnissen (Abb. 36). N₀ hatte mit durchschnittlich 0,57 einen weitaus geringeren GNDVI-Wert als N₁₆₀ mit 0,73.

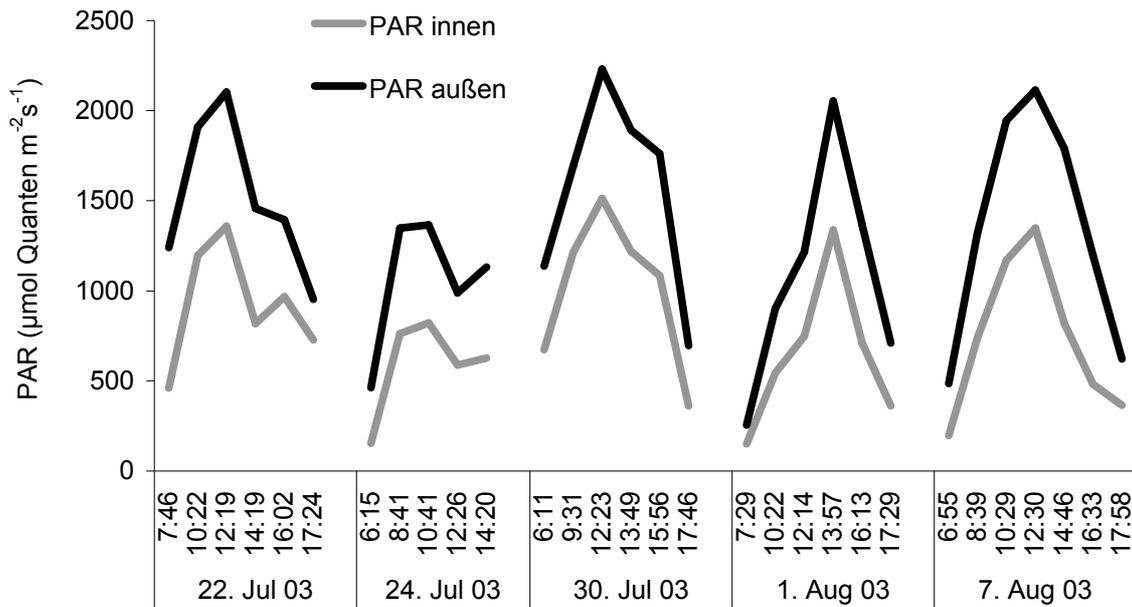


Abbildung 38. Verlauf der photosynthetisch aktiven Strahlung während der fünf Meßtage in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Selma'

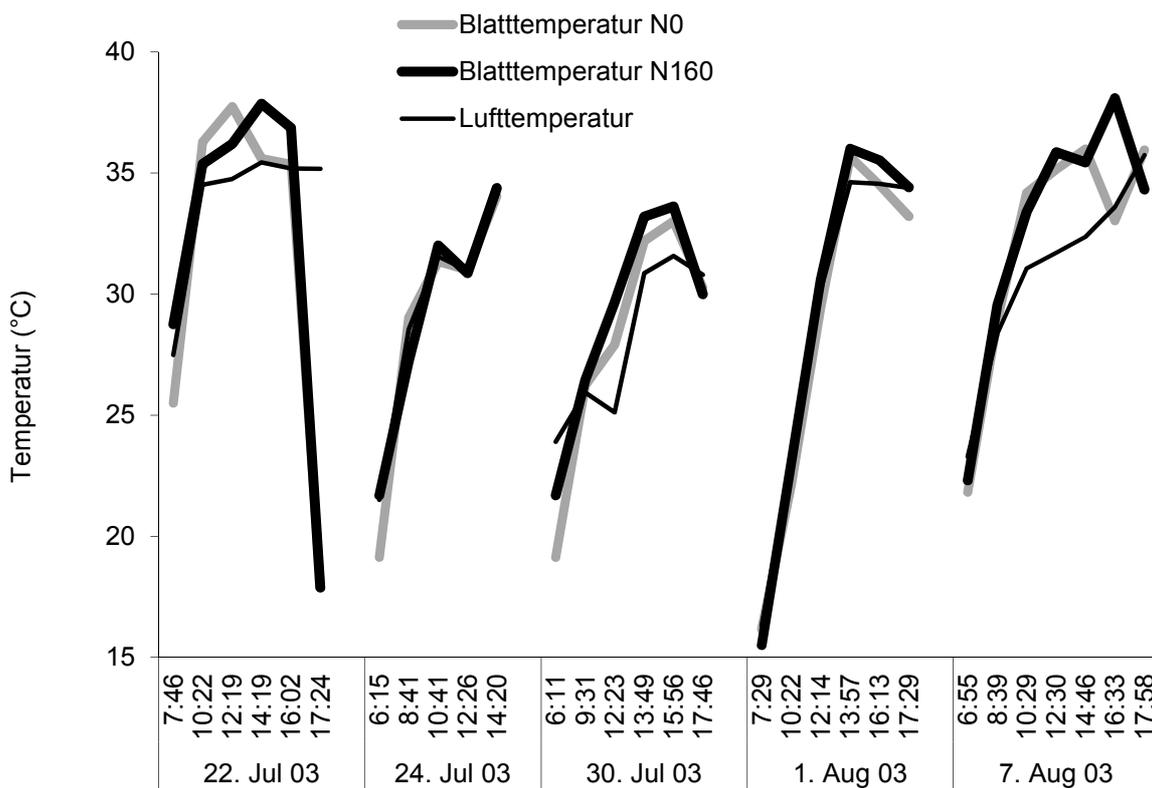


Abbildung 39. Verlauf von Luft- und Blatttemperatur während der fünf Meßtage in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Selma'

Bei den Werten des RVI war bis zum 24. Juli eine vegetationsbedingte Zu- mit nachfolgender Abnahme bis zum 7. August zu verzeichnen, wobei N_{160} höhere RVI-Werte als N_0 hatte. Bei der RG-Ratio zeigten sich ähnliche Unterschiede zwischen den Varianten. Deren Werte nahmen bis zum 1. August kontinuierlich zu. Erst am 7. August war wieder eine deutliche Abnahme zu verzeichnen.

Die $PAR_{\text{au\ss en}}$ nahm an allen fünf Me\ss tagen bis zum Mittag hin zu, zum Abend hin verringerte sie sich wieder (Abb. 38). Einige wenige Einbrüche wie z.B. am 24. Juli um 12:26 Uhr waren durch Wolkenfelder verursacht. PAR_{innen} hatte um durchschnittlich um 36 % geringere Werte als $PAR_{\text{au\ss en}}$ und verlief entsprechend unterhalb und weitgehend parallel zu dieser. $PAR_{\text{au\ss en}}$ betrug z.B. am 7. August 2003 um 12:30 Uhr ca. $2.113 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ und PAR_{innen} nur ca. $1.348 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Am 1. August 2003 lag $PAR_{\text{au\ss en}}$ um 7:29 Uhr bei $255 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$, nahm dann kontinuierlich bis zu einem gemessenen Maximalwert von $2.053 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ um 13:57 Uhr zu und danach auf einen Wert von $711 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ um 17:29 Uhr ab (Abb. 38).

Luft- und Blatttemperatur nahmen an allen Me\ss tagen von morgens bis abends mehr oder weniger kontinuierlich zu (s. Abb. 39), zumeist mit einer leichten spätmittäglichen Abnahme. Sie waren zu 54,8 % miteinander und die Lufttemperatur mit $PAR_{\text{au\ss en}}$ zu 35,8 % korreliert (s. Anhang). Die Varianten unterschieden sich zwar nicht signifikant in Bezug auf die Blatttemperatur. Die Mittagswerte der Blatttemperatur von N_{160} waren aber am 30. Juli und 1. August um durchschnittlich $2 \text{ }^\circ\text{C}$ höher als die der Lufttemperatur. Morgens und abends differierten Luft- und Blatttemperatur weniger und am 24. Juli fast gar nicht. Während der Mittagmessungen waren die Werte der Blatttemperatur von N_{160} tendenziell höher als die von N_0 , der 24. Juli einmal ausgenommen, wobei die Blatttemperatur von N_0 unter der Lufttemperatur lag. Am 30. Juli war dieses Phänomen fast durchgängig, wenn auch mit kleinen Unterschieden zwischen den Varianten zu beobachten (Abb. 39). Am 1. August 2003 nahm die Lufttemperatur von $16 \text{ }^\circ\text{C}$ um 7:29 Uhr auf $35 \text{ }^\circ\text{C}$ um 13:57 Uhr zu und blieb dann bis zum Abend konstant. Nur nachmittags lag die Blatttemperatur von N_{160} über der von N_0 , ansonsten unterschieden sie sich nicht.

Der Verlauf von stomatärer Leitfähigkeit und von Transpirationsrate war bei beiden Varianten an allen Me\ss tagen von einer Abnahme im Tagesverlauf gekennzeichnet. Dabei war die Abnahme der stomatären Leitfähigkeit bzw. das

kontinuierliche Schließen der Stomata im Laufe der einzelnen Meßtage zu 65,1 % auf die steigenden Lufttemperaturen, aber nur zu 27,1 % auf die zunehmende PAR_{innen} zurückzuführen (s. Anhang). Die Werte der N_0 -Variante lagen zumeist über denen der N_{160} -Variante, d.h. die Stomata der N_0 -Variante waren weiter geöffnet als die der N_{160} -Variante (s. Abb. 40), ausgenommen die Morgenmessungen am 24. Juli 2003.

Am 1. August 2003 um 7:29 Uhr morgens waren die Stomata weit geöffnet: Die stomatäre Leitfähigkeit lag bei $0,33 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ bei N_0 bzw. $0,38 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ bei N_{160} und sank bis 16:00 Uhr auf $0,07$ bei N_0 bzw. $0,02 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ bei N_{160} (Abb. 40) ab. Die Stomata beider Varianten schlossen sich also im Laufe des Tages, vor allem um Transpirationsverluste zu minimieren. Bis um 17:29 Uhr war eine leichte Abnahme der stomatären Leitfähigkeit auf $0,08 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ bei N_0 und eine leichte Zunahme auf $0,04 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ bei N_{160} zu verzeichnen. Auch am 3. und 5. Meßtag war eine solche leichte Zunahme der stomatären Leitfähigkeit zum Abend hin bei beiden Varianten festzustellen. Die Stomata von N_0 waren mit einem durchschnittlichen Unterschied von $0,8 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ etwas weiter geöffnet als die von N_{160} .

Die Transpirationsrate (nicht abgebildet) verlief weitestgehend parallel zur stomatären Leitfähigkeit mit einer Korrelation von 93 % (s. Anhang). Entsprechend den Tagesgängen der stomatären Leitfähigkeit sanken die Transpirationsraten beider Varianten im Laufe des 1. August 2003, wobei N_0 im Durchschnitt ca. $3,5 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ mehr als N_{160} transpirierte. N_0 z.B. zeigte z.B. eine Abnahme von $6,6 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ um 10:22 Uhr auf $2,7 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ um 17:29 Uhr.

Auch die Tagesverläufe der Photosyntheserate waren von einer generellen Abnahme gekennzeichnet (Abb. 41). Das Level des Tagesgangs der Photosynthese war am 1. und 5. Meßtag geringer als am 2. bis 4. Meßtag. Die N_0 -Variante assimilierte durchschnittlich $2 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ mehr als die N_{160} -Variante. Am 30. Juli um 6:11 Uhr war es umgekehrt: Bei der zeitweise fast halbstündigen Meßdauer einer Parzelle mit dem LI-COR 6400 änderte sich die Einstrahlung und damit auch die Temperatur bei einer schnell aufsteigenden Sonne so stark, daß es hier schwer war, vergleichbare Ergebnisse für die zwei Varianten zu erhalten. Ähnlich

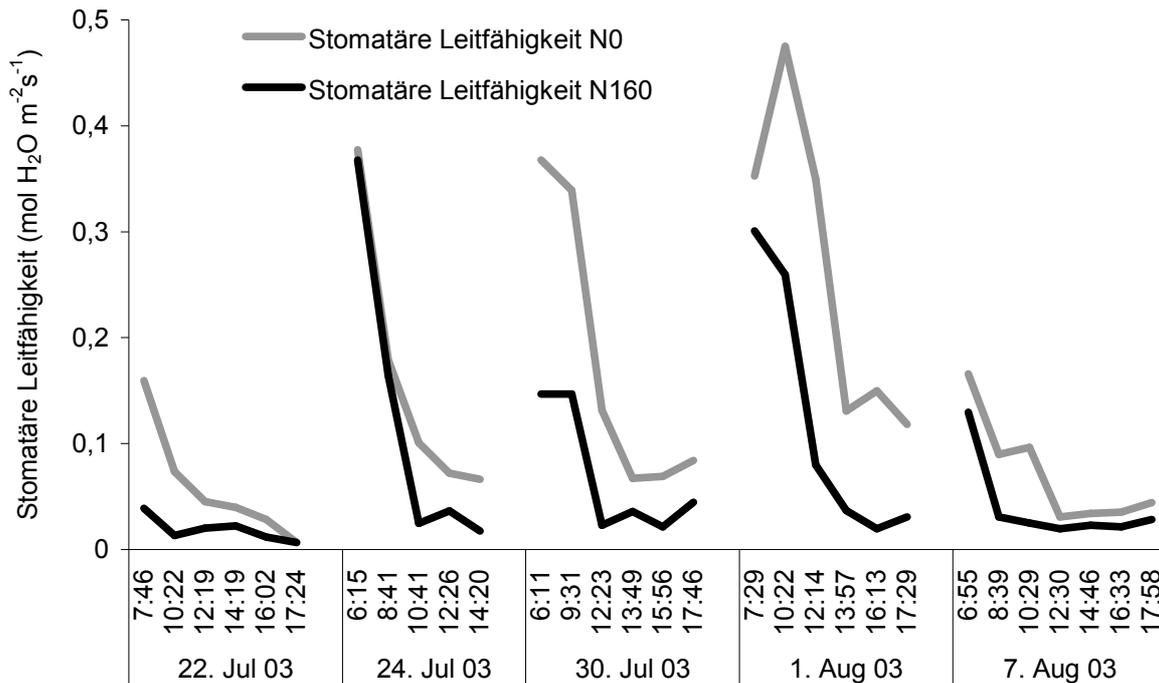


Abbildung 40. Verlauf der stomatären Leitfähigkeit während der fünf Meßtage in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Selma'

erging es mit der 1. Messung am 22. Juli 2003, 7:46 Uhr: Die PHS-Werte beider Varianten lagen bei über $20 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ und fielen dann für den Rest des Tages ab.

Die Photosynthese korrelierte nur zu 15,1 % mit $\text{PAR}_{\text{innen}}$, aber nur zu 4,8 % mit der Lufttemperatur (s. Anhang). Durch den extremen Anstieg von aPAR und Lufttemperatur am Morgen wurde nicht nur der Lichtkompensationspunkt, sondern auch das Einstrahlungsoptimum für die PHS sehr schnell überschritten, so daß die Photosynthese für den Rest des Tages gedrosselt wurde. Die gleichzeitig steigenden Temperaturen sorgten zusätzlich dafür, daß sich die Stomata schlossen und so der Gaswechsel minimiert wurde. Ein Grenzwert war in diesem Versuch eine Temperatur von ca. 27°C . Im Extremfall nahm die PHS bei der N_{160} -Variante zum Abend hin negative Werte an, z.B. am 22. Juli um 16:02 Uhr. Es herrschte also an allen fünf Meßtagen starker Mittagshitze.

Am 1. August 2003 war die Nettphotosyntheserate bei Meßbeginn um 7:29 Uhr aufgrund des geringen Lichtangebots noch um den Nullpunkt herum zu finden ($0,5$ bei N_0 bzw. $-0,2 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ bei N_{160} , s. Abb. 41). Die Photosynthese

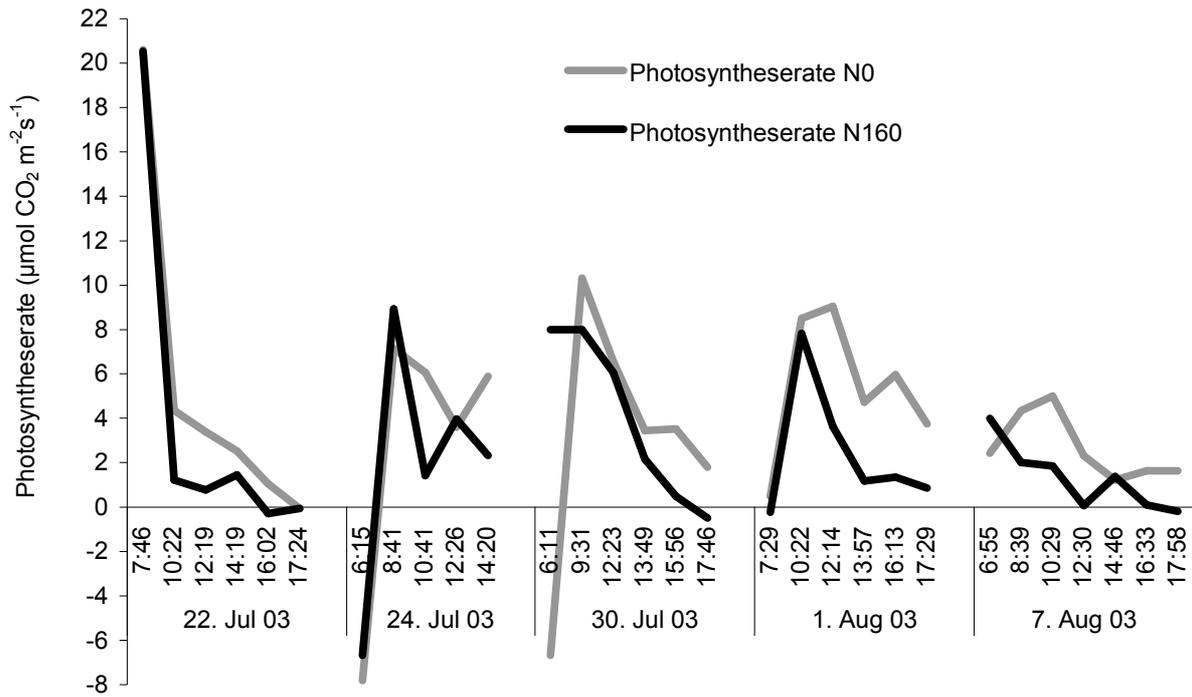


Abbildung 41. Verlauf der Photosyntheserate während der fünf Meßtage in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Selma'

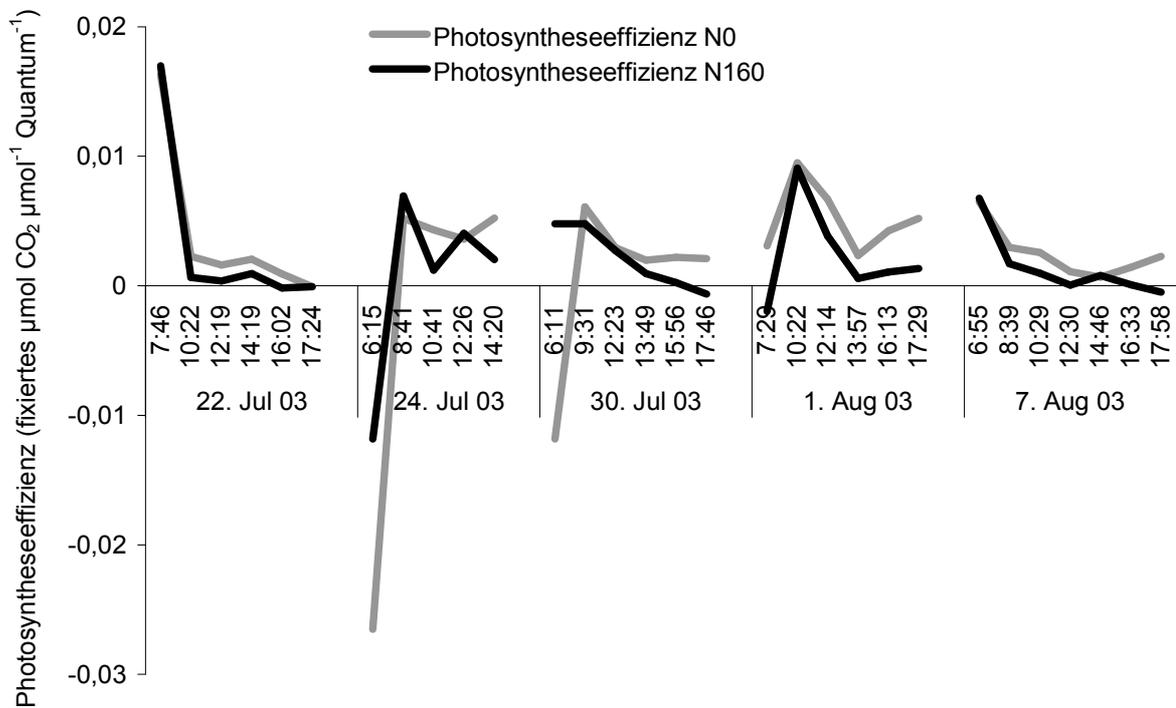


Abbildung 42. Verlauf der Photosynthese-Effizienz während der fünf Meßtage in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Selma'

erreichte ihr Maximum von $9,0 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ um 12:14 Uhr bei N_0 bzw. $7,8 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ um 10:22 Uhr bei N_{160} , um dann bis 17:29 Uhr auf $3,8 (N_0)$ und $0,9 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1} (N_{160})$ abzunehmen. Dabei lagen die PHS-Werte von N_0 immer über denen von N_{160} , wie meistens während der Meßgänge, abgesehen von den Morgenmessungen und einigen punktuellen Abweichungen. Die höheren Photosyntheseraten von N_0 wurden, wie bereits weiter oben beschrieben, von weiter geöffneten Stomata, höheren Transpirationsraten und tendenziell höheren Blatttemperaturen als bei N_{160} begleitet.

Die Tagesgänge der PE zeigten die gleichen Charakteristika wie die der PHS, wenn auch die Kurven der Tagesgänge „weicher“ gezeichnet waren, so z.B. die Messung um 12:14 Uhr am 1. August 2003, wo zum Meßzeitpunkt der PHS bei N_0 noch andere Einstrahlungsbedingungen als bei der Messung von N_{160} herrschten, die durch die Bildung der PE durch Quotientenbildung mit der jeweils dann herrschenden Einstrahlungsstärke „ausgebügelt“ wurden. Mit Ausnahme der Morgenmessungen des 22. Juli und des 7. August nahmen die Mengen an fixiertem $\mu\text{mol CO}_2$ pro eingestrahlttem μmol Lichtquanten im Tagesgang ab (Abb. 42). Die N_0 -Variante betrieb mit durchschnittlich $0,0029 \mu\text{mol CO}_2 \mu\text{mol}^{-1} \text{ Lichtquantum}^{-1}$ tagsüber eine effizientere Photosynthese als die N_{160} -Variante.

Bezogen auf den Chlorophyllgehalt ergab sich für die PHS folgendes Bild: Die Verläufe der PHS, bezogen auf den Chlorophyllgehalt, der Varianten waren parallel zu denen der gemessenen PHS, nur wurde durch die Relativierung auf den Chlorophyllgehalt die Spreizung zwischen den Varianten größer. Die N_0 -Variante enthielt durchschnittlich $0,44 \text{ mg Chlorophyll a g}^{-1} \text{ FS}^{-1}$ weniger als die N_{160} -Variante. So hatte die N_0 -Variante, bezogen auf ihren niedrigeren Gehalt an Chlorophyll a, zumeist eine noch höhere Photosynthese betrieben als die N_{160} -Variante, und zwar um eine Differenz von durchschnittlich $2,17 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Abb. 43). Die N_{160} -Variante fuhr nur am 2., 3. und 5. Meßtag morgens eine höhere PHS als die N_0 -Variante, bezogen auf den Chlorophyllgehalt.

Die Tagesgänge der sonnenlicht-induzierten Chlorophyll-Fluoreszenz (Abb. 44) folgten denen von $\text{PAR}_{\text{außen}}$, mit einer Korrelation von 58,8 %. Die mittäglichen Einbrüche der CF am 22. Juli (14:19 Uhr), 30. Juli (12:23 Uhr) und 1. August

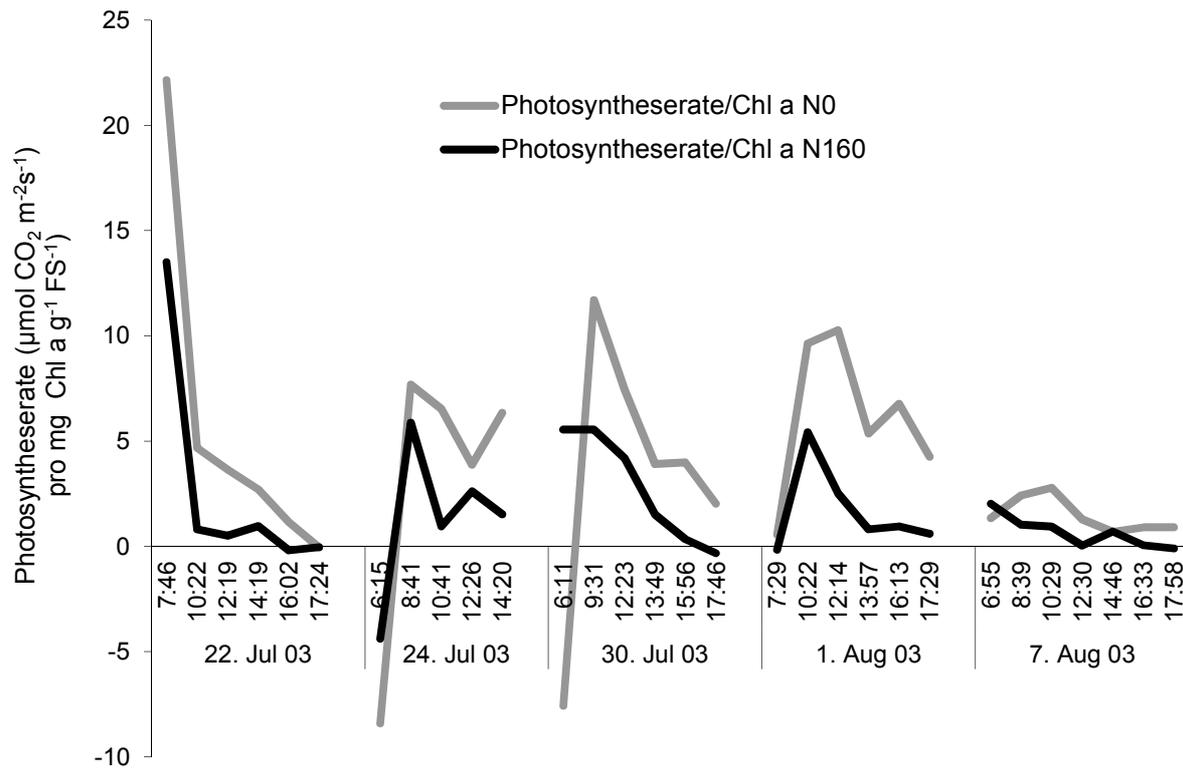


Abbildung 43: Verlauf der Photosyntheserate bezogen auf den Chlorophyllgehalt während der fünf Meßtage in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Selma'

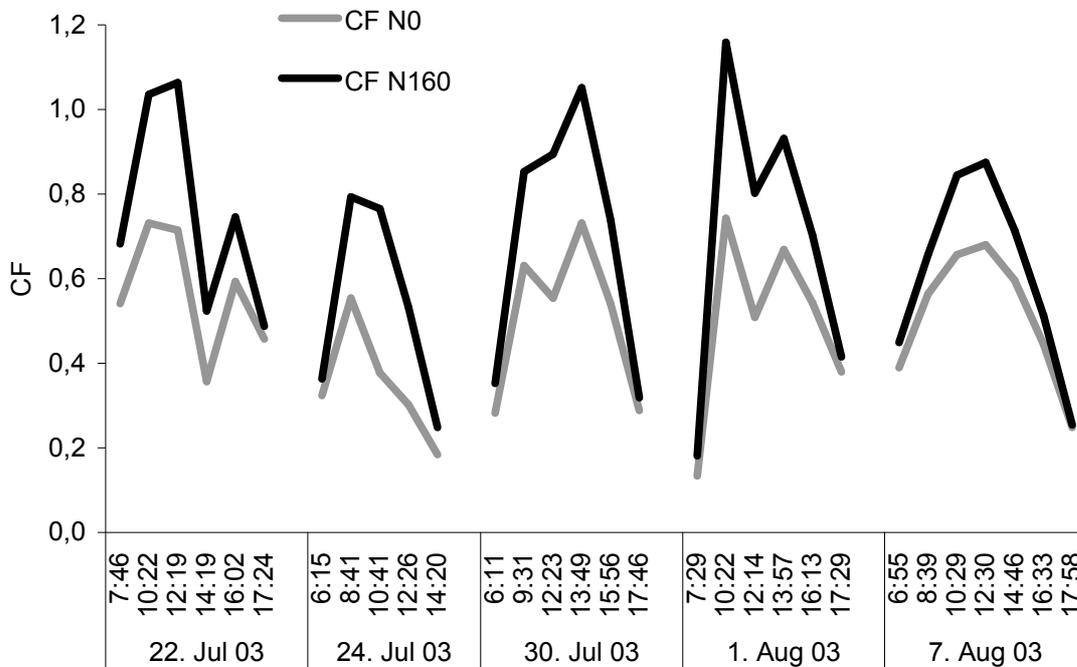


Abbildung 44: Tagesgänge der sonnenlicht-induzierten Chlorophyll-Fluoreszenz während der fünf Meßtage in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Selma'

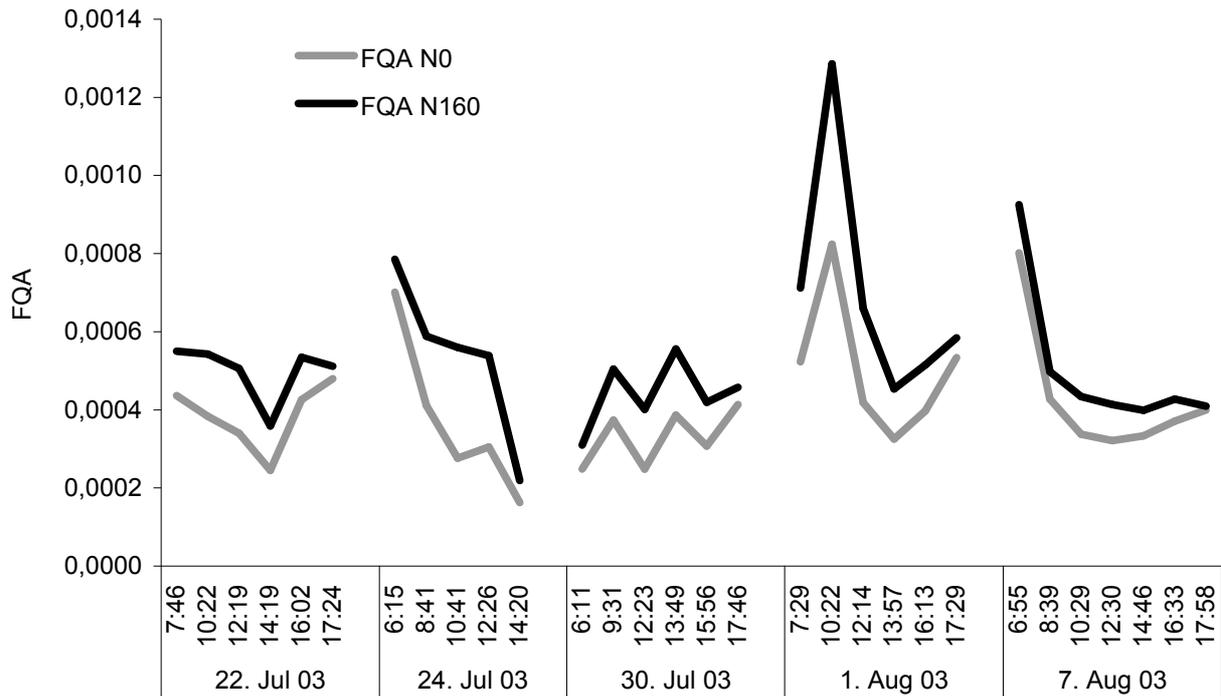


Abbildung 45. Tagesgänge der FQA (CF pro µmol Quanten m²s⁻¹) während der fünf Meßtage in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Selma'

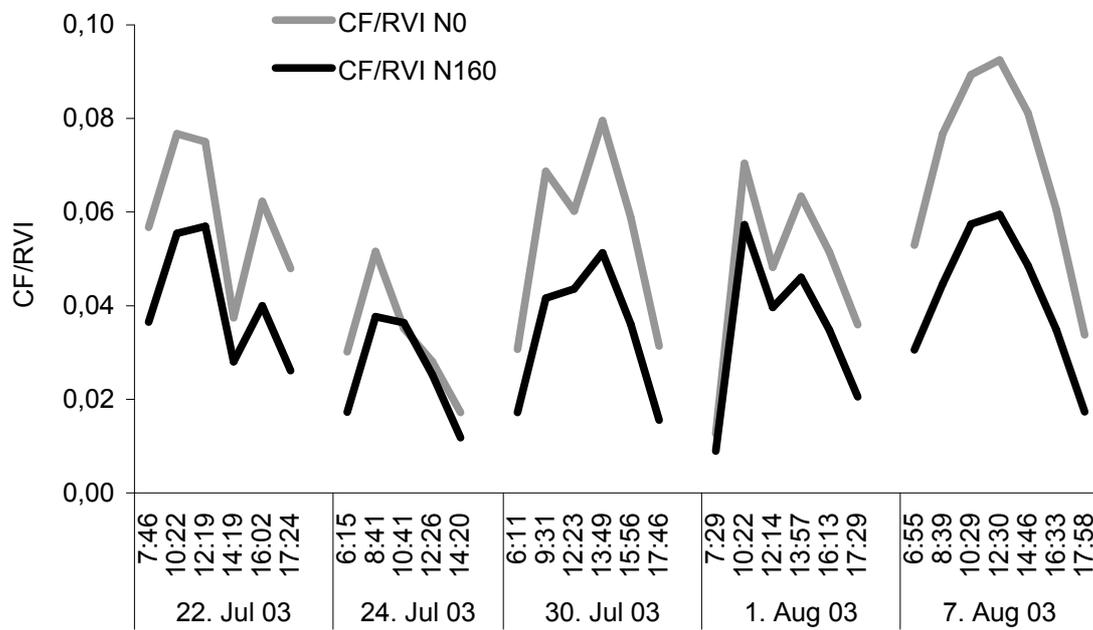


Abbildung 46. Tagesgänge von CF/RVI während der fünf Meßtage in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Selma'

(12:14 Uhr) sind durch eine Verringerung der PAR aufgrund von durchziehenden Wolkenfeldern während der Spektromettermessungen verursacht worden. Der Bestand der N₁₆₀-Variante fluoreszierte um durchschnittlich 0,17 Einheiten stärker als die N₀-Variante, vor allem durch den höheren Chlorophyllgehalt (2,14 mg g⁻¹ FS⁻¹) als bei der N₀-Variante (1,39 mg g⁻¹ FS⁻¹) verursacht. Dabei fluoreszierte N₁₆₀ bei höherem Sonnenstand weitaus mehr als die N₀-Variante während der Morgen- und Abendmessungen, wo die Unterschiede zwischen den Varianten sehr viel geringer waren. Die Korrelation zwischen CF und Lufttemperatur betrug 12 % und zwischen CF und Photosyntheserate geringe 17,9 % (s. Anhang). Der Verlauf der CF (und auch der Blatttemperatur) schien von der Drosselung der PHS im Mittagshitzeß weitestgehend unberührt und von diesem Prozeß entkoppelt zu sein.

Die Tagesgänge der FQA zeigten ein völlig anderes Bild als die der CF, welche eine an Gebirge erinnernde Form hatten. Über die fünf Meßtage hinweg waren die Verläufe beider Varianten unregelmäßig und zeigten jeden Tag ein anderes Bild. Die Varianten differierten auch in Bezug auf die Fluoreszenzquantenausbeute (Abb. 45), wobei wiederum N₁₆₀ grundsätzlich höhere Werte aufwies als N₀. FQA und Photosyntheseeffizienz korrelierten zu 25 % miteinander. Am 1. August 2003 bis 10:22 Uhr nahm die FQA bei N₁₆₀ dramatisch auf 0,0013 und bei N₀ nur auf 0,0008 zu. Bis um 13:57 Uhr nahmen die FQA-Werte beider Varianten ab, um bis um 17:29 Uhr wieder zuzunehmen.

Das Niveau der durch den Vegetationsindex RVI auf die Biomasse normierten CF (CF/RVI) lag für die Bestände mit geringerem RVI über dem von Beständen mit höherem RVI (Abb. 46). Die schwach N-gedüngten Bestände fluoreszierten, auf die Biomasse bezogen, also stärker als die Bestände der Variante N₁₆₀.

Die Tagesgänge von CF/GNDVI näherten sich zwischen den Varianten durch die Normierung an. Das Niveau der Tagesgänge nahm im Laufe der Meßperiode leicht ab, den 24. Juli ausgenommen. Am zweiten, dritten und vierten Meßtag hatte die N₀-Variante geringere CF/GNDVI bei höheren Einstrahlungsstärken als die N₁₆₀-Variante, so auch am 22. Juli zwischen 10:22 Uhr und 12:19 Uhr. Nur am letzten Meßtag hatte N₀ fast gleich hohe Werte wie N₁₆₀: die Varianten verliefen parallel. Obwohl die Verläufe der Tagesgänge von CF/GNDVI mit denen von CF/RVI identisch waren, geschah dies doch auf einem anderen Niveau. Während CF/RVI der

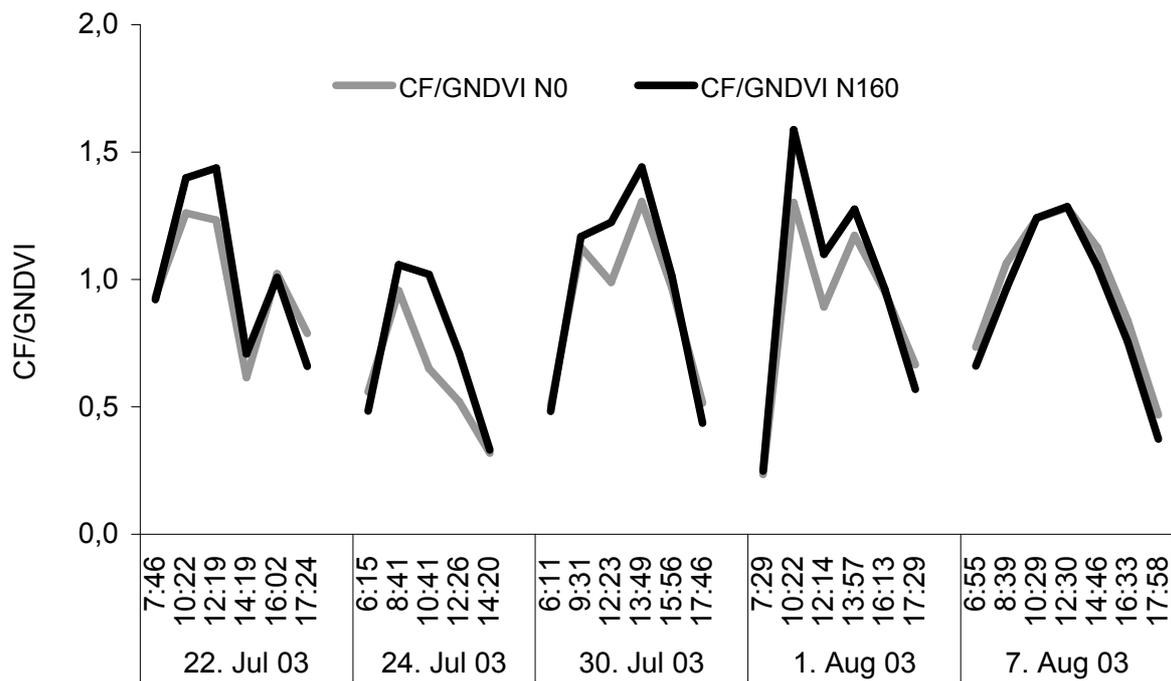


Abbildung 47. Tagesgänge von CF/GNDVI während der fünf Meßtage in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Selma'

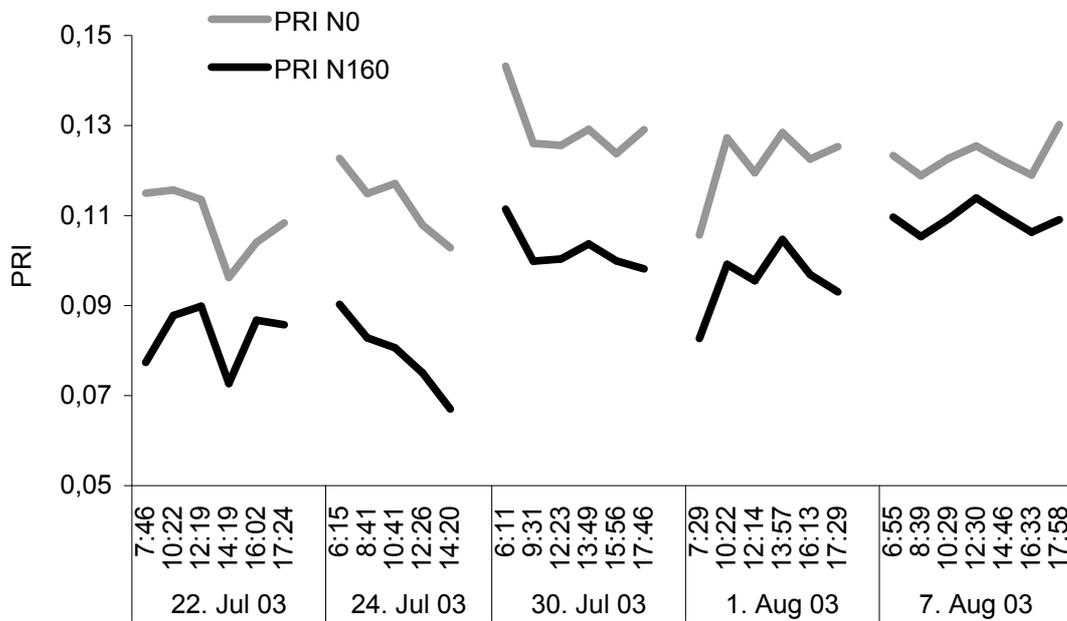


Abbildung 48. Tagesgänge des PRI während der fünf Meßtage in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Selma' (2003)

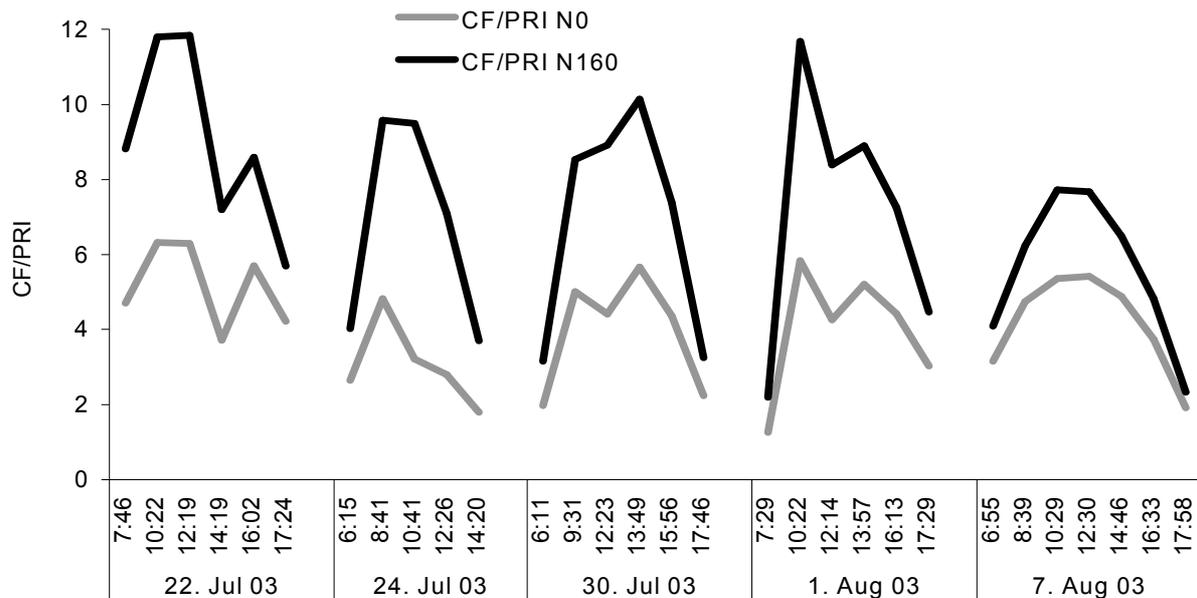


Abbildung 49. Tagesgänge von CF/PRI während der fünf Meßtage in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Selma'

N₀-Variante um durchschnittlich 0,018 Einheiten über dem der N₁₆₀-Variante lag, unterschieden sich die Varianten in Bezug auf CF/GNDVI um nur 0,045 Einheiten (Abb. 47).

Die N₀-Variante hatte durchgehend einen um durchschnittlich 0,025 Einheiten höheren PRI als die N₁₆₀-Variante (Abb. 48). Anders als bei den Tagesgängen der CF lagen die PRI-Werte der Varianten in den Morgen- und Abendstunden nicht näher beieinander, sondern zeigten meist den gleichen Abstand zueinander. Die Tagesgänge der Varianten verliefen also mehr oder weniger parallel. Nur am letzten Meßtag lagen die Varianten dichter beieinander. Es war eine leichte Zunahme der Tagesgänge des PRI von 0,109 auf 0,123 bei N₀ und von 0,083 auf 0,109 bei N₁₆₀ über die gesamte Meßperiode zu verzeichnen. Der PRI war zu 81 % mit der Lufttemperatur korreliert, aber nur zu 21 % mit der Blatttemperatur, mit PAR_{außen} zu 48 %, zur PHS zu 0,1 % und zur PE 17 % (s. Anhang). Es bestand eine inverse Korrelation von 41,3 % zwischen PRI und N-Düngungsstufe.

In diesem Versuch nahm das Niveau des Tagesgangs von CF/PRI von N₁₆₀ zum Meßende hin tendenziell ab (Abb. 49). Bei N₀ blieb es eher konstant. Die Werte von N₀ lagen dabei grundsätzlich unter denen von N₁₆₀, d.h. daß N₁₆₀ mehr fluoreszierte, während der Xanthophyllzyklus weniger aktiv war, im Gegensatz zur Variante N₀, die zwar weniger fluoreszierte, deren Xanthophyllzyklus dabei aber aktiver war.

Speziell verwiesen sei hier auf die 10:22-Uhr-Messung am 1. August 2003, ohne zwischen den Varianten zu unterscheiden: Hier waren PE sowie FQA bei zwar steigenden, aber noch nicht wirklich hohen PAR- und auch Temperatur-Werten ausnehmend hoch. Auch die stomatäre Leitfähigkeit der N₁₆₀-Variante zeigte ein Maximum, bei N₀ war es schon abgeschwächt, wobei wohl hier auch der Meßzeitpunkt ausschlaggebend war. Dies spiegelte sich auch in einer gleichzeitigen Zunahme des PRI wider. Bei der Messung um 13:57 Uhr lösten hingegen hohe PAR- und Temperatur-Werte einen Mittagshitzestreß bei den Varianten aus: Geringe stomatäre Leitfähigkeiten und Transpirationsraten herrschten bei einer gedrosselten PHS sowie PE, während die CF-Werte hoch und die FQA- sowie PRI- Werte die geringsten des Tages waren.

In den Stickstoffsteigerungsversuchen differierten die Varianten in den meisten untersuchten Merkmalen tagsüber deutlicher untereinander als in den Morgen- und Abendstunden. Gleichzeitig konnte das Phänomen des Mittagshitzestreßes realisiert werden, was sich vor allem in einer deutlichen Drosselung der Photosyntheserate, nicht aber in einer bemerkbaren Veränderung des Verlaufs der CF (und deren Abkömmlinge CF/PRI, CF/GNDVI usw.) zeigte. Vor allem das Ergebnis, daß ein Bestand mit einem geringeren Chlorophyllgehalt, ausgelöst durch eine verminderte N-Düngung, bei gleichzeitig höherer Photosyntheserate eine geringere CF hatte, während ein Bestand mit einem höheren Chlorophyllgehalt eine höhere CF mit geringerer Photosyntheserate zeigte, widerspricht den eingangs erwähnten Aussagen von MOHOTTI und LAWLOR (2002), nach denen eine verminderte Stickstoffdüngung einen geringeren Stickstoffgehalt der Blätter und eine insignifikant geringere Photosyntheserate verursache.

3.4 Versuche zur Krankheitsfrüherkennung

3.4.1 *Hordeum vulgare* L. 'Duet'



Abbildung 50. Blätter der beiden oberen Etagen von 'Duet' am 20. Mai 2003.

Die wirtschaftlich bedeutsame Braugerstensorte 'Duet' wurde in den Varianten „Unbehandelt“ und „Opera“ (Gabe von $1,5 \text{ l ha}^{-1}$ Opera am 23. April 2003) mit Spektrometer und LI-COR 6400 über den Zeitraum von drei Wochen gemessen. Am 20. Mai war noch keine Differenzierung zwischen den Varianten auszumachen (Abb. 50). Erst am 28. Mai ließ sich eine unterschiedliche Symptomausprägung zwischen den Varianten realisieren.

Die Zu- (13. bis 28. Mai) und Abnahme (ab 3. Juni) der Chlorophyllgehalte trat vegetationsbedingt (s. Abb. 51) auf. Der Gesamtstickstoffgehalt blieb bis zum 22. Mai bei durchschnittlich 4,8 % konstant, danach nahm er kontinuierlich auf durchschnittlich 2,8 % bei der unbehandelten und 3,3 % bei der Variante Opera ab. Eine Differenzierung zwischen den Varianten und den Etagen trat erst am vorletzten Entnahmetag auf. Ab dem 28. Mai 2003 hatte die Blattetage F-1 der Variante Opera einen bedeutend höheren Chlorophyllgehalt aufzuweisen.

Die leichte Zunahme der Mittagswerte der tageskonstanten Vegetationsindizes bis zum 28. Mai 2003 und die darauffolgende Abnahme (Tab. 10) entsprachen der vegetationsbedingten Zu- und Abnahme des Chlorophyllgehalts. Die Varianten unterschieden sich in der ersten Hälfte des Meßzeitraumes nur geringfügig, in der zweiten Hälfte zeigte die Variante Opera zumeist leicht höhere Werte

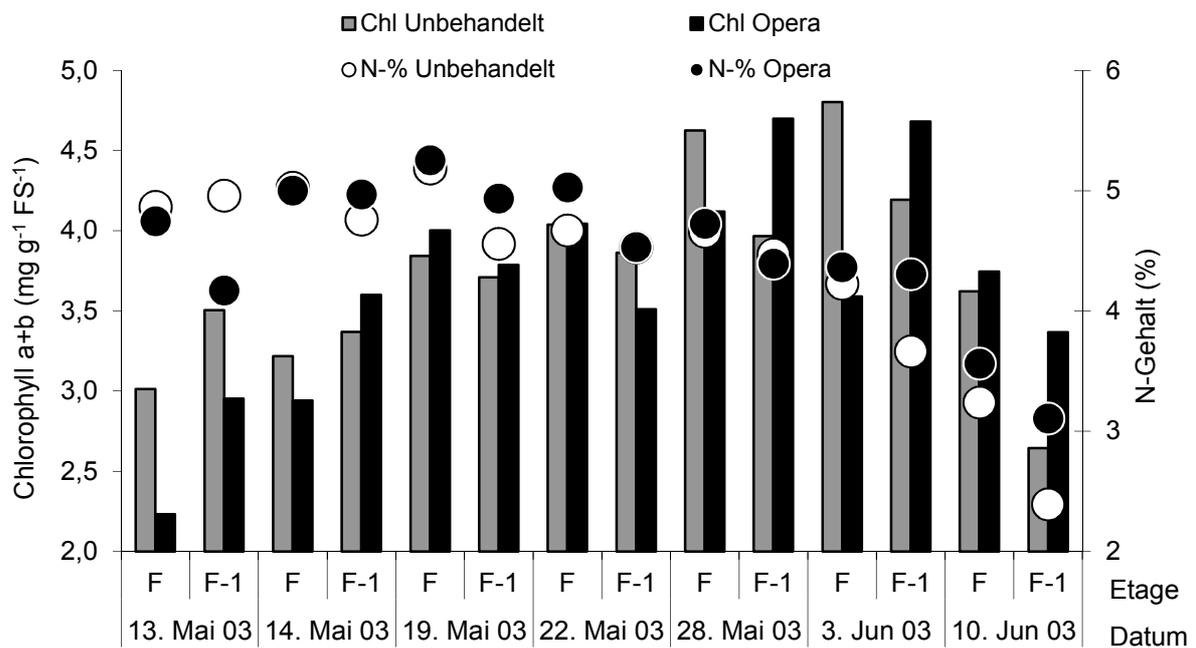


Abbildung 51. Chlorophyll- und N-Gehalte der Varianten Opera und Unbehandelt in der Wintergerste 'Duet'

als die unbehandelte Variante, wenn auch mit einer gewissen Unregelmäßigkeit. Dabei waren die Unterschiede zwischen den Varianten hier weitaus geringer als bei den Stickstoffsteigerungsversuchen. Eine endgültige Differenzierung zwischen den Varianten schien erst an den letzten beiden Meßtagen zu passieren, z.B. beim REIP: Hier hatte die Variante Opera erst ab dem 5. Juni höhere REIP-Werte als die unbehandelte Variante, so geschehen auch beim GNDVI und beim RVI, welcher während der Meßperiode auch einer dramatischen Abnahme unterlag.

Tabelle 10. Mittagswerte der unbehandelten und mit Opera behandelten Variante von 'Duet'

	22. Mai 03	28. Mai 03	3. Jun 03	5. Jun 03	10. Jun 03
REIP Unbehandelt	726,8	730,6	727,5	724,4	723,7
REIP Opera	726,8	730,2	725,4	725,5	725,4
GNDVI Unbehandelt	0,75	0,79	0,7	0,64	0,62
GNDVI Opera	0,76	0,78	0,66	0,66	0,66
RVI Unbehandelt	26,8	27,6	16,5	12,9	10,3
RVI Opera	27	28,4	13,9	13,7	13,1
RG-Ratio Unbehandelt	3,29	2,76	2,47	2,47	2,04
RG-Ratio Opera	3,26	2,92	2,49	2,43	2,28

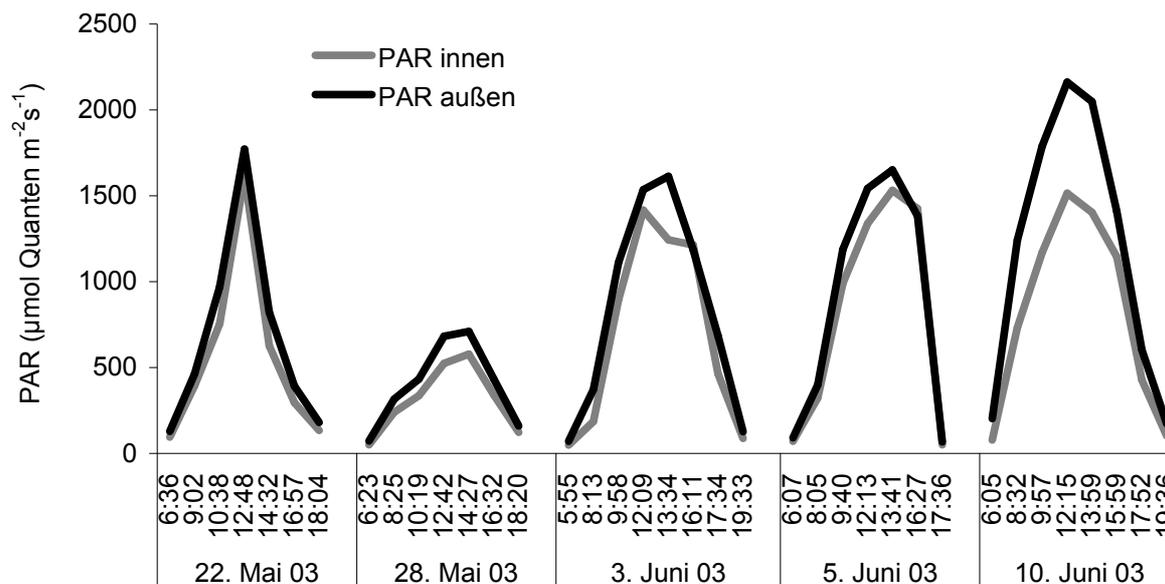


Abbildung 52. Tagesgänge der photosynthetisch aktiven Strahlung an den fünf Meßtagen in der Wintergerste 'Duet'

Vor der Meßperiode herrschte trockenes, heißes und strahlungsreiches Wetter bei Tagestemperaturen von durchschnittlich 8 °C im April, 15 °C im Mai und 21 °C im Juni 2003. Im April 2003 hatte es insgesamt 10,9 mm geregnet, im Mai waren es 78,9 mm (Daten der Wetterstation Nr. 76, s. Anhang). Bei den fünf Meßtagen zwischen dem 22. Mai und 10. Juni 2003 handelte es sich um kontinuierlich ansteigend heiße und strahlungsreiche Tage, mit Ausnahme des 28. Mais, der von geringeren Einstrahlungsstärken gekennzeichnet war (Abb. 52). Die Werte von PAR_{innen} lagen meist unter denen von PAR_{außen}, was vor allem am 10. Juni der Fall war. Auch hier traten die Unterschiede zwischen PAR_{innen} und PAR_{außen} tagsüber deutlicher, morgens und abends weniger deutlich zutage.

Entsprechend den hohen Einstrahlungsstärken nahm auch das Niveau des Tagesgangs der Lufttemperatur während der Meßperiode auch am 28. Mai kontinuierlich zu (Abb. 53). Am 22. Mai lag das gemessene Maximum der Lufttemperatur bei 26 °C (12:48 Uhr) und am 5. Juni bei 39 °C (12:13 Uhr). Die Lufttemperatur war zu 67,5 % mit PAR_{außen} korreliert (s. Anhang). Luft- und Blatttemperaturen unterschieden sich meist nicht signifikant. An den letzten beiden Meßtagen aber lagen die Blatttemperaturen mittags und nachmittags um durchschnittlich 1,5 °C über der Lufttemperatur. Zu dieser Zeit hatte auch die unbehandelte Variante eine um durchschnittlich 1,8 °C geringere Blatttemperatur als die Variante Opera.

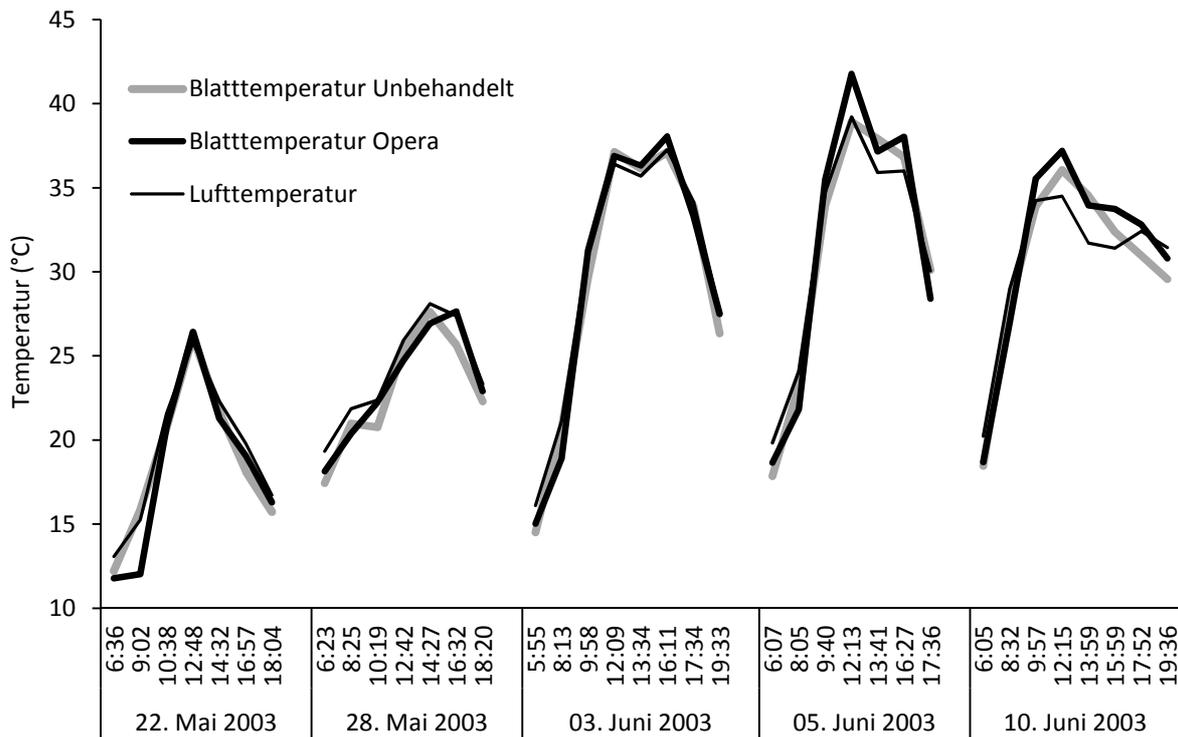


Abbildung 53. Tagesgänge der Luft- und Blatttemperaturen der Varianten Opera und Unbehandelt an den fünf Meßtagen in der Wintergerste 'Duet'

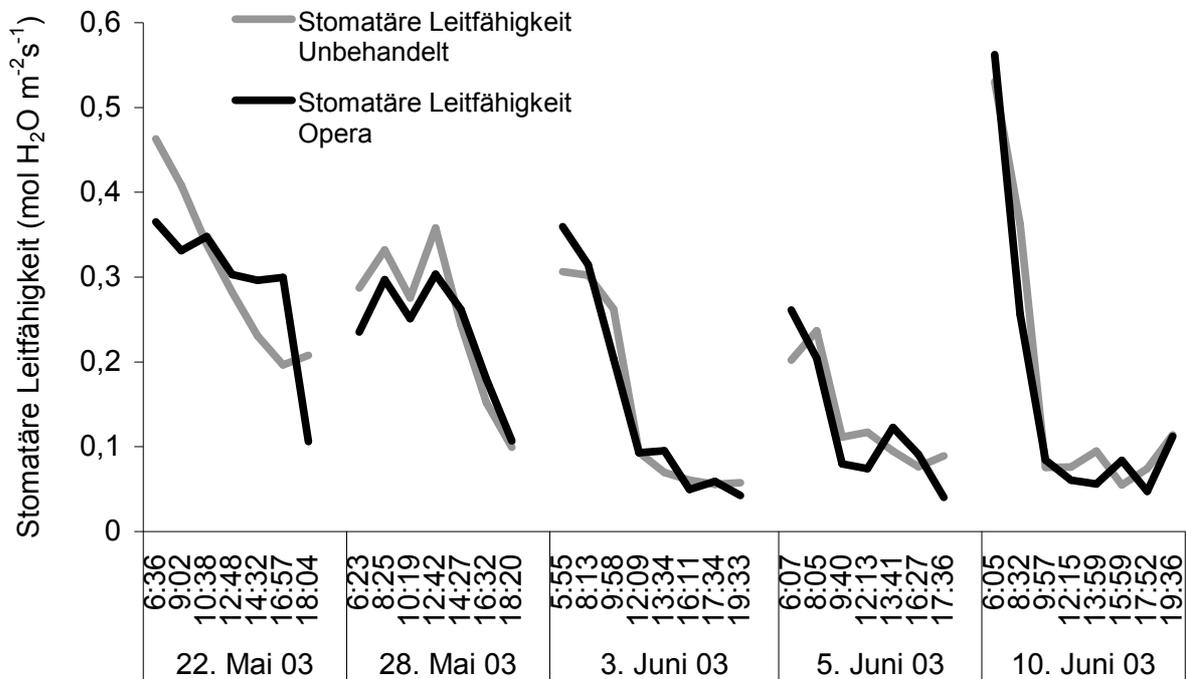


Abbildung 54. Tagesgänge der stomatären Leitfähigkeit der Varianten Opera und Unbehandelt an den fünf Meßtagen in der Wintergerste 'Duet'

Die Varianten unterschieden sich in Bezug auf die stomatäre Leitfähigkeit (Abb. 54) und die Transpirationsrate (Abb. 55) nicht signifikant, welche zu 68,6 % miteinander korrelierten, aber nicht parallel verliefen. Während sich die Stomata im Tageslauf vor allem an den letzten drei Meßtagen kontinuierlich schlossen (abnehmende stomatäre Leitfähigkeit), erreichte die Transpirationsrate je nach Temperaturverlauf ihr Maximum vormittags bis mittags. Vor allem am letzten Meßtag unterschieden sich die Varianten bezüglich der stomatären Leitfähigkeit fast gar nicht, während die Meßwerte der Transpirationsrate der Varianten von Meßzeitpunkt zu Meßzeitpunkt alternierten (Abb. 55).

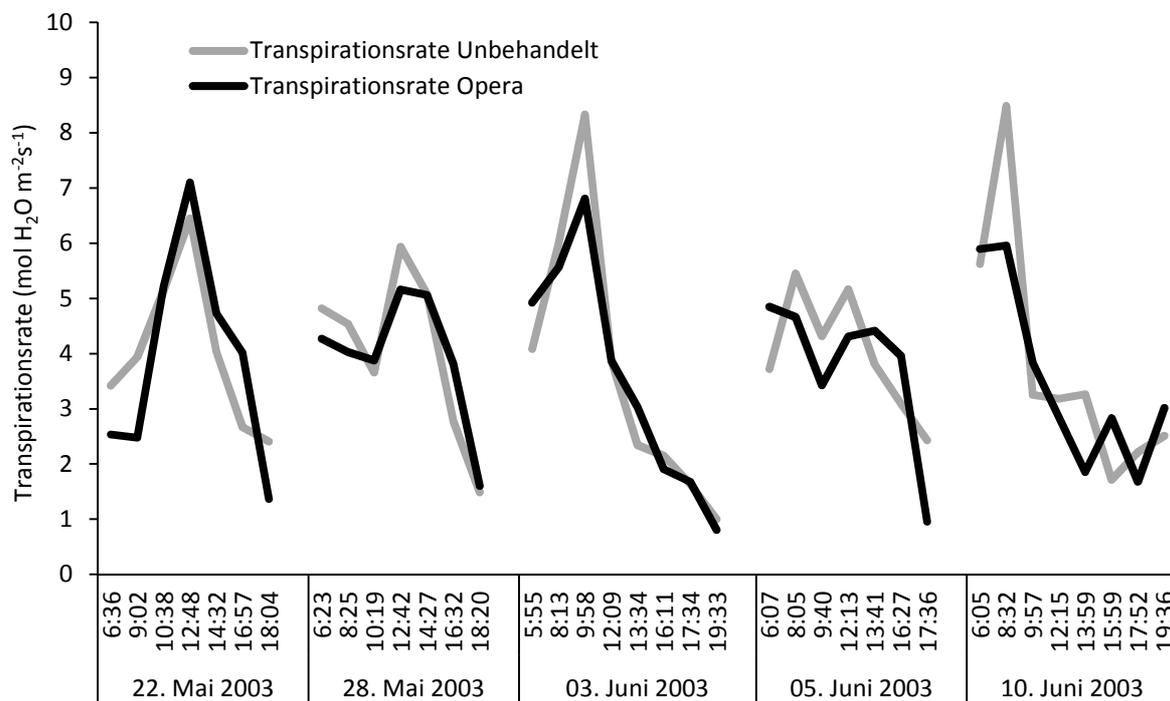


Abbildung 55. Tagesgänge der Transpirationsrate der Varianten Opera und Unbehandelt an den fünf Meßtagen in der Wintergerste 'Duet'

Das Tagesgangniveau der Photosyntheserate nahm während der Meßperiode kontinuierlich ab (Abb. 56), was auch hier wiederum als Zeichen der Seneszenz gewertet werden konnte. Auch waren die zunehmenden Temperaturen und Einstrahlungsstärken, die die Photosyntheseoptima überschritten, weitere dämpfende Faktoren. An den ersten drei Meßtagen waren noch Tagesgänge meßbar, die mit der PAR eher korrelierten. Die letzten beiden Tagesgänge aber waren von leichtem Mittagshitzestress geprägt, wie schon am Verlauf von stomatärer Leitfähigkeit und Transpirationsrate ersichtlich war. Die beiden Varianten unterschieden sich an den ersten drei Meßtagen nicht in Bezug auf die

Photosyntheserate. Photosyntheserate und PAR_{innen} waren zu 38,3 % miteinander korreliert (s. Anhang).

An den letzten beiden Meßtagen war die Photosyntheserate der unbehandelten Variante mittags und nachmittags an einigen Meßpunkten höher als bei der Variante Opera, z.B. am 5. Juni um 12:13 Uhr um eine Differenz von $4,1 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, was mit einer geringeren Blatttemperatur und einer höheren stomatären Leitfähigkeit bei der unbehandelten Variante einherging.

Ein weiteres Phänomen waren die ausgesprochen negativen Werte der Photosyntheserate beider Varianten am 3. Juni um 8:13 Uhr, obwohl die vorhergehende Messung um 5:55 Uhr im positiven Bereich war. Andere Parameter wie z.B. Blatttemperaturen, PAR oder stomatäre Leitfähigkeit zeigten keine großen Abweichungen. Ein Meßfehler des LI-COR 6400 war jedoch auszuschließen, da das Gerät einwandfrei bei den Messungen davor und danach sowie zum Meßzeitpunkt bei beiden Varianten einwandfrei funktionierte. Deswegen konnte diese Messung um 5:55 Uhr am 3. Juni als Ausreißer gewertet werden.

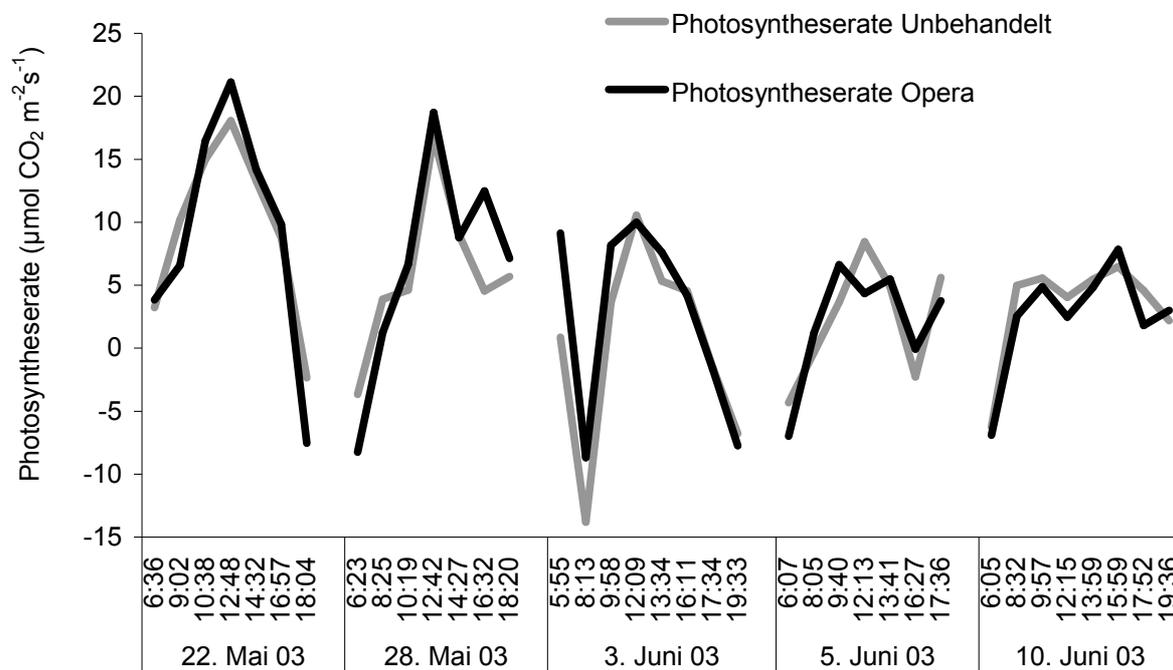


Abbildung 56. Verlauf der Photosyntheserate der Varianten Opera und Unbehandelt an den fünf Meßtagen in der Wintergerste 'Duet'

Die Varianten unterschieden sich auch nicht signifikant in bezug auf die Photosyntheseeffizienz (Abb. 57). Tagsüber zeigte sich durchaus ein konstanter

Verlauf, während die Werte der Morgen- und Abendmessungen meist sehr viel höher oder niedriger waren. Abgesehen von diesen Extremwerten war eine leichte Abnahme des tagsüber auftretenden konstanten Plateaus des Tagesgangs bei beiden Varianten von durchschnittlich $0,026$ auf $0,005 \mu\text{mol CO}_2 \mu\text{mol}^{-1} \text{Quantum}^{-1}$ zu beobachten. Warum die Morgenmessungen vom 28. Mai, 5. und 10. Juni negative PE-Werte kombiniert mit höheren PE-Werten abends hatten, während die Abendmessung am 3. Juni negative Werte ergab, konnte nicht nachvollzogen werden. Wie oben beschrieben, wurde die Messung um 5:55 Uhr am 3. Juni als Ausreißer angesehen.

Eine Angleichung der Photosyntheserate an die Werte von Chlorophyll a erbrachte eine klarere Differenzierung, zumindest am letzten Meßtag (Abb. 58): An diesem fuhr die unbehandelte Variante tagsüber, also bei höheren Einstrahlungsstärken, eine noch höhere PHS, bezogen auf den Chlorophyllgehalt, als die Variante Opera, abgesehen von der Messung um 15:59 Uhr. Auch hier zeigten sich ausgeprägte Tagesgänge wie bei denen von der PHS.

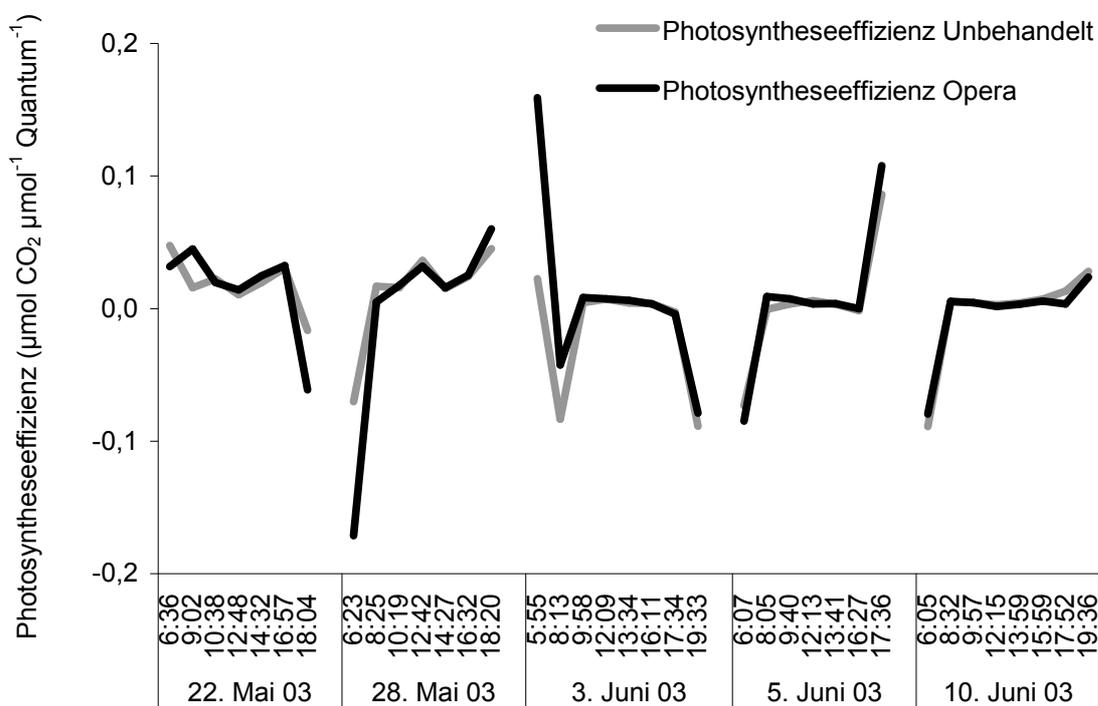


Abbildung 57. Tagesgänge der Photosyntheseeffizienz der Varianten Opera und Unbehandelt an den fünf Meßtagen in der Wintergerste 'Duet'

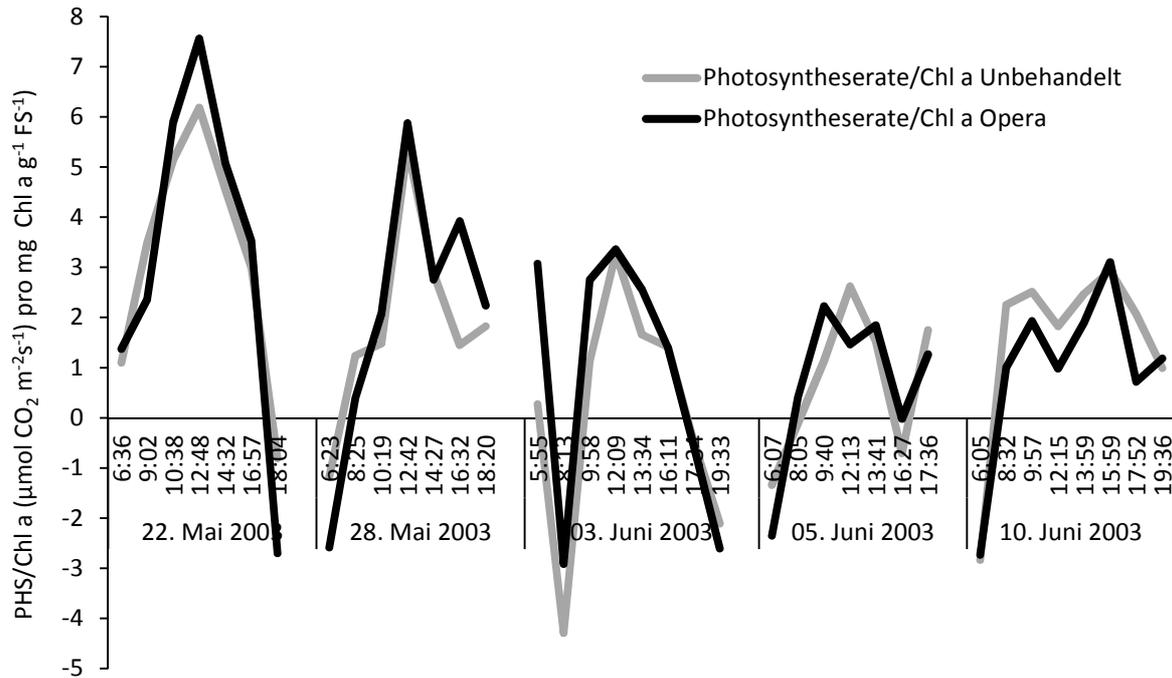


Abbildung 58: Verlauf der Photosyntheserate bezogen auf den Gehalt an Chlorophyll a der Varianten Opera und Unbehandelt an den fünf Meßtagen in der Wintergerste 'Duet'

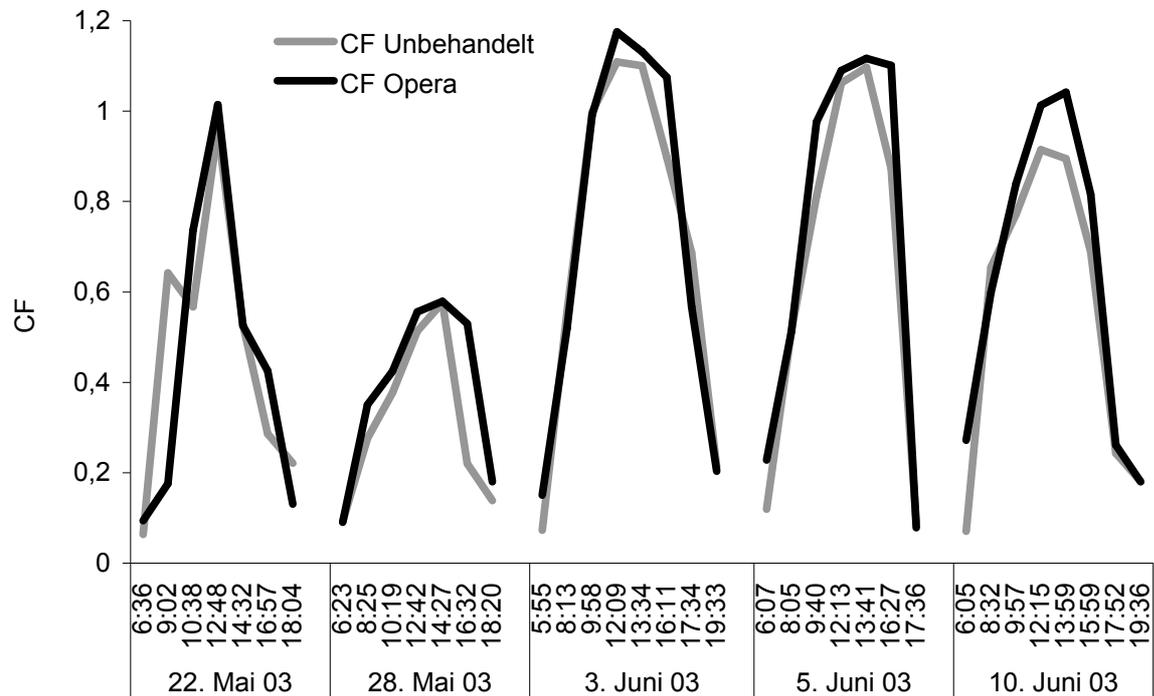


Abbildung 59. Tagesgänge der CF der Varianten Opera und Unbehandelt an den fünf Meßtagen in der Wintergerste 'Duet'

Die CF war zu 87 % mit $PAR_{\text{au\ss en}}$ korreliert (s. Anhang), was sich vor allem im hügel förmigen Verlauf der Tagesgänge zeigte. Das Niveau des Tagesgangs der CF war am 28. Mai entsprechend den geringen Einstrahlungsverhältnissen niedrig. An den letzten drei Meßtagen nahm das Tagesgangniveau der CF trotz kontinuierlich steigender Tagesmaxima von $PAR_{\text{au\ss en}}$ von 1.613 am 5. Juni auf 2.161 $\mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ geringfügig von einem Tagesmaximum von durchschnittlich 1,14 auf 0,97 ab, was mit der im Zuge der Abreife stattfindenden Abnahme von Chlorophyll- und Stickstoffgehalten einherging.

Die Unterschiede bezüglich der CF zwischen den Varianten waren am ersten Meßtag nicht eindeutig, denn hier hatte die unbehandelte Variante morgens eine höhere, mittags und zeitweise nachmittags eine geringfügig geringere PHS als die mit Opera behandelte Variante. Die Varianten begannen dann am 28. Mai zu differenzieren, das Datum, an dem auch die Varianten in ihrer Krankheitsausprägung differenzierten. An den letzten vier Meßtagen fluoreszierte die Variante Opera vor allem bei höheren Einstrahlungsstärken tagsüber ein wenig stärker als die unbehandelte Variante (Abb. 59), was sich in den höheren Chlorophyll- und N-Werten (Abb. 51) der Variante Opera gegenüber der unbehandelten Variante vor allem am letzten Meß- und Entnahmetag widerspiegelte.

CF und PHS waren zu 33 % miteinander korreliert (s. Anhang). Zu einigen wenigen Zeitpunkten zeigte sich das Bild einer hohen CF bei gleichzeitig geringerer PHS zwischen den Varianten, so z. B. am 10. Juni um 12:15 Uhr, als die Variante Opera eine um 1,6 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ geringere PHS und eine um 0,01 Einheiten höhere CF als die unbehandelte Variante Opera hatte. Zu diesem Zeitpunkt hatte auch die unbehandelte Variante eine geringere Blatttemperatur als die Variante Opera.

Die Tagesgänge der FQA (Fluoreszenzquantenausbeute) zeigten sich an den ersten beiden Meßtagen weniger regelmäßig, dafür waren sie aber an den letzten drei Meßtagen mehr oder weniger u-förmig ausgebildet (Abb. 60). Am 22. Mai 2003 waren die Unterschiede zwischen den Varianten punktuell extrem ausgeprägt, es waren aber keine klaren Tendenzen zwischen den Varianten erkennbar. An den letzten vier Meßtagen hatte die unbehandelte Variante tagsüber tendenziell eine geringere FQA als die Variante Opera.

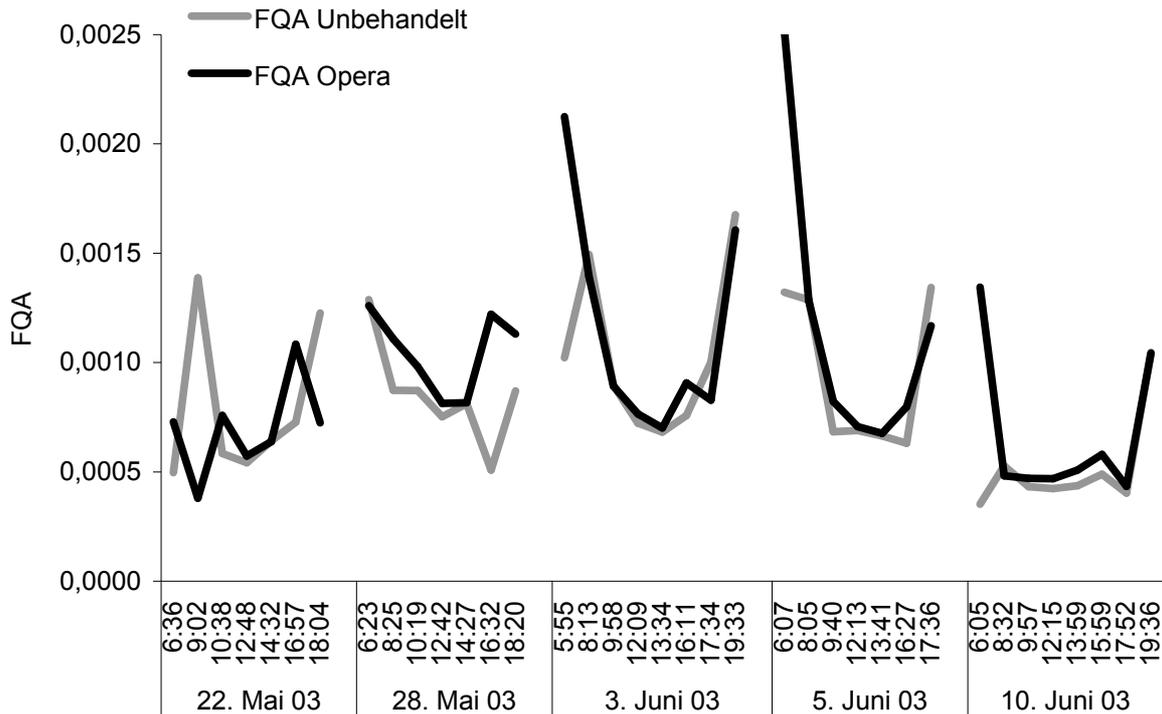


Abbildung 60. Tagesgänge der Fluoreszenzquantenausbeute (FQA = CF pro $\mu\text{mol Lichtquanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$) der Varianten Opera und Unbehandelt an den fünf Meßtagen in der Wintergerste 'Duet'

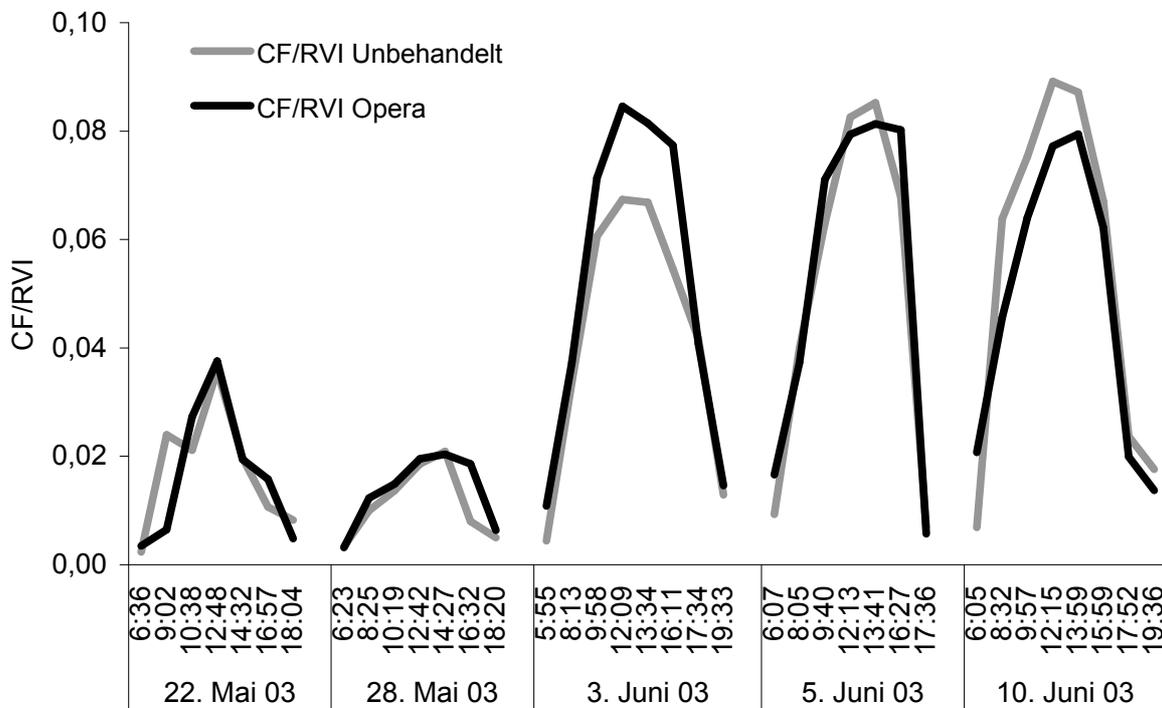


Abbildung 61. Tagesgänge von CF/RVI der Varianten Opera und Unbehandelt an den fünf Meßtagen in der Wintergerste 'Duet'

Das Tagesgangniveau von CF/RVI war an den ersten beiden Meßtagen weitaus geringer als an den letzten drei Meßtagen (Abb. 61). An den ersten beiden Meßtagen unterschieden sich die Varianten bezüglich CF/RVI nicht signifikant (Abb. 61). Am 3. Juni 2003 fluoreszierte eine Biomasseeinheit der unbehandelten Variante mit 0,067 Einheiten (12:09 Uhr) deutlich weniger als eine Biomasseeinheit der Variante Opera mit 0,085 Einheiten. An den letzten beiden Meßtagen aber kehrte sich dieses Verhältnis um, so fluoreszierte die unbehandelte Variante mit 0,089 Einheiten (10. Juni 2003, 12:15 Uhr) auf Biomassenniveau mehr als die Variante Opera mit 0,077 Einheiten.

Obwohl die Tagesgänge von CF/GNDVI generell denen der CF glichen, zeigten sich bei CF/GNDVI an allen fünf Meßtagen vor allen bei höheren Einstrahlungsstärken Unterschiede zwischen den Varianten. Meist hatte dann die unbehandelte Variante geringere Werte als Variante Opera aufzuweisen (Abb. 62), d.h. daß die unbehandelte Variante, bezogen auf den Gesamtchlorophyllgehalt, vor allem an den letzten vier Meßtagen schwächer als die Variante Opera fluoreszierte.

Beim PRI waren Tage mit höheren Einstrahlungsstärken durch ein höheres Niveau der eher inhomogenen Tagesgänge gekennzeichnet (Abb. 63): Der PRI war zu 23,9 % mit $PAR_{\text{außen}}$, zu 9,7 % mit der Lufttemperatur und nur zu 6,4 % mit der PHS korreliert (s. Anhang). Der PRI hatte allein am 22. Mai einen Tagesverlauf wie die PAR, an den anderen Tagen war der Verlauf von Amplituden gekennzeichnet. Die Varianten unterschieden sich in Bezug auf den PRI an den ersten vier Meßtagen nicht signifikant voneinander. Tendenziell waren die Werte der unbehandelten Variante höher als bei der Variante Opera, vor allem an den letzten drei Meßtagen. Die Varianten differenzierten erst am letzten Meßtag (10. Juni) eindeutig, wobei die unbehandelte Variante um durchschnittlich 0,006 Einheiten höhere PRI-Werte hatte als Variante Opera.

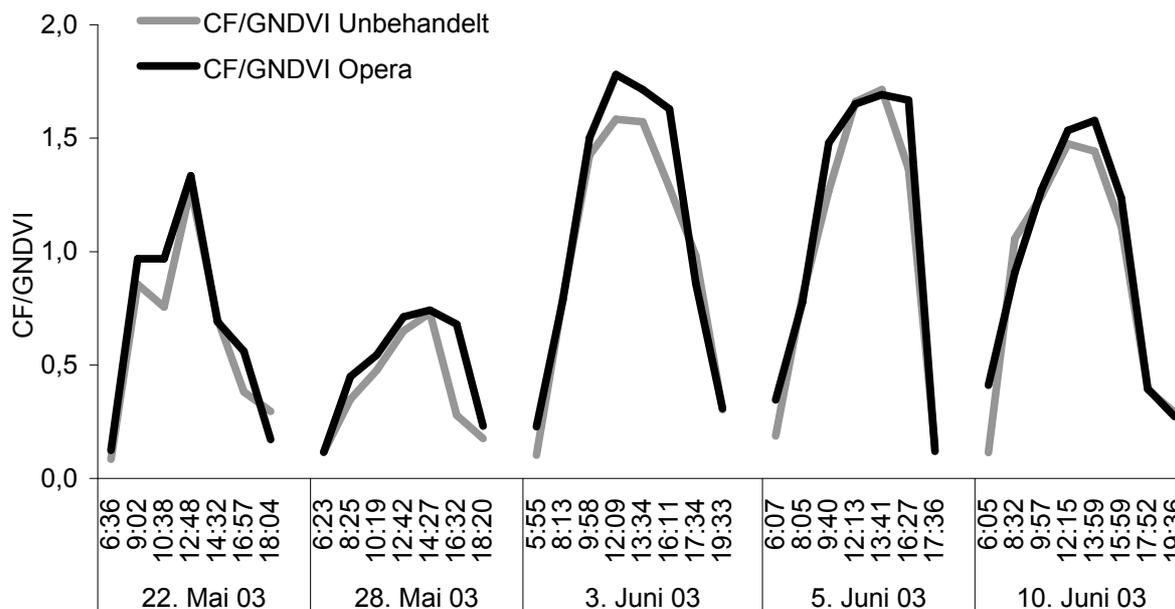


Abbildung 62. Tagesgänge von CF/GNDVI der Varianten Opera und Unbehandelt an den fünf Meßtagen in der Wintergerste 'Duet'

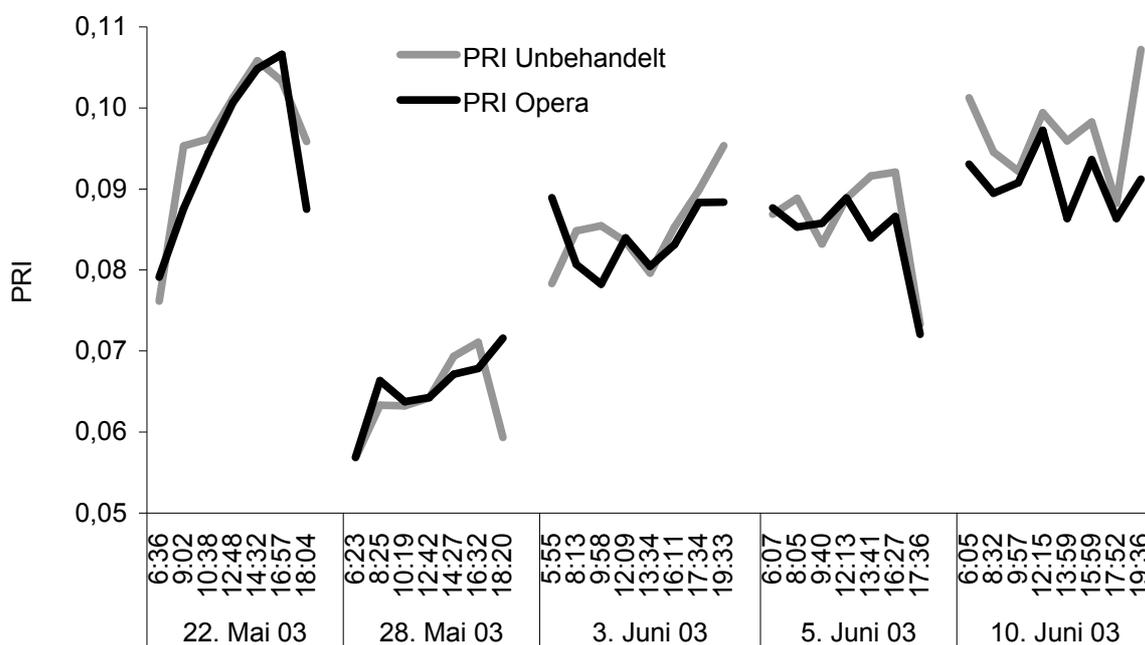


Abbildung 63. Tagesgänge des PRI der Varianten Opera und Unbehandelt in der Wintergerste 'Duet'

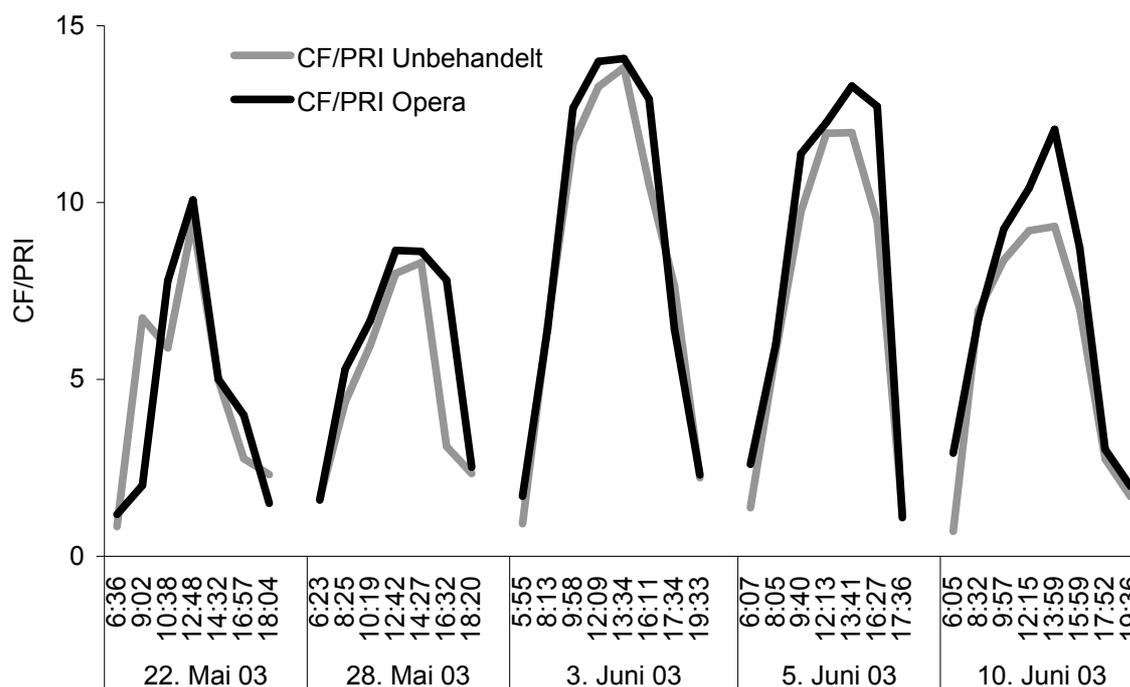


Abbildung 64. Tagesgänge von CF/PRI der Varianten Opera und Unbehandelt an den fünf Meßtagen in der Wintergerste 'Duet'

CF/PRI dagegen zeigte ausgeprägt hügelartige Tagesgänge, v.a. durch die Tagesgänge der CF bewirkt (Abb. 64). Die Mittagswerte von CF/PRI der unbehandelten Variante fielen an den letzten vier Meßtagen geringer aus als die Werte der Variante Opera. Die unbehandelte Variante fluoreszierte, bezogen auf die Aktivität des Xanthophyllzyklus, weniger als die Variante Opera, obwohl, wie weiter oben gezeigt werden konnte, der PRI bei der unbehandelten Variante höher lag als bei der Variante Opera, also demnach einen aktiveren Xanthophyllzyklus hatte als diese.

In diesem Versuch konnten geringfügige Unterschiede zwischen den Varianten Unbehandelt und Opera erst nach dem Auftreten der Krankheitssymptome (22. Mai 2003) in den Daten von Spektrometer und Photosynthesemeßgerät gemessen werden. Im Vergleich dazu ergaben sich bei den Stickstoffsteigerungsversuchen aufgrund der größeren Unterschiede der Chlorophyll- und N-Gehalte und deren Auswirkungen auf Wuchs, BFI usw. auch dramatischere Differenzierungen der Vegetationsindizes und der PHS zwischen den Varianten. Eine Abweichung oder Kombination der gemessenen Merkmale, die speziell auf den

Streßfaktor Krankheitsdruck verweisen würden, z.B. höhere Werte der RG-Ratio bei der unbehandelten Variante, konnte nicht realisiert werden.

Bei der Variante Opera konnte ein signifikant höherer Chlorophyllgehalt zumindest in der Etage F-1 an den letzten drei Entnahmetermi- nen festgestellt werden. Mit hoher Wahrscheinlichkeit handelte es sich bei diesem Phänomen um den sogenannten „Greening“-Effekt. Die deutlichsten, von den Spektrometerdaten abgeleiteten Unterschiede zwischen den Varianten zeigten sich in diesem Versuch bei dem Quotienten CF/PRI, vor allem schon am 28. Mai 2003, tendenziell sogar schon an den Mittagswerten des 22. Mai 2003.

3.4.2 *Hordeum vulgare* L. ‘Duet’ im Timingversuch

Die Wintergerstensorte ‘Duet’ wurde in drei unterschiedlich behandelten Varianten (unbehandelten Kontrolle sowie zwei behandelte Varianten) in Dürnast bei Freising im kombinierten Fungizidvergleichs- und Timingversuch zur gezielten Bekämpfung des Blattfleckenkomplexes angebaut. Der Erreger von *Ramularia colo-cygni* konnte bereits vor Meßbeginn (26. Mai 2004) durch PCR durch den Lehrstuhl für Phytopathologie (Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Technische Universität München) nachgewiesen werden, jedoch traten erste Symptome erst am 24. Juni 2004 auf (s. auch Material und Methoden). Da die Symptome des Pilzbefalls von den oberen, exponierten Blattetagen ausgingen, wurde Lichtstreß als eine der Ursachen angesehen (HESS, 2005, nicht rezensierte Literatur). Die parallel zur klassischen Methode durchgeführten PCR-Untersuchungen zeigten aber, daß der pilzliche Erreger *Ramularia colo-cygni* bereits vor dem Auftreten der Blattflecken vorhanden war.

Bei den eingesetzten Fungiziden handelte es sich neben den bei allen Varianten durchgeführten Grundbehandlungen zum Ausschluß zusätzlicher, durch weitere Erreger hervorgerufenen Symptome um chlorothalonile- (Variante C) und um prothioconazolehaltige Fungizide (Variante P), deren gezielter Einsatz eine Wirkung auf den Blattfleckenkomplex hatte (HESS, 2005, nicht rezensierte Literatur). Im Folgenden wird immer zuerst auf die Unterschiede zwischen den Varianten eingegangen. Dann werden die Auswirkungen der verschiedenen Applikationstermine im Timingversuch erläutert:

Diese Fungizide wirkten sich unter anderem auf den Chlorophyllgehalt aus. Der Chlorophyllgehalt nahm vegetationsbedingt zwischen den wöchentlichen Entnahmeterminen ab (Tab. 11). Grundsätzlich hatte der Einsatz der Fungizide eine Erhöhung der Chlorophyllgehalte zur Folge, wobei zuerst Variante C wohl auch aufgrund der Strobilurine den höchsten Chlorophyllgehalt (durchschnittlich $2,28 \text{ mg g}^{-1} \text{ FS}^{-1}$) hatte. Bereits am 1. und 8. Juni unterschieden sich Variante C und P nicht mehr sehr voneinander. Offenbar ist bei der strobilurinhalten Variante C nur Anfangs ein sogenannter „Greening“-Effekt eingetreten. Die unbehandelte Kontrolle enthielt am 8. Juni um ca. $0,3 \text{ mg Chlorophyll g}^{-1} \text{ FS}^{-1}$ weniger als die behandelten Varianten.

Tabelle 11. Chlorophyllgehalte ($\text{mg g}^{-1} \text{ FS}^{-1}$) abhängig von den Applikationsterminen der einzelnen Fungizide in der Wintergerste 'Duet' (Freundliche Überlassung des Datenmaterials durch M. Hess, Lehrstuhl für Phytopathologie, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Technische Universität München)

Maßnahme	Applikations-termin	Entnahmetermin			Durchschnitte		
		26. Mai	1. Jun	8. Jun	26. Mai	1. Jun	8. Jun
Kontrolle	-	2,03	1,28	0,93	2,03	1,28	0,93
Variante C	4. Mai 04	2,36	1,47	1,37			
	19. Mai 04	2,05	1,44	1,08			
	26. Mai 04	1,74	1,50	1,20	2,28	1,47	1,22
Variante P	4. Mai 04	2,77	1,24	1,16			
	19. Mai 04	2,14	1,60	1,31			
	26. Mai 04	1,50	1,48	1,24	2,14	1,44	1,23

Ein früher Applikationstermin im Rahmen des Timingversuchs erbrachte bei Variante C eine deutliche Erhöhung des Chlorophyllgehalts auf $2,36 \text{ mg Chl a g}^{-1} \text{ FS}^{-1}$ (Tab. 11). Bei den späteren Applikationsterminen war dieser deutlich verringert, was sich aber nur an den ersten beiden Entnahmeterminen zeigte. Am letzten Entnahmetag war der Chlorophyllgehalt des 2. Applikationstermins der niedrigste, der Chlorophyllgehalt des 1. Applikationstermins der höchste. Variante P wies mit $2,77 \text{ mg Chl a g}^{-1} \text{ FS}^{-1}$ (erster Applikations- und Entnahmetermin) den höchsten Chlorophyllgehalt auf. Die Differenz zu einem Chlorophyllgehalt von $1,16 \text{ mg Chl a g}^{-1} \text{ FS}^{-1}$ (erster Applikations- und dritter Entnahmetermin) war dafür umso größer. Bei Variante P hatte der mittlere Applikationstermin an den beiden letzten Entnahmeterminen die positivste Wirkung auf den Chlorophyllgehalt.

Die Behandlungen wirkten sich eindeutig positiv auf den Ertrag sowie auf das Tausendkorngewicht (TKG) aus (Tab. 12). Die Kontrolle erbrachte einen Ertrag von

durchschnittlich 79,64 dt ha⁻¹, Variante C von 82,14 dt ha⁻¹ und Variante P von 83,83 dt ha⁻¹. Obwohl die Unterschiede zwischen den Behandlungen sehr gering waren, waren sie dennoch für das Versuchsziel ausschlaggebend.

Im Timingversuch war bei Variante C der späteste Applikationstermin (26. Mai 2004) vorteilhaft, sowohl in Bezug auf den Ertrag (83,11 dt ha⁻¹) als auch auf das TKG (43,95). Bei Variante P wirkte sich der mittlere Applikationstermin (9. Mai 2004) negativ auf den Ertrag (81,47 dt ha⁻¹) aus, während der letzte Applikationstermin (26. Mai 2004) das TKG (44,08 kg) steigerte. Somit war der letzte und damit dem Erkrankungsereignis am nächsten gelegene Applikationstermin der dem Ertrag am meisten förderliche.

Tabelle 12. Erntedaten der Wintergerste 'Duet' (Freundliche Überlassung des Datenmaterials durch M. Hess, Lehrstuhl für Phytopathologie, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Technische Universität München)

Maßnahme	Applikations-termin	dt ha ⁻¹	TKG	Durchschnitte	
				dt ha ⁻¹	TKG
Kontrolle	-	79,42	41,9	79,42	41,9
Variante C	4. Mai 04	80,52	42,1		
	19. Mai 04	82,78	42,98		
	26. Mai 04	83,11	43,95	82,14	43,01
Variante P	4. Mai 04	85,53	43,58		
	19. Mai 04	81,47	43,83		
	26. Mai 04	84,50	44,08	83,83	43,83

Die unterschiedlichen Behandlungen zu verschiedenen Zeitpunkten schlugen sich wie folgt auf die Spektrometerdaten nieder:

Der REIP (Abb. 65) schwankte zwischen 723,2 (Variante C, erster und zweiter Applikationstermin, gemessen am 17. Juni) und 730,4 (Variante C, erster Applikationstermin, gemessen am 1. Juni). Er nahm im Laufe der Meßperiode reifebedingt ab. Die Werte der Kontrolle waren um durchschnittlich 1,5 Einheiten geringer als die der behandelten Varianten. Die Unterschiede zwischen Variante C und P aber waren sehr gering, wobei Variante P vor allem am letzten Meßtag leicht höhere REIP-Werte hatte als Variante C.

Auch im Timingversuch waren die Unterschiede bezüglich des REIP sehr gering. Bei Variante C wirkte sich der Applikationstermin nur zu den ersten beiden Meßzeitpunkten (26. Mai und 1. Juni) positiv auf den REIP aus, zu den letzten beiden Meßterminen hatten die verschiedenen Applikationstermine keine Auswirkungen

mehr auf den REIP. Bei Variante P hatte der erste Applikationstermin die positivste Wirkung auf den REIP.

Die Werte des GNDVI (Abb. 66) zeigten eine vegetationsbedingte Abnahme, wobei die Kontrolle um 0,02 Einheiten niedrigere Werte als die behandelten Varianten aufwies. Zwischen Variante C und P waren keine signifikanten Unterschiede festzustellen, wobei sicherlich der 1. Applikationstermin (4. Mai) bei den Varianten den positivsten Effekt auf die GNDVI-Werte hatte. Chlorophyllgehalt und die Werte des GNDVI korrelierten zu 50 % miteinander (s. Anhang).

Bereits beim 2. Meßtermin verminderte sich der GNDVI des 3. Applikationstermins bei beiden Varianten deutlich, während der GNDVI der ersten beiden Applikationstermine bei beiden Varianten zwischen erstem und zweitem Meßtermin gleich blieb (Abb. 66). Bei Variante C war nichtsdestotrotz der 1. sowie der 2. Applikationstermin (4. und 19. Mai) der erfolgreichste, bei Variante P war es nur der 1. Applikationstermin. Der 2. Applikationstermin zeichnete sich bei Variante P durch niedrigere GNDVI-Werte aus.

Auch der RVI (Abb. 67) nahm im Laufe der Meßperiode vor allem an den letzten beiden Meßtagen bedeutend von durchschnittlich 35,9 auf 11,4 ab. Dabei hatte wiederum die unbehandelte Kontrolle um durchschnittlich 3,04 Einheiten niedrigere Werte als die Varianten C und P, welche sich nur unbedeutend unterschieden. Auch hier war wieder der 1. Applikationstermin derjenige mit der positivsten Auswirkung auf den RVI. Die RVI-Werte der Varianten unterschieden sich bezüglich des Applikationstermins, wo zumindest Variante P zu den ersten beiden Meßterminen (26. Mai und 1. Juni) höhere RVI-Werte aufwies.

Bei der RG-Ratio (Abb. 68) zeigte sich ein ähnliches Bild, wobei wiederum die unbehandelte Kontrolle den behandelten Varianten um 0,1 Einheiten unterlag. Bei der Kontrolle und bei Variante P war vom 1. zum 2. Meßtermin (26. Mai und 1. Juni) eine leichte Zunahme um 0,12 Einheiten zu verzeichnen. Bei Variante C zeigte sich in diesem Zeitraum eine Abnahme um durchschnittlich 0,04 Einheiten, was eine verminderte Wirkung des chlorothalonilehaltigen Mittels auf den Anthocyanengehalt zumindest in der Phase vor der vegetationsbedingten Abreife vermuten ließ.

Die unterschiedlichen Applikationstermine hatten nur geringe Effekte auf die RG-Ratio: Bei Variante C war es an den ersten drei Meßterminen der

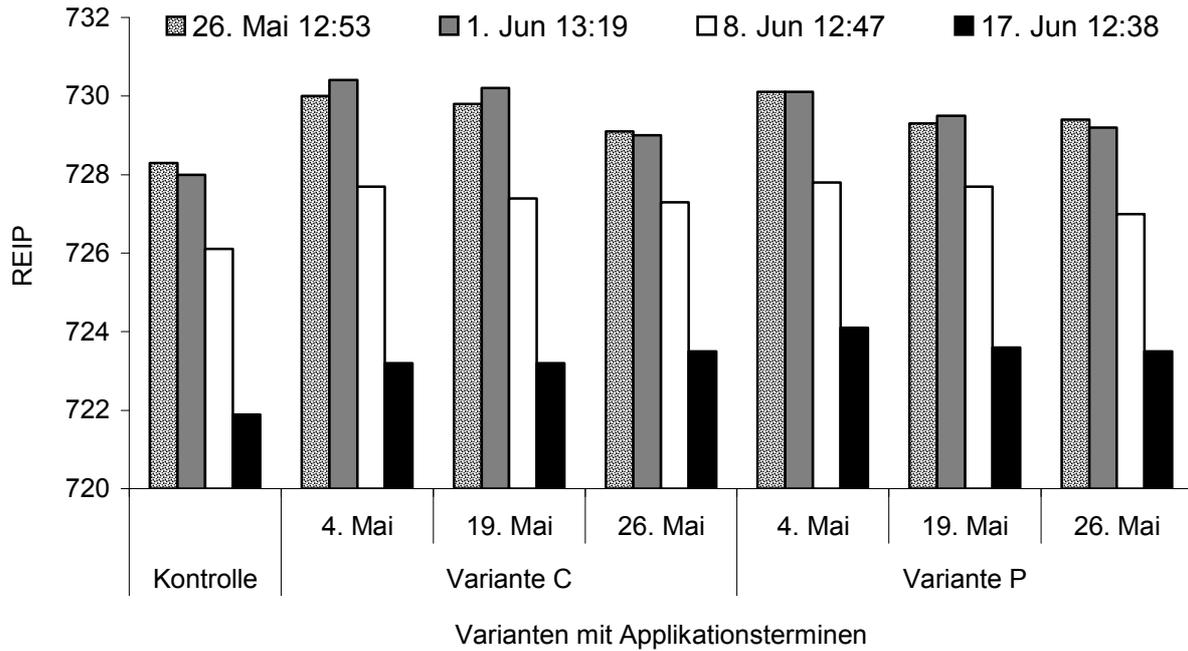


Abbildung 65. Mittagswerte des REIP in der Wintergerste 'Duet' zu den verschiedenen Meßzeitpunkten

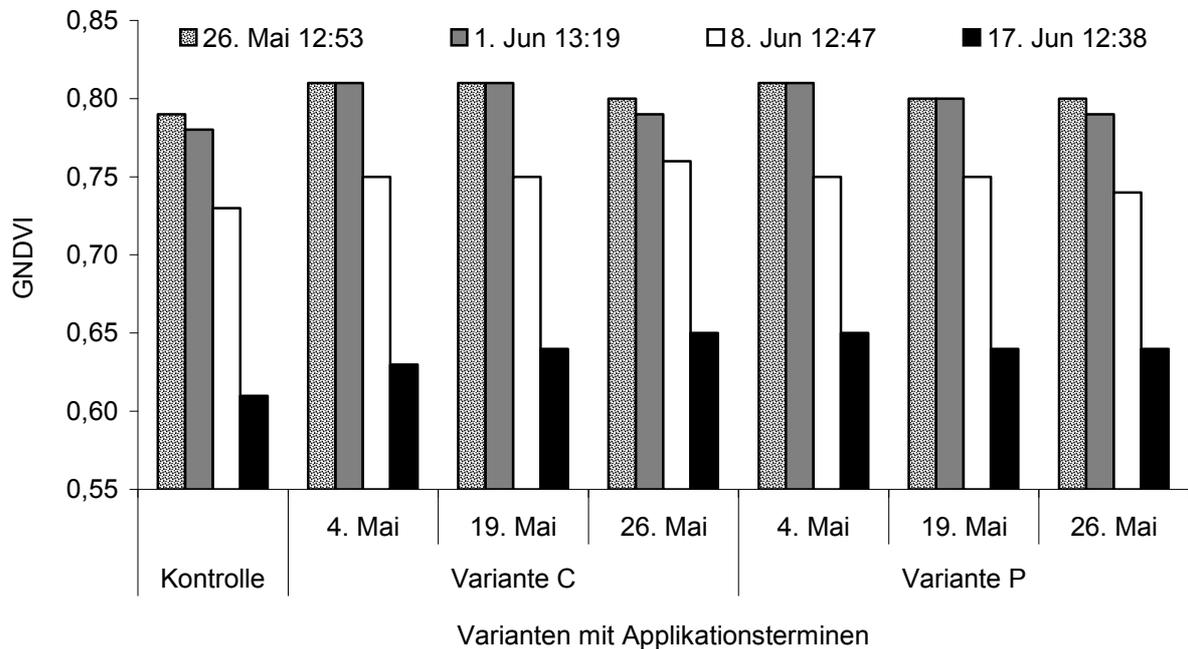


Abbildung 66. Mittagswerte des GNDVI in der Wintergerste 'Duet' zu den verschiedenen Meßzeitpunkten

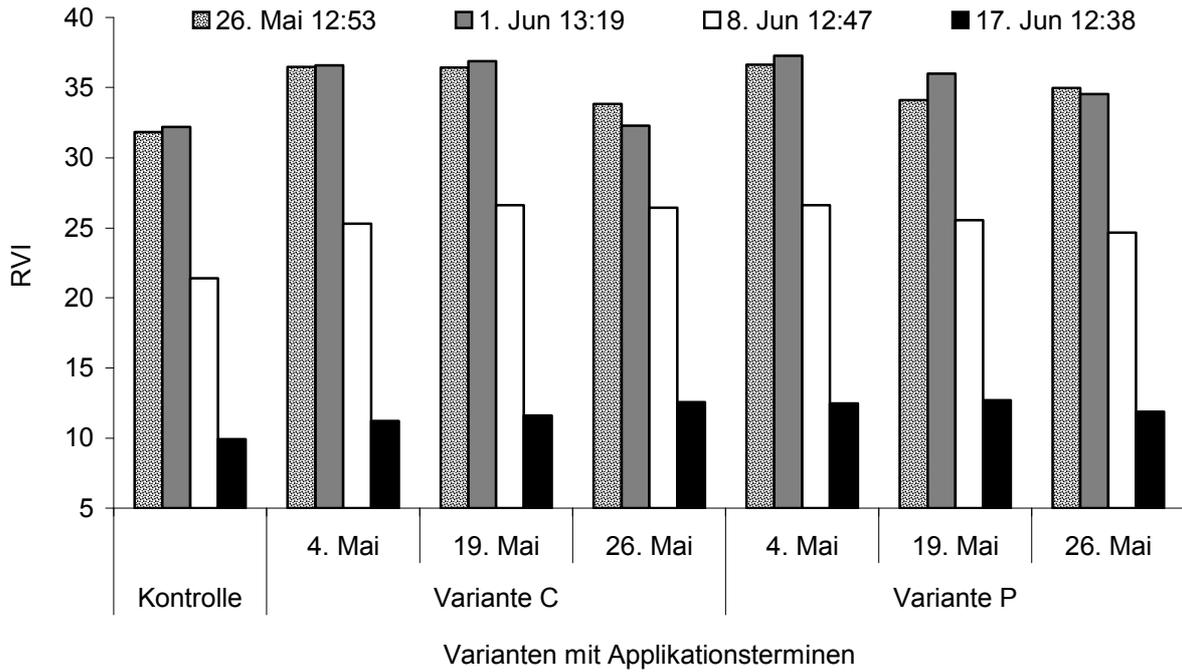


Abbildung 67. Mittagswerte des RVI in der Wintergerste 'Duet' zu den verschiedenen Meßzeitpunkten

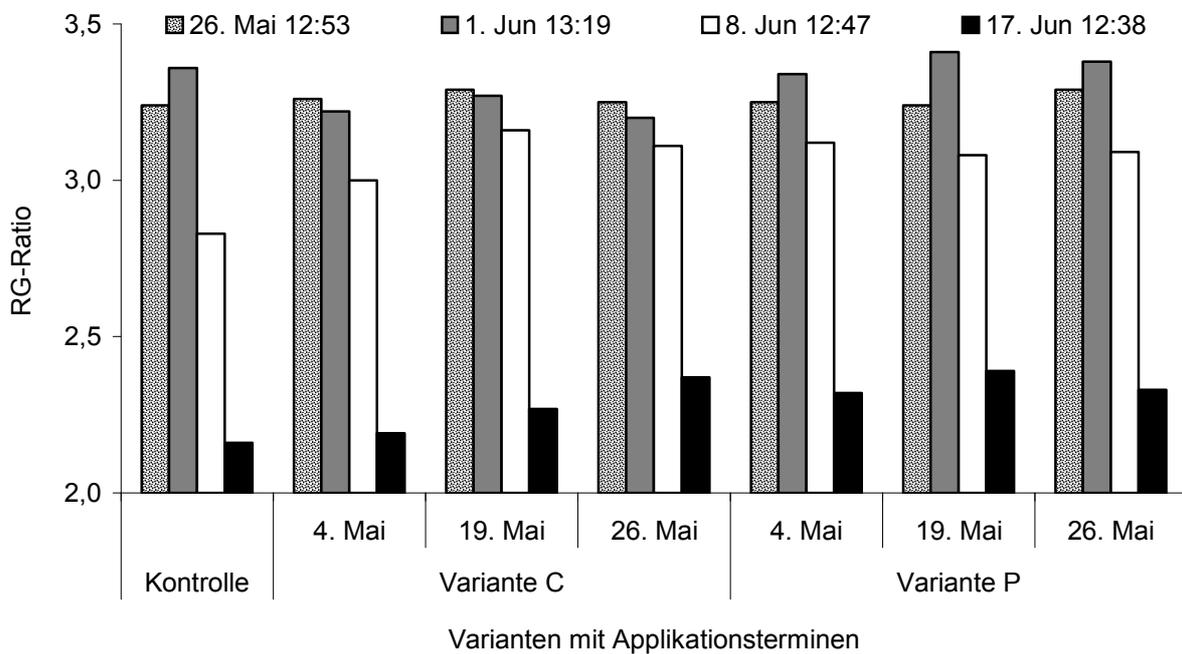


Abbildung 68. Mittagswerte der RG-Ratio in der Wintergerste 'Duet' zu den verschiedenen Meßzeitpunkten

2. Applikationstermin, zum letzten Meßtermin (17. Juni) definitiv der
3. Applikationstermin (26. Mai). Bei Variante P hatte der 2. Applikationstermin
(19. Mai) den positivsten Effekt.

Es wurden vier ganze Tagesgänge zwischen dem 26. Mai und dem 17. Juni 2004 (EC 61 bis 77) in einem Zeitraum vor und während der Erkrankung mit dem Spektrometer aufgenommen. Alle vier Meßtage zeichneten sich durch hohe mittägliche Einstrahlungsspitzen aus (Abb. 69). Während die letzten drei Meßtage sehr heiße Sommertage mit einem ähnlichen Temperaturverlauf wie der der Globalstrahlung waren, war der erste Meßttag ein eher kühler Tag mit einem kontinuierlichen Anstieg der Lufttemperatur von 12,6 auf 16,4 °C.

Die Tagesgänge der CF (Abb. 70 bis 72) waren mit denen der Globalstrahlung korreliert: So hatte z.B. die CF der Kontrolle eine Korrelation von 64 % mit der Globalstrahlung (s. Anhang). Zwischen dem ersten und dem letzten Meßttag nahm das Niveau der Tagesgänge der CF bei relativ gleichbleibendem Tagesgangniveau der Globalstrahlung (Abb. 69) ab, parallel zur vegetationsbedingten Abnahme von Chlorophyllgehalt und Biomasse (Abb. 70). Die unbehandelte Kontrolle und die behandelten Varianten differenzierten am 26. Mai und 1. Juni 2004 (mit Ausnahme der Mittagsmessung am 26. Mai um 12:53 Uhr) nur geringfügig. Am 8. und 17. Juni aber traten deutliche Unterschiede zwischen den Behandlungen vor allem tagsüber zutage (Abb. 70 bis 72), wobei Variante P deutlich höhere CF-Werte hatte als Variante C und diese wiederum höhere CF-Werte aufwies als die Kontrolle.

Die Kontrolle fluoreszierte an den letzten beiden Tagen im Vergleich zu den behandelten Varianten am schwächsten (Abb. 70, 71 und 72), wahrscheinlich hauptsächlich aufgrund des geringeren Chlorophyllgehalts. Variante C und P unterschieden sich bereits am 1. und 8. Juni nicht mehr signifikant bezüglich ihres Chlorophyllgehalts (Tab. 11). Nichtsdestotrotz fluoreszierte Variante P an den letzten beiden Meßttagen mittags weitaus stärker als Variante C. So betragen die CF-Werte z.B. am 8. Juni 2004 um 12:47 Uhr bei der Kontrolle 0,88 Einheiten, bei Variante C 1,03 und bei Variante P 1,1 Einheiten. Am 26. Mai 2004 waren die Differenzen im Chlorophyllgehalt zwischen den Varianten noch bedeutsamer, unter Berücksichtigung der Applikationstermine (Tab. 11). Zu diesem Zeitpunkt aber zeigten sich keinerlei Unterschiede in der CF, bis auf die Einstrahlungsspitze um 12:53 Uhr, bei der die Varianten differenzierten (Abb. 71 und 72).

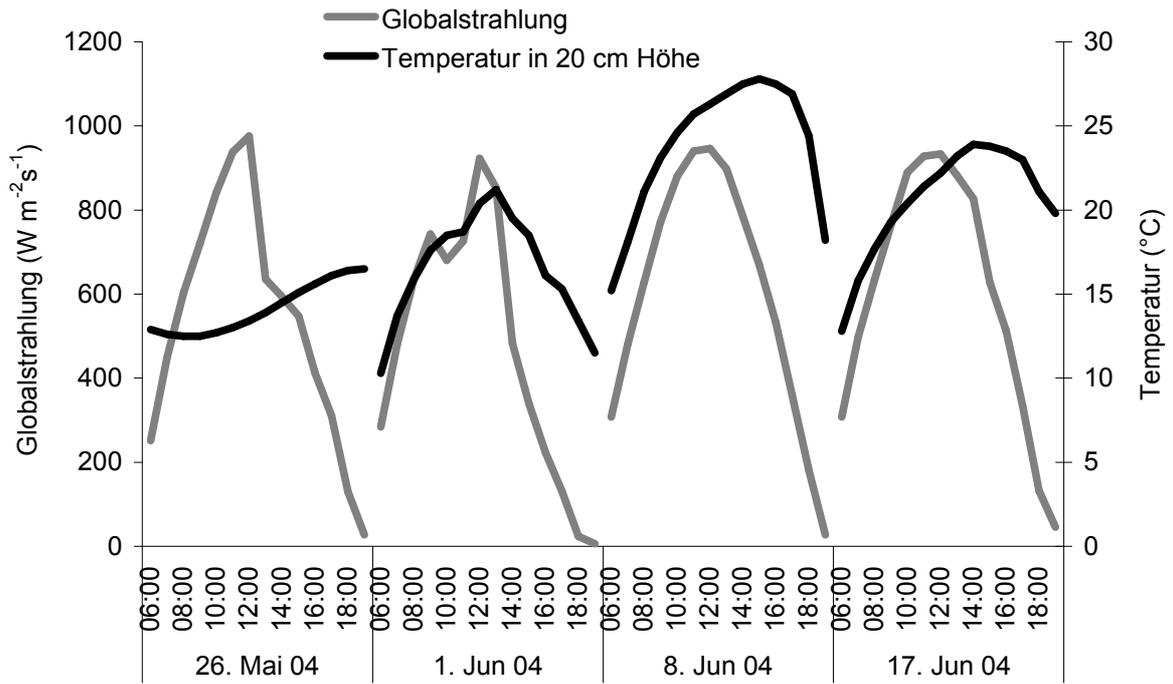


Abbildung 69. Stundendaten der Wetterstation Nr. 8 in Freising von Lufttemperatur und Globalstrahlung an den vier Meßtagen

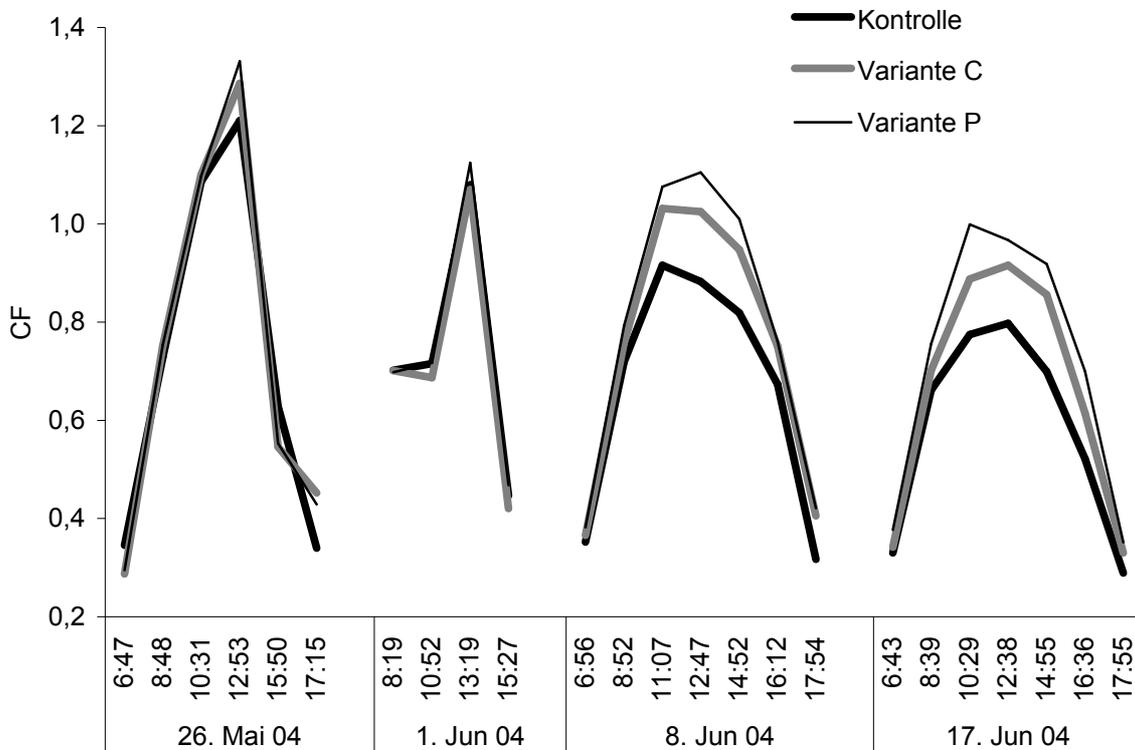


Abbildung 70. Tagesgänge der sonnenlicht-induzierten Chlorophyll-Fluoreszenz an den vier Meßtagen in der Wintergerste 'Duet'

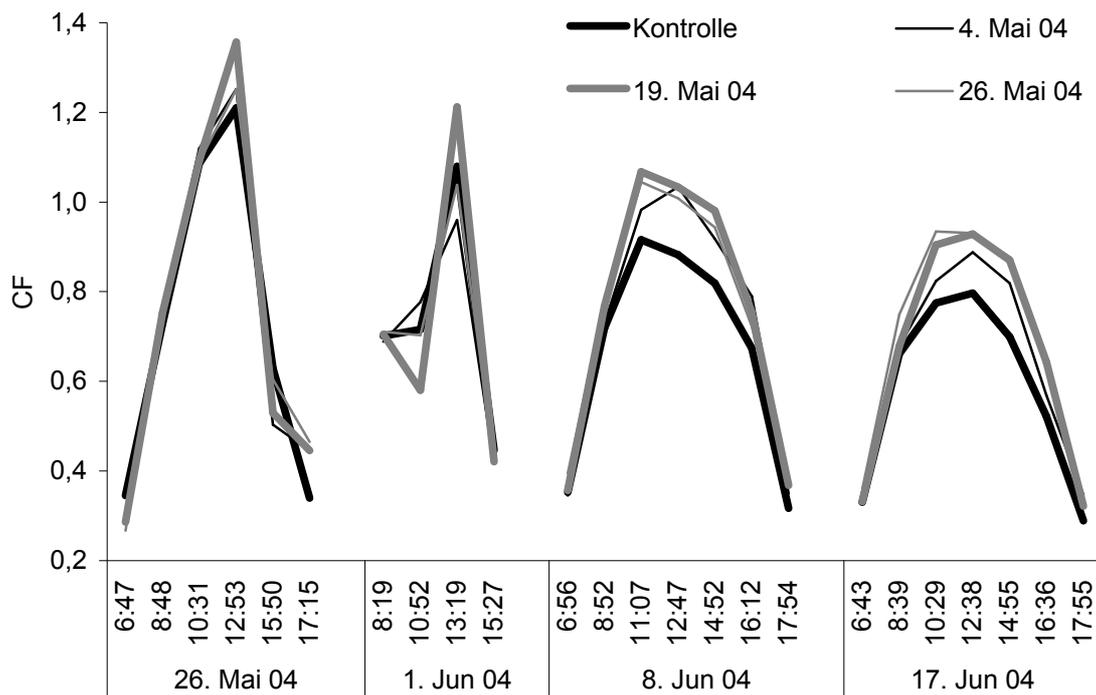


Abbildung 71. Tagesgänge der sonnenlicht-induzierten Chlorophyll-Fluoreszenz der Variante C im Timingversuch an den vier Meßtagen (Wintergerste 'Duet')

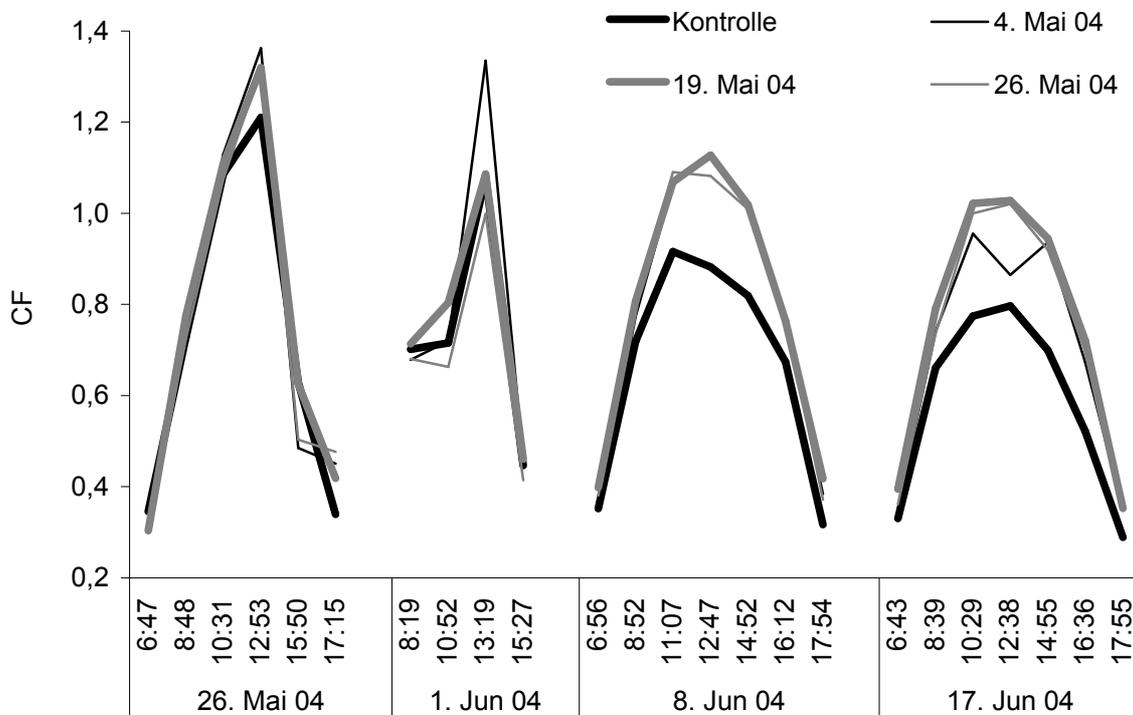


Abbildung 72. Tagesgänge der sonnenlicht-induzierten Chlorophyll-Fluoreszenz der Variante P im Timingversuch an den vier Meßtagen (Wintergerste 'Duet')

Die einzelnen Behandlungen differenzierten bezüglich der CF nur geringfügig zwischen den Applikationsterminen, wobei Variante C (Abb. 71) stringenter Unterschiede als Variante P (Abb. 72) vor allem tagsüber an den letzten beiden Meßtagen hatte. Bei Variante C zeigte sich, daß je näher der Applikationstermin an dem Erkrankungszeitpunkt lag, desto stärker war die CF v.a. am 17. Juni ausgeprägt (Abb. 71). Trotzdem die Unterschiede zwischen den Mittagswerten der CF am 8. und 17. Juni 2004 eher gering waren, ließ sich doch eine leicht höhere CF für die letzten beiden Applikationstermine feststellen, z.B. betrug die CF am 8. Juni um 11:07 Uhr für den ersten Applikationstermin 1,01, für die letzten beiden Applikationstermine 1,03 Einheiten.

Bei Variante P traten keine größeren Differenzierungen zwischen den Varianten im Timingversuch auf: Am 26. Mai, 8. und 17. Juni ergaben sich überhaupt keine oder nur geringfügige Unterschiede zwischen den verschiedenen Applikationsterminen (Abb. 72), siehe z.B. der niedrige Wert des ersten Applikationstermins von 0,865 am 17. Juni um 12:38 Uhr. Am 1. Juni um 13:19 Uhr hatte der erste Applikationstermin eine weitaus höhere CF als die anderen Varianten. Am 17. Juni um 12:38 Uhr dagegen zeichnete sich gerade dieser erste Applikationstermin durch ein auffallendes Minimum aus, während sich die beiden letzten Applikationstermine über den gesamten Meßzeitraum bezüglich der CF nicht signifikant unterschieden.

Die FQA (Abb. 73) nahm wie die Globalstrahlung am ersten Meßtag zu und dann wieder ab. An den letzten drei Meßtagen waren die Tagesgänge von einer tagsüber geringeren und morgens sowie abends extremeren Zunahme gekennzeichnet. Die Varianten differenzierten zunehmend vom ersten bis zum letzten Meßtag in Bezug auf die FQA (Abb. 73). Eine Einheitlichkeit eines Tagesverlaufs der FQA war nur an den letzten beiden Meßtagen zu erkennen, wobei Variante P stringent eine um $0,9^{-4}$ Einheiten pro $\mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ höhere FQA aufwies als Variante C und diese wiederum um $1,6^{-4}$ Einheiten pro $\mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ über der Kontrolle lag. Im Timingversuch zeigten sich bei den Varianten keine signifikanten Unterschiede (Variante P: Abb. 74; Variante C im Folgenden nicht mehr dargestellt) zwischen den Applikationsterminen, wohl aber zwischen Varianten und Kontrolle.

Das Niveau der Tagesgänge von CF/RVI nahm an den vier Meßtagen zu, vor allem am letzten Meßtag, hervorgerufen durch eine schwach fallende CF und

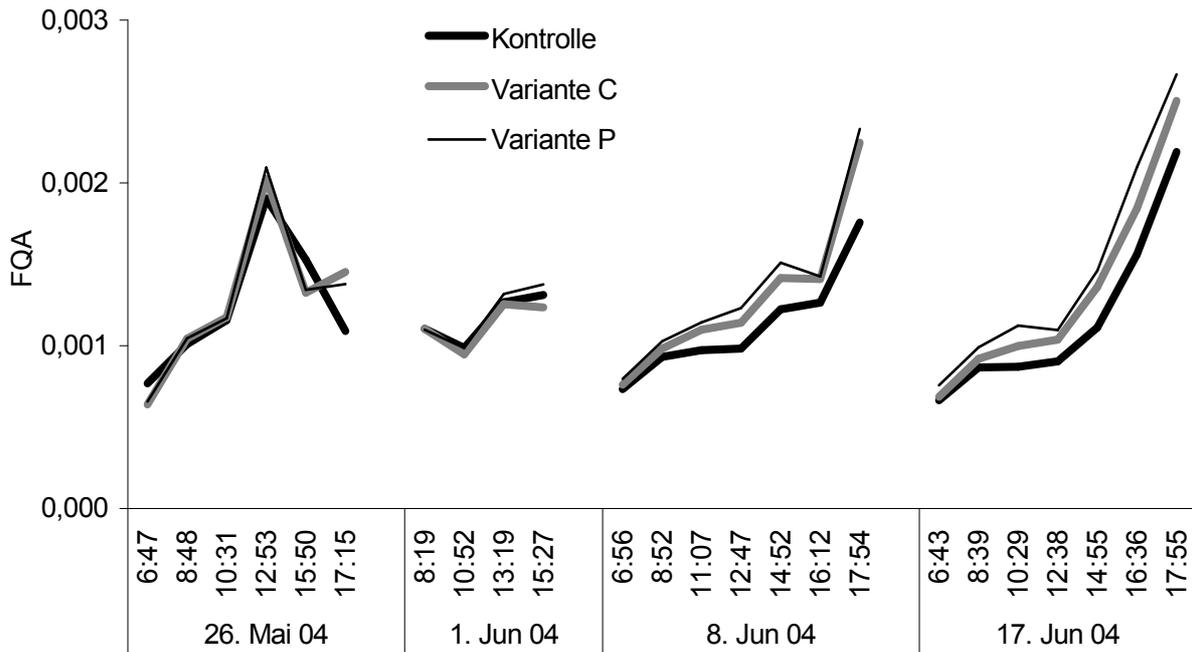


Abbildung 73. Tagesgänge der Fluoreszenzquantenausbeute (= CF pro $\mu\text{mol Lichtquanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$) an den vier Meßtagen in der Wintergerste 'Duet'

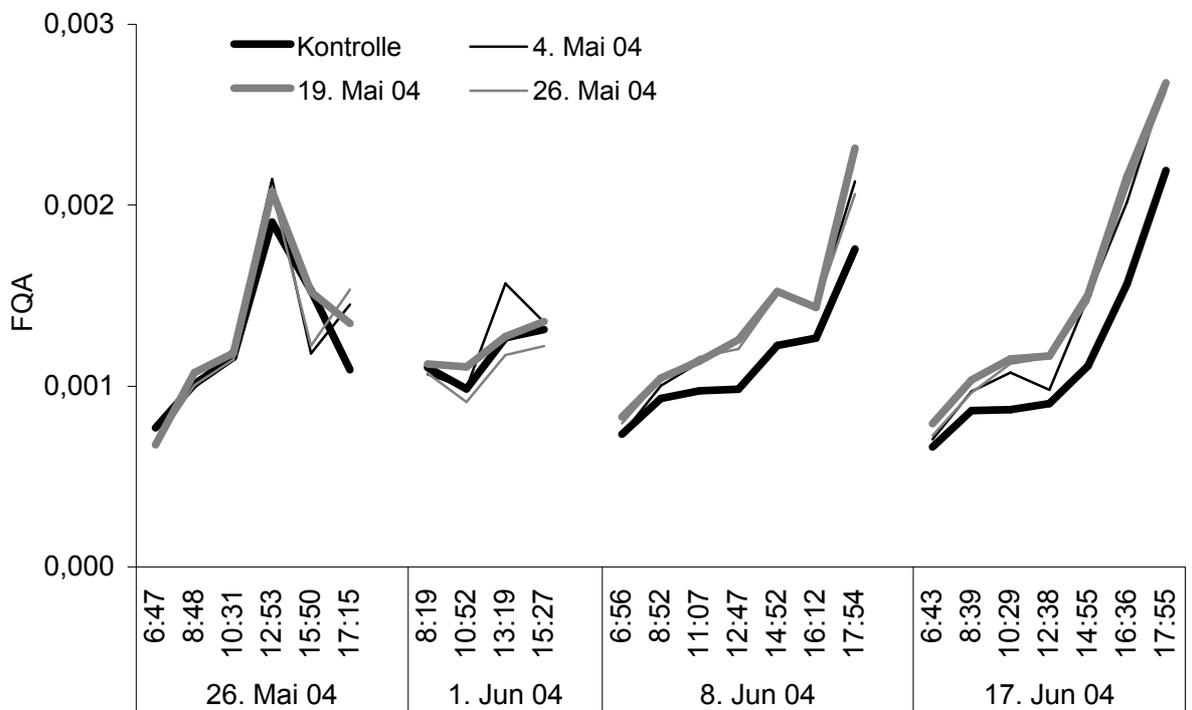


Abbildung 74. Tagesgänge der Fluoreszenzquantenausbeute (= CF pro $\mu\text{mol Lichtquanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$) der Variante P im Timingversuch an den vier Meßtagen (Wintergerste 'Duet')

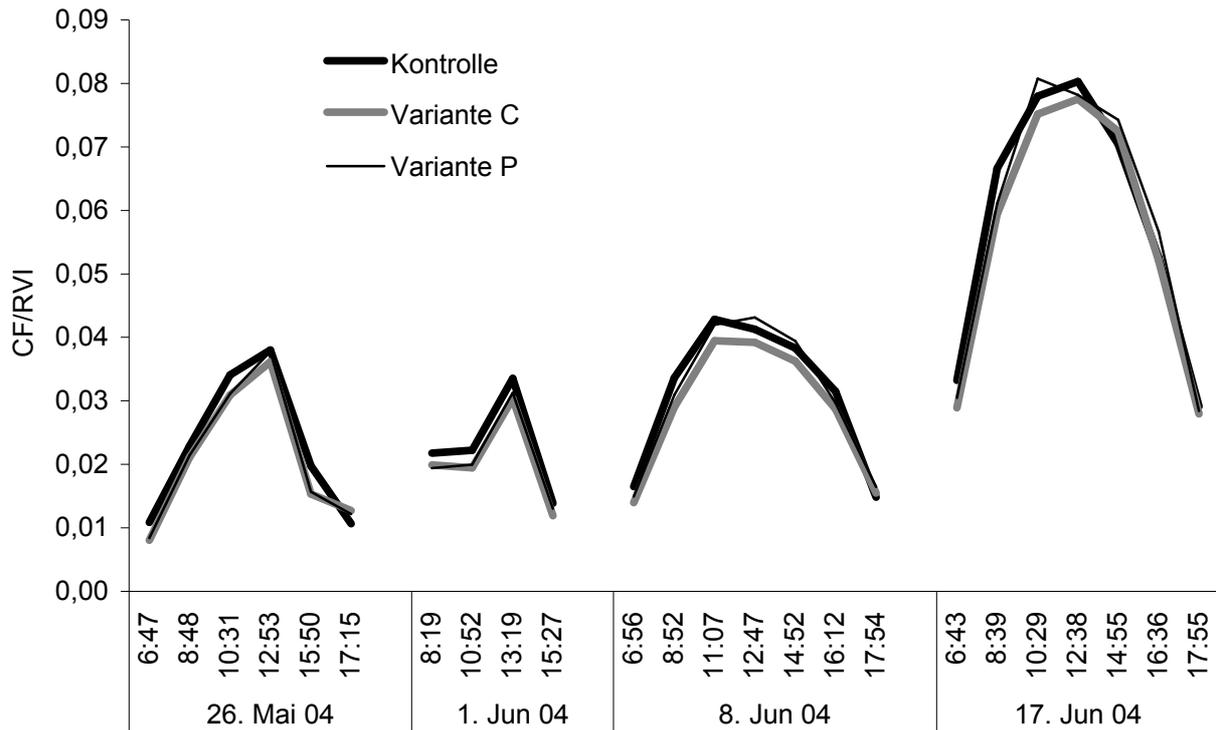


Abbildung 75. Tagesgänge von CF/RVI an den vier Meßtagen in der Wintergerste 'Duet'

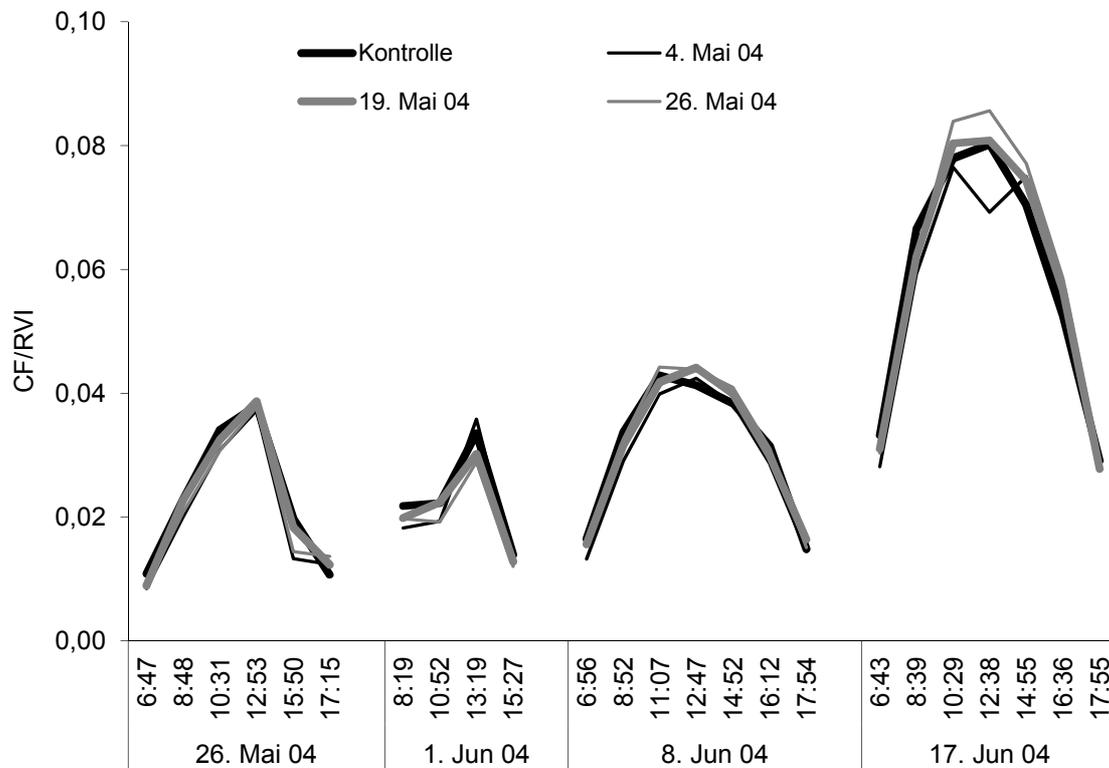


Abbildung 76. Tagesgänge von CF/RVI der Variante P im Timingversuch an den vier Meßtagen (Wintergerste 'Duet')

einen stark verringerten RVI (Abb. 75 und 76). Die Varianten unterschieden sich kaum, vor allem an den ersten beiden Meßtagen (Abb. 75). An den letzten beiden Meßtagen fluoreszierte Variante C bei höheren Einstrahlungsstärken etwas weniger als die Kontrolle und die Variante P, bezogen auf den RVI. Die beiden letztgenannten unterschieden sich kaum voneinander.

Im Timingversuch traten nur am letzten Meßtag Differenzierungen bezüglich des Quotienten CF/RVI auf (Abb. 76): Während Kontrolle und der mittlere Applikationstermin fast gleichläufig waren, hatte der letzte Applikationstermin bei höheren Einstrahlungsstärken überdurchschnittlich hohe CF/RVI -Werte. Auch hier setzte sich das Minimum des ersten Applikationstermins um 12:38 Uhr von der CF her fort.

Die Varianten differenzierten in Bezug auf den $CF/GNDVI$ an den letzten beiden Meßtagen tagsüber deutlich und stringent voneinander, vor allem an den letzten beiden Meßtagen (Abb. 77): Zum Beispiel hatte die Kontrolle am 17. Juni um 10:29 Uhr einen Wert von 1,27, Variante C von 1,39 und Variante C von 1,56. Im Timingversuch zeigte sich ebenfalls ein deutlicher Effekt auf das Tagesgangniveau von $CF/GNDVI$ vor allem bei Sonnenhochstand an den letzten beiden Meßtagen (Abb. 78: Variante P): Einen mittelstarken Effekt hatte die Applikation am 4. Mai, sichtbar vor allem am 17. Juni um 12:38 Uhr. Ein noch positiveres Ergebnis zeigten die Applikationstermine am 19. und 26. Mai, wobei zwischen beiden vor allem am letzten Meßtag kein Unterschied mehr zutage trat.

Wie bei den Versuchen zur Stickstoffdüngung waren auch hier die Tagesverläufe des PRI inhomogen: Der PRI verringerte sich tendenziell bis zum Mittag und nahm dann bis zum Abend wieder zu. Das Niveau der Tagesgänge nahm außerdem während der Meßperiode kontinuierlich zu (Abb. 79 und 80). Der PRI zeigte ansonsten keine herausragenden Korrelationen (s. Anhang). Wie zuvor bei den anderen Vegetationsindizes differenzierten die Varianten vom ersten bis zum letzten Meßtag immer mehr, wobei der PRI-Tagesgang der Kontrolle um 0,005 Einheiten über denen der Varianten C und P lag. Die Varianten C und P unterschieden sich bezüglich des PRI untereinander nicht stringent. An den letzten beiden Meßtagen hatte Variante P zumeist einen geringeren PRI als Variante C. Im Timingversuch (Abb. 80) unterschieden sich die Applikationstermine nicht signifikant, denn auch hier

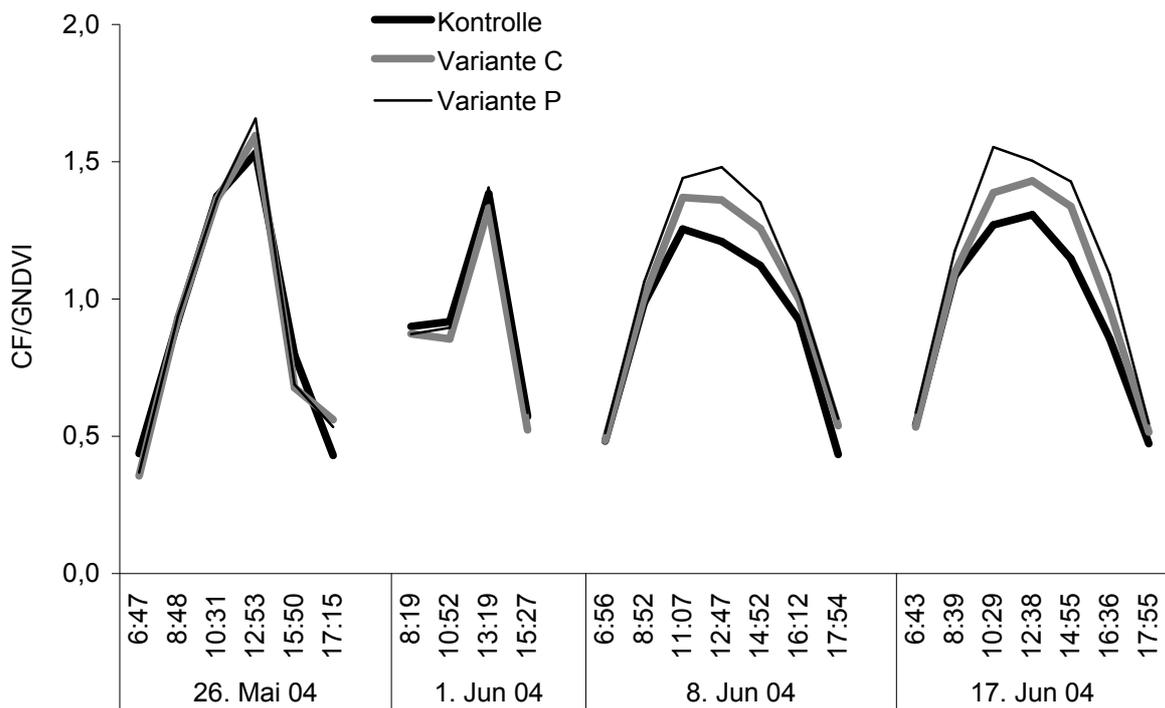


Abbildung 77. Tagesgänge von CF/GNDVI an den vier Meßtagen in der Wintergerste 'Duet'

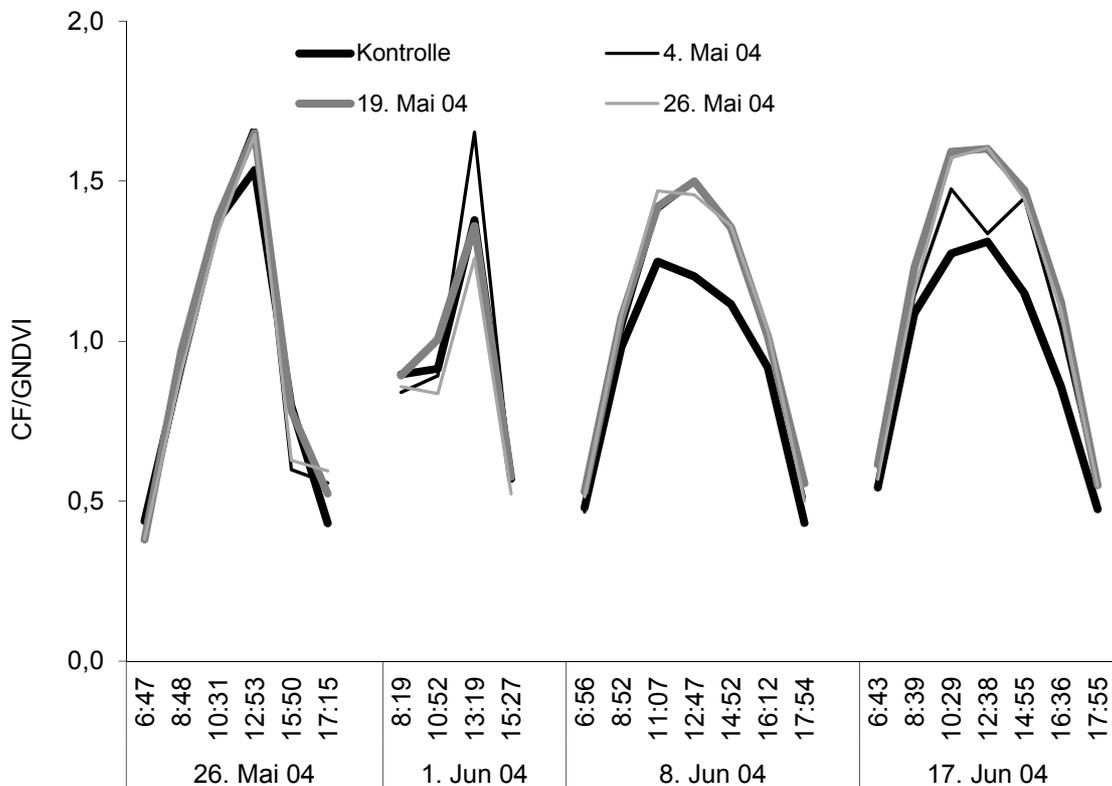


Abbildung 78. Tagesgänge von CF/GNDVI der Variante P im Timingversuch an den vier Meßtagen (Wintergerste 'Duet')

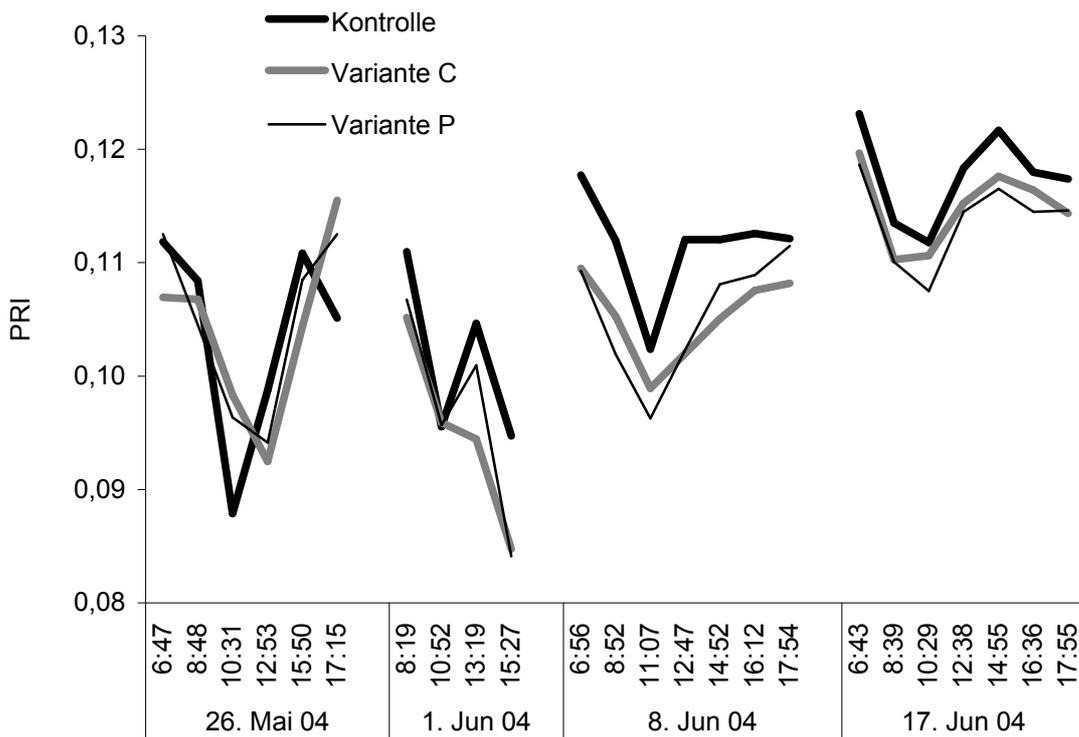


Abbildung 79. Tagesgänge des PRI an den vier Meßtagen in der Wintergerste 'Duet'

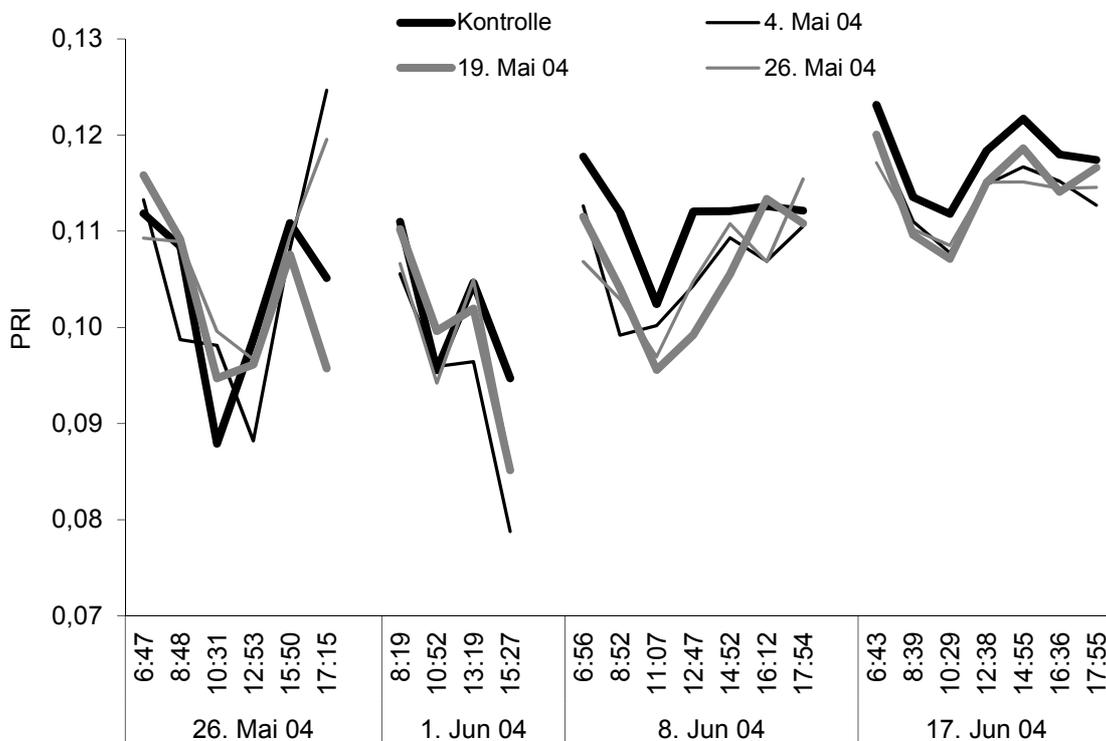


Abbildung 80. Tagesgänge des PRI der Variante P im Timingversuch an den vier Meßtagen (Wintergerste 'Duet')

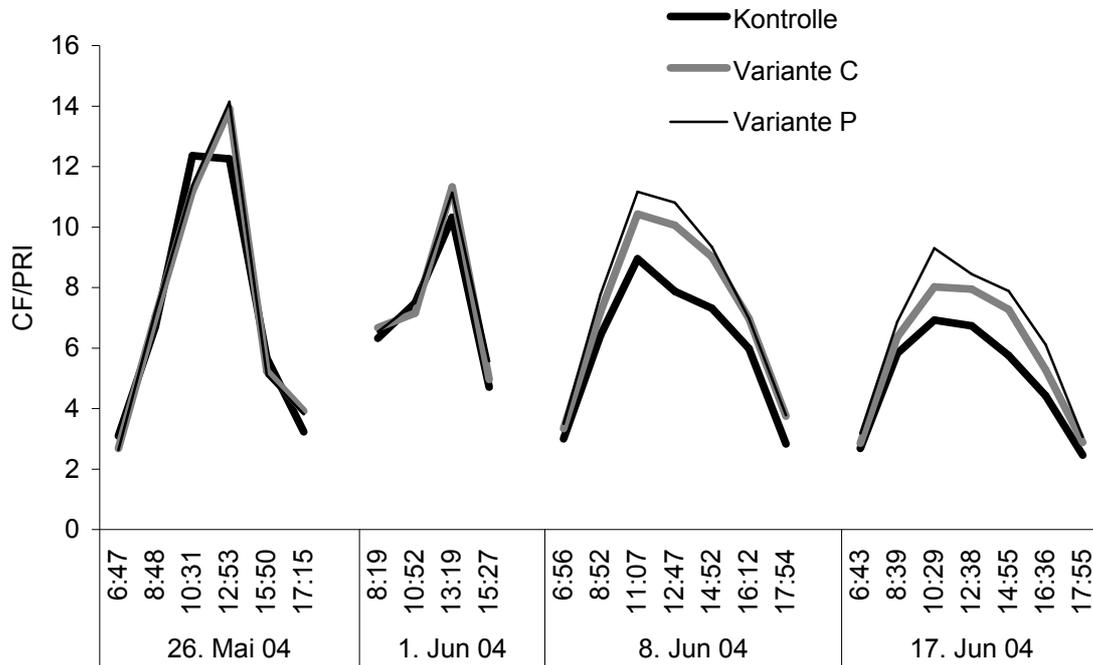


Abbildung 81. Tagesgänge von CF/PRI an den vier Meßtagen in der Wintergerste 'Duet'

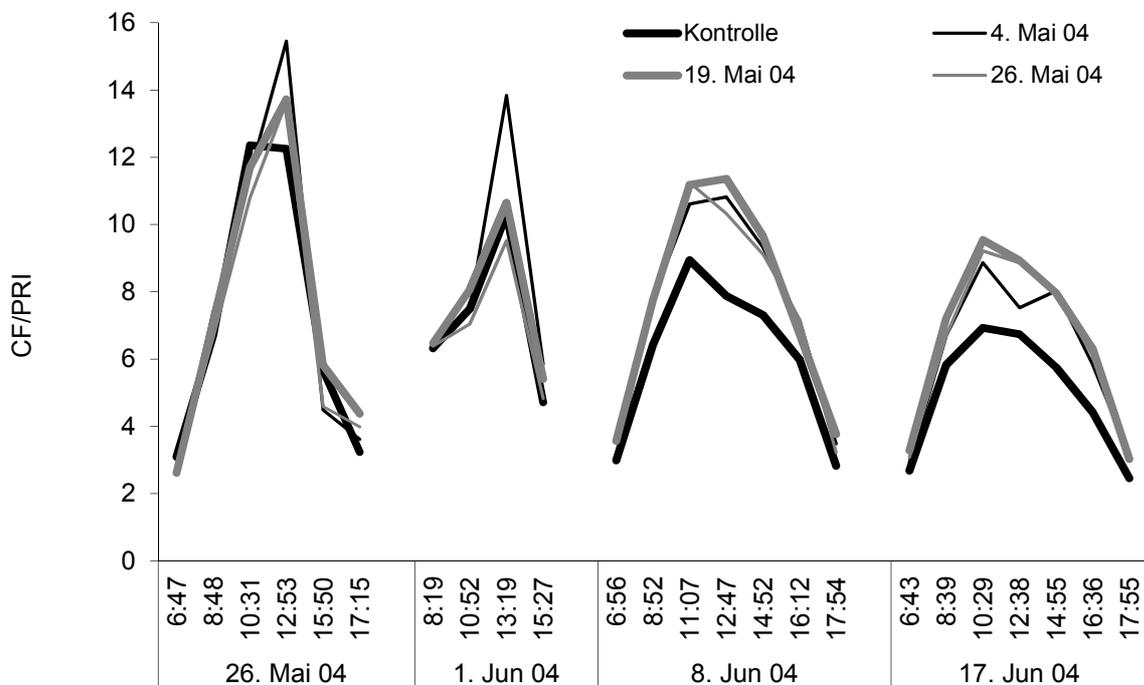


Abbildung 82. Tagesgänge von CF/PRI der Variante P im Timingversuch an den vier Meßtagen (Wintergerste 'Duet')

ließen sich keine klaren Tendenzen ableiten, denn die inhomogenen Tagesgänge des PRI waren durch Amplituden, größer als die Unterschiede zwischen den Varianten bzw. Applikationsterminen selber, gekennzeichnet.

Die Tagesgänge von CF/PRI glichen weitestgehend denen der CF. An den ersten beiden Meßtagen lagen nur zur Mittagszeit die CF-Werte der Kontrolle geringfügig unter denen der Varianten, wobei diese sich überhaupt nicht unterschieden. Die Varianten untereinander differenzierten an den letzten beiden Meßtagen signifikant (Abb. 81). Das Niveau des Tagesgangs von CF/PRI nahm zwischen erstem und letztem Meßtag kontinuierlich ab, wobei auch die Unterschiede zwischen den Morgen- und Mittagsmessungen immer geringer wurden. Variante P fluoreszierte um durchschnittlich 0,48 Einheiten stärker als Variante C, welche wiederum um 1,02 Einheiten stärker als die Kontrolle, bezogen auf die Aktivität des Xanthophyllzyklus fluoreszierte.

Auch im Timingversuch nahm das Niveau der Tagesgänge von CF/PRI über die Meßperiode hinweg kontinuierlich ab. Die Applikationstermine sowie Kontrolle differenzierten erst an den letzten beiden Meßtagen klar (Abb. 82). An den ersten beiden Meßtagen waren die Mittagswerte des erste Applikationstermins höher als die Mittagswerte der anderen Applikationstermine und der Kontrolle, an den letzten beiden Meßtagen aber war genau dieser erste Applikationstermin geringer als die anderen Applikationstermine, aber immer noch höher als die Kontrolle.

Am ersten Meßtag (26. Mai), an dem die Erreger bereits durch PCR nachgewiesen werden konnten, waren also nur teilweise sehr geringe Veränderungen in den spektrometrischen Daten erkennbar. Das Vorhandensein eines Erregers zeigte sich an den ersten beiden Meßtagen nur sehr bedingt in den spektrometrischen Daten. Erst an den letzten beiden Meßtagen konnte eine Differenzierung der Vegetationsindizes zwischen den Varianten noch vor dem Auftreten erster Symptome realisiert werden. Die Kontrolle hatte einen geringeren Chlorophyllgehalt, was sich in den niedrigeren Werten vor allem von CF, GNDVI und REIP niederschlug. Bei den behandelten Varianten C und P wurde bei nachweislich fast gleichem Chlorophyllgehalt eine unterschiedlich starke CF gemessen, was den Rückschluß auf eine unterschiedliche Umverteilung der aPAR im PSII in die Endpools PHS und Wärmeabgabe zuließ.

3.5 Wasserstreßversuche

3.5.1 Primärfolgen unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit

Die direkte Induktion von primären Symptomen eines Wassermangels konnte in diesen Versuchen nicht erfolgen, denn Wassermangel tritt kontinuierlich auf, wobei bereits spätestens nach einem Tag die Sekundärsymptome von Wassermangel hinzukommen würden und so den Zweck der Versuche, die Primärsymptome zu untersuchen, nicht erfüllt werden würde. Deshalb wurde hier zuallererst mit Extremen gearbeitet: So wurden die unmittelbaren Auswirkungen von einer plötzlichen Wasserverfügbarkeit (durch Angießen) nach einer längeren Trockenperiode bei der angegossenen Variante im Vergleich zur ungewässerten Variante erfaßt werden. Durch Angießen des Pflanzenbestandes ca. 20 Minuten vor Meßbeginn wurde erreicht, daß die Pflanzen bereits vor der ersten Messung Wasser aufnehmen konnten. Je nach Geschwindigkeit des Transpirationssoges waren die Unterschiede am Aufspannen der vorher schlaffen bzw. gerollten Blätter schon nach ca. 10 bis 20 min sichtbar. Hierbei handelte es sich kurzfristig primär um eine reine Turgorzunahme in den Zellen durch die vermehrte H₂O-Aufnahme im bewässerten Pflanzenbestand, auf die dann die Aufnahme aller anderen H₂O-abhängigen Stoffwechselprozesse folgte. Auf dieser Basis konnten zumindest am ersten Meßtag sekundäre Veränderungen des Pflanzenbestandes wie z.B. ein vermehrter Chlorophyllaufbau durch die erhöhte Wasser- und damit auch Nährstoffaufnahme bei der angegossenen Variante noch nicht in dem Maße zutage treten, als daß sie die Meßergebnisse allzu sehr beeinflussten. Am zweiten Meßtag aber wurde mit diesen Veränderungen bei der angegossenen Variante fest gerechnet.

a) *Rheum rhabarbarum* L.

Ein parzellengroßer Teil eines Rhabarberbestandes (*Rheum rhabarbarum* L.) wurde angegossen, der andere wurde ungewässert belassen. Während die angegossene Variante einen gut durchfeuchteten Boden (SFM = Soil Fuel Mass = 0,37, Tab. 17) zur Verfügung hatte, war der Boden der ungewässerten Variante mit einer SFM von 0,20 weitestgehend trocken.

Tabelle 17. Wassergehalte von Boden (Soil Fuel Mass) und Blattabschnitten (Leaf Fuel Mass) sowie Chlorophyll- und Stickstoffgehalte am 2. Mai 2003 bei *Rheum rhabarbarum* L.

Variante	SFM	LFM	Chl a (mg g ⁻¹ FS ⁻¹)	Chl b (mg g ⁻¹ FS ⁻¹)	Chl a+b (mg g ⁻¹ FS ⁻¹)	N (%)
Ungewässert	0,20	6,86	1,64	0,54	2,38	5,04
Angegossen	0,37	7,74	1,45	0,49	2,11	4,83

Die Blätter der angegossenen Variante waren bei Meßbeginn straff und standen „im Saft“, die des unbewässerten Rhabarbers hingen an den Rändern schlaff herab. Die angegossene Variante besaß einen höheren Flüssigkeitsgehalt (LFM = Leaf Fuel Mass = 7,74) als die ungewässerte Variante (LFM = 6,86). Außerdem wurden bei der ungewässerten Variante gegenüber der angegossenen Varianten höhere Chlorophyll- (Faktor 1,12) und N-Konzentrationen (Faktor 1,04) gefunden (Tab. 17), die höchstwahrscheinlich von dem geringeren Wassergehalt herrührten.

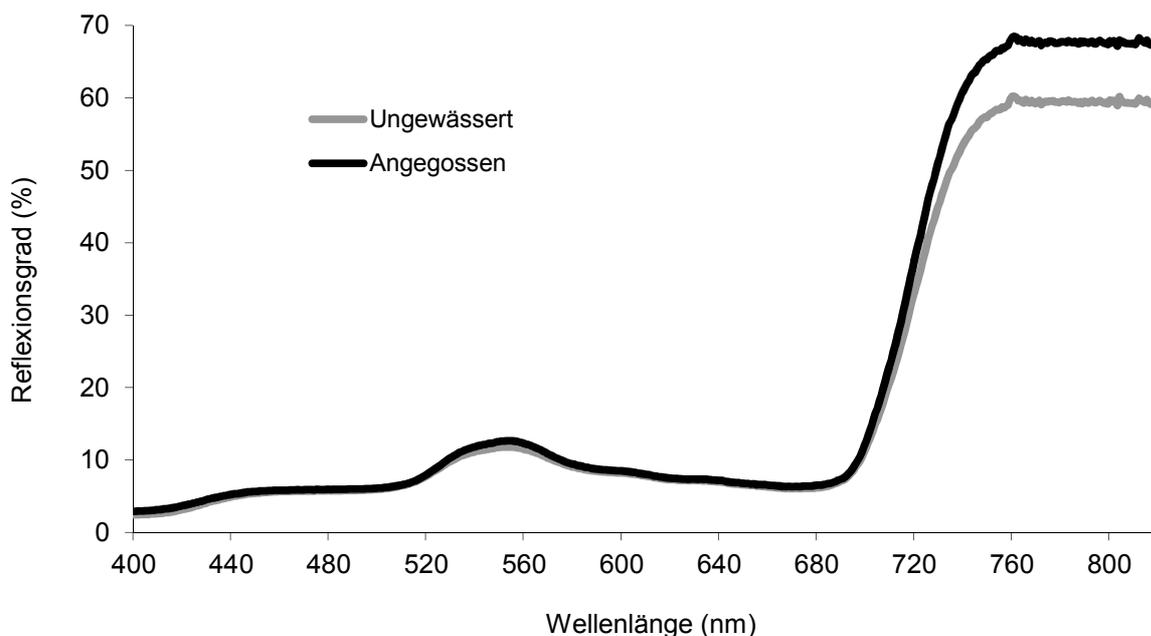


Abbildung 83. Reflexionssignaturen der unbewässerten und angegossenen Variante von *Rheum rhabarbarum* L. (12:50 Uhr, 2. Mai 2003)

Der erhöhte Wassergehalt der angegossenen Variante veränderte die Reflexionssignatur v.a. in den längeren Wellenlängenbereichen: Die NIR-Schulter der angegossenen Variante (67,86 % bei 800 nm, Abb. 83) war gegenüber der unbewässerten (59,67 % bei 800 nm) erhöht. Auch im Bereich zwischen 530 und 580 nm lag die Reflexionssignatur der angegossenen Variante mit 12,28% bei 560 nm (Abb. 83) leicht über der unbewässerten Variante mit 11,49 % bei 560 nm. Aufgrund dessen zeigte auch die angegossene Variante gegenüber der

ungewässerten Variante um den Faktor 1,03 höhere Werte bei den tageskonstanten Vegetationsindizes (Tab. 18), beim RVI sogar um den Faktor 1,09.

Tabelle 18. Mittagswerte von REIP, GNDVI, RVI und RG-Ratio zum primären Wasserstreiß in *Rheum rhabarbarum* L. (12:50 Uhr, 2. Mai 2003)

	REIP	GNDVI	RVI	RG-Ratio
Ungewässert	720,1	0,66	9,82	1,94
Angegossen	720,2	0,68	10,66	1,98

Der 2. Mai 2003 war ein vormittags strahlungsreicher Tag. Von 8:39 Uhr an stieg $PAR_{\text{außen}}$ kontinuierlich von 798 $\mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ auf den Maximalwert von 1.577 $\mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ um 12:46 Uhr an. Eine leichte Bewölkung um 11:57 Uhr verursachte eine Abnahme der $PAR_{\text{außen}}$ auf 1.212 $\mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Abb. 84). Bis 14:48 Uhr nahm der Bewölkungsgrad derart zu, so daß die $PAR_{\text{außen}}$ bei durchschnittlich 298 $\mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ bis zum Abend hin weiter verlief. Die Werte von PAR_{innen} und $PAR_{\text{außen}}$ unterschieden sich an diesem Tag nur geringfügig.

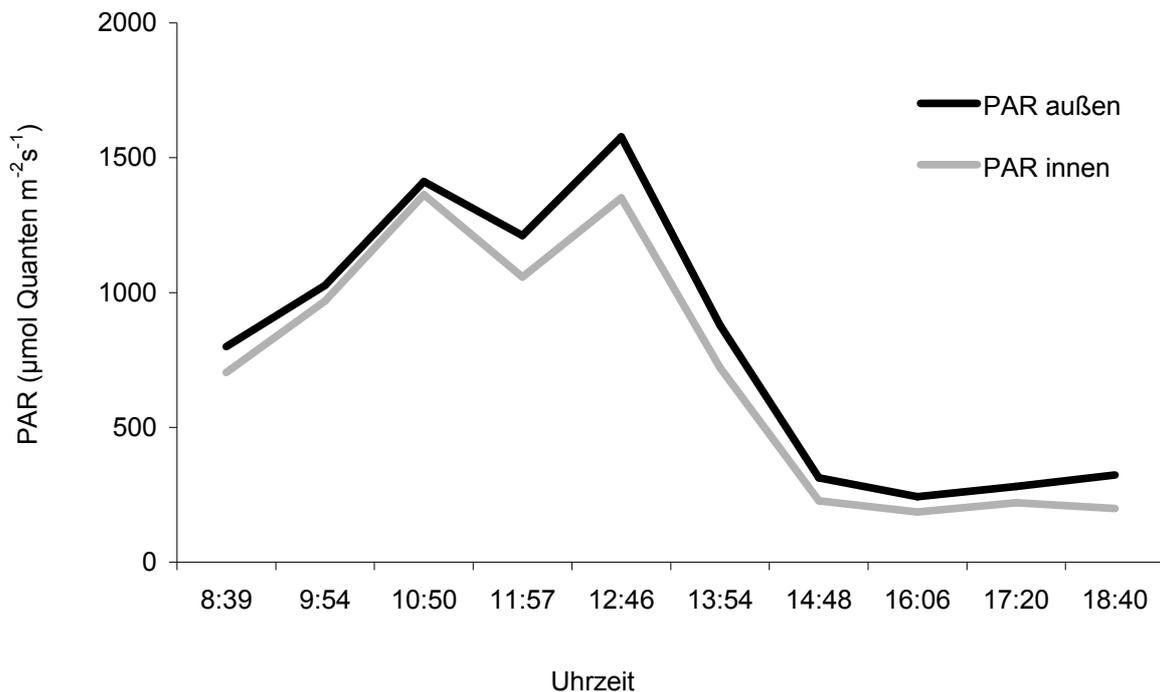


Abbildung 84. Verlauf der photosynthetisch aktiven Strahlung (2. Mai 2003)

Dieser Tag war ein für Anfang Mai außergewöhnlich warmer Tag mit einem kontinuierlichen Temperaturanstieg von 18,2 °C (8:39 Uhr, Abb. 85), bis zu einer Maximaltemperatur von 31 °C um 13:54 Uhr. Danach nahm die Temperatur bis 16:06 Uhr kontinuierlich ab und hielt sich bis 18:40 Uhr bei ca. 25 °C.

Die Blatttemperaturen hatten einen ähnlichen Verlauf wie die Lufttemperatur (Abb. 85). Morgens und abends war die Blatttemperatur der gewässerten Variante um durchschnittlich 0,8 °C höher als die der ungewässerten Variante; mittags und nachmittags lag sie um durchschnittlich 0,7 °C unter der ungewässerten Variante.

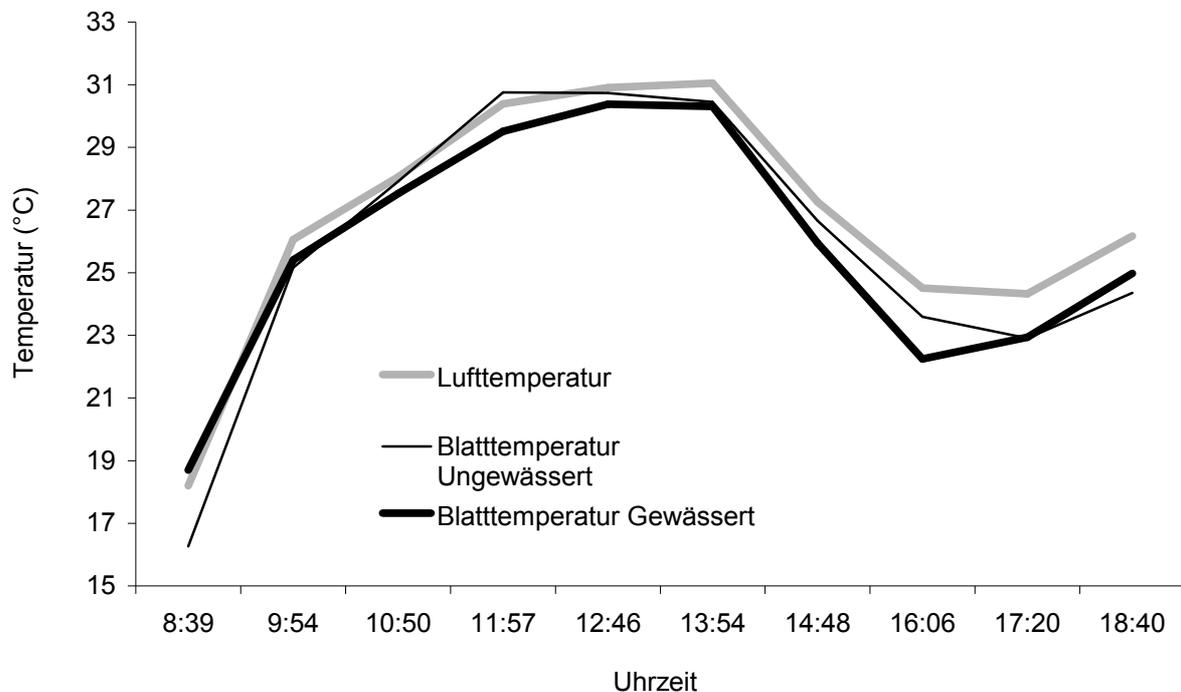


Abbildung 85. Verlauf von Luft- und Blatttemperaturen von ungewässertem und angegossenem Variante bei *Rheum rhabarbarum* L. (2. Mai 2003)

Die stomatäre Leitfähigkeit nahm von 0,44 mol H₂O m⁻²s⁻¹ bei der ungewässerten bzw. 0,53 mol H₂O m⁻²s⁻¹ bei der angegossenen Variante um 8:39 Uhr auf einen mittäglichen Minimumwert von 0,14 mol H₂O m⁻²s⁻¹ bei der ungewässerten (12:46 Uhr) bzw. 0,26 mol H₂O m⁻²s⁻¹ bei der angegossenen Variante (13:54 Uhr) ab (Abb. 86). Zum Abend hin öffneten sich die Stomata beider Varianten wieder ein wenig. Um 18:40 Uhr unterschieden sich die Varianten bezüglich der stomatären Leitfähigkeit nur noch geringfügig mit 0,26 mol H₂O m⁻²s⁻¹ bei der ungewässerten bzw. 0,30 mol H₂O m⁻²s⁻¹ bei der angegossenen Variante. Die Stomata der angegossenen Variante waren aufgrund der größeren Wasserverfügbarkeit tagsüber weiter geöffnet als die der ungewässerten. Dies spiegelte sich auch in einer höheren Transpirationsrate um durchschnittlich 2,07 mol H₂O m⁻²s⁻¹ bei der angegossenen Variante wider (Abb. 86). Die Korrelation zwischen den Varianten und stomatärer

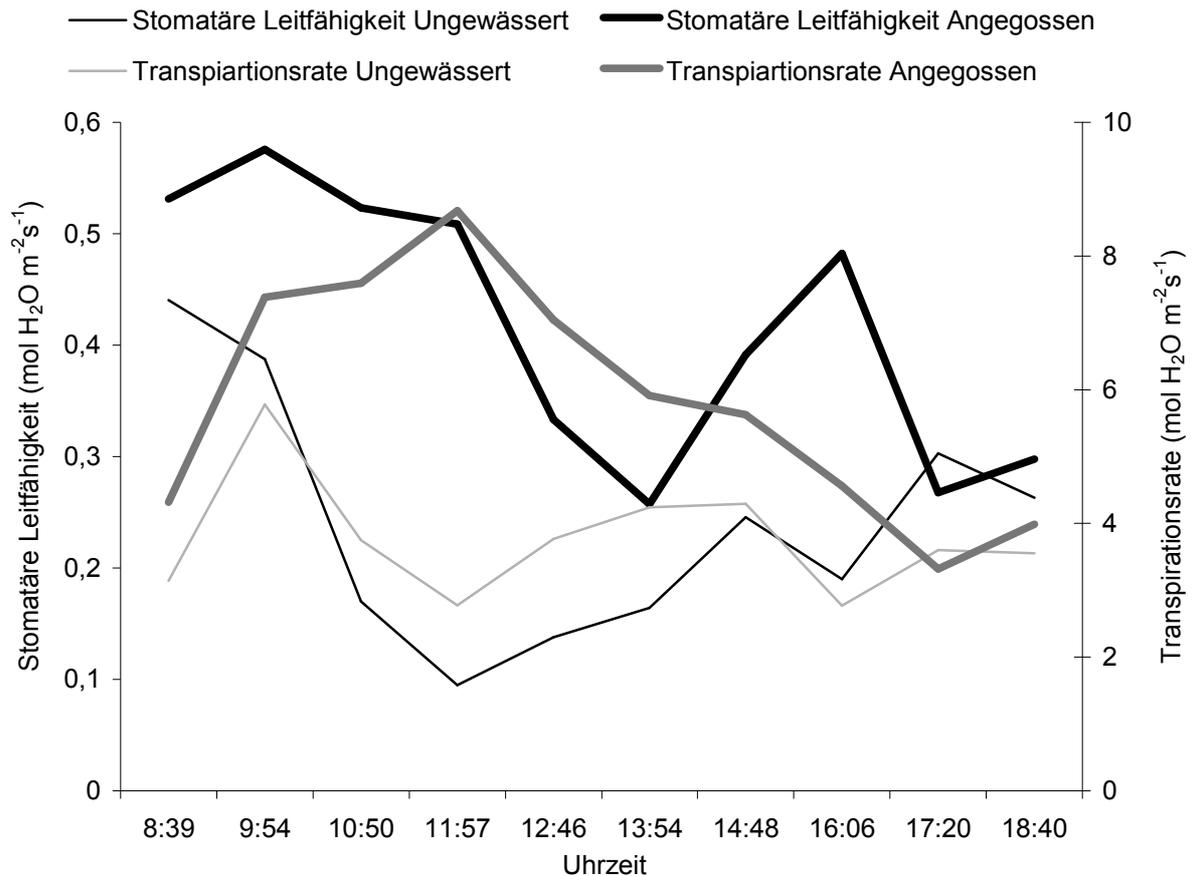


Abbildung 86. Verlauf der stomatären Leitfähigkeit und der Transpirationsrate von ungewässert und angegossener Variante von *Rheum rhabarbarum* L. (2. Mai 2003)

Leitfähigkeit lag bei 62 %, zwischen den Varianten und der Transpiration bei 60,8 %, während stomatäre Leitfähigkeit und Transpiration zu immerhin 64,8 % miteinander korrelierten (s. Anhang).

PAR_{innen} und Photosyntheserate hatten einen ähnlichen Verlauf (Abb. 87): Die Photosyntheserate stieg morgens parallel zur PAR an und hielt bis 12:46 Uhr ein konstant hohes Niveau, mit Einsetzen der nachmittäglichen Bewölkung aber fiel sie wieder auf niedrigere Werte. Die angegossene Variante fixierte zwischen 8:39 Uhr und 9:54 Uhr durchschnittlich $5,8 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ mehr Kohlenstoffdioxid als die ungewässerte. Begründet lag dies in den weiter geöffneten Stomata aufgrund der besseren Wasserversorgung. Zwischen 10:50 Uhr und 12:46 Uhr drifteten die Photosyntheseraten beider Varianten bis zu einem Maximalwert von $9,7 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ auseinander, wobei die angegossene Variante auf einem konstanten Niveau von ca. $20,0 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ verblieb und die PHS der ungewässerten Variante bis 11:57 Uhr zuerst abfiel und dann wieder stieg. Um 13:54 Uhr „trafen“ sich die Photosyntheseraten beider Varianten bei einem Wert von

13,1 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, um dann weitestgehend gleich zu verlaufen: Unter der geringeren PAR während des restlichen Tages unterschieden sich die Photosyntheseraten der Varianten nur noch um 0,27 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Nur um 17:20 Uhr assimilierte die angegossene Variante um ca. 1,7 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ mehr als die ungewässerte Variante. Die Korrelation zwischen Photosyntheserate und $\text{PAR}_{\text{innen}}$ betrug 86,2 % (s. Anhang), zwischen Photosynthese und Lufttemperatur 46,3 %. Das ließ darauf rückschließen, daß die Photosyntheserate in diesem Versuch eher ein lichtabhängiger als ein temperaturabhängiger Prozeß war. Zumindest bei der ungewässerten Variante traten zwischen 10:50 Uhr und 12:46 Uhr meßbare Anzeichen von Hitzestreß auf.

Während der vormittags hohen PAR lag die Photosyntheseeffizienz beider Varianten bei durchschnittlich 0,015 $\mu\text{mol CO}_2 \mu\text{mol}^{-1} \text{ Quantum}^{-1}$ (Abb. 87). Zwischen 9:54 Uhr und 12:46 Uhr betrieb die angegossene Variante um 0,004 $\mu\text{mol CO}_2 \mu\text{mol}^{-1} \text{ Quantum}^{-1}$ effizienter die Photosynthese als die ungewässerte Variante. Während der nachmittäglichen Bewölkung aber stieg sie auf durchschnittlich 0,026 $\mu\text{mol CO}_2 \mu\text{mol}^{-1} \text{ Quantum}^{-1}$, wobei die ungewässerte Variante zuerst eine leicht höhere PE als die angegossene hatte. Ab 17:20 Uhr zeigten die Varianten keine eindeutigen Unterschiede mehr.

Aufgrund der geringeren Unterschiede beim Gehalt an Chlorophyll a verhielten sich die Photosyntheseraten der Varianten bezogen auf den Chlorophyllgehalt zueinander ähnlich den Verläufen der PHS (Abb. 88), aber auf leicht niedrigerem Niveau: Die angegossene Variante hatte z.B. um 12:46 Uhr eine PHS von 13,74 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, bezogen auf den Gehalt an Chlorophyll a, und die ungewässerte von 7,59 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, bezogen auf den Gehalt an Chlorophyll a. Wie in Abb. 87 lagen ab 14:48 Uhr die Verläufe beider Varianten bei durchschnittlich 3,4 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, bezogen auf den Chlorophyllgehalt, dicht beieinander.

Die CF (Abb. 89) hatte wie die PAR und die PHS vormittags einen hohen und nachmittags einen niedrigen Verlauf. Sie war mit der $\text{PAR}_{\text{außen}}$ zu 97,8 % und mit der Photosyntheserate zu 81,3 % korreliert. Zwischen 8:39 Uhr und 9:54 Uhr fluoreszierte die ungewässerte Variante mit durchschnittlich 0,57 Einheiten schwächer als die angegossene mit 0,79 Einheiten. Zu diesem Zeitpunkt hatte die ungewässerte Variante eine um ca. 6 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ geringere PHS als die

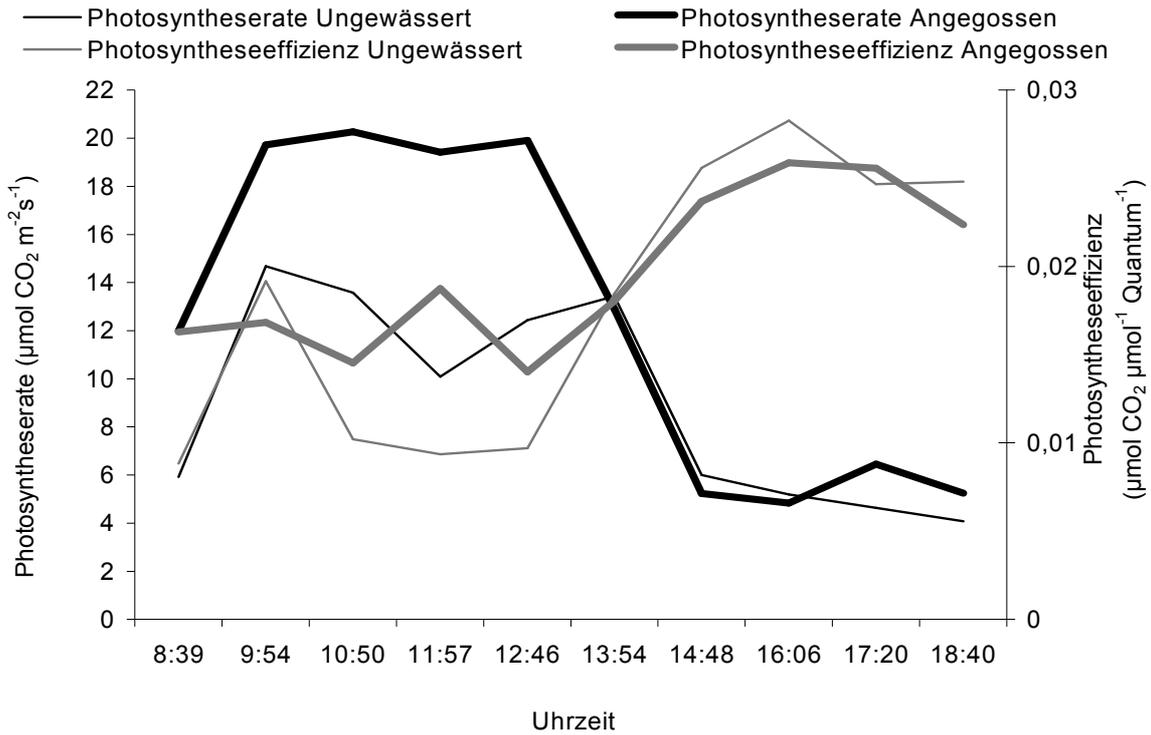


Abbildung 87. Verlauf der Photosyntheseraten von ungewässertter und angegossener Variante von *Rheum rhabarbarum* L. (2. Mai 2003)

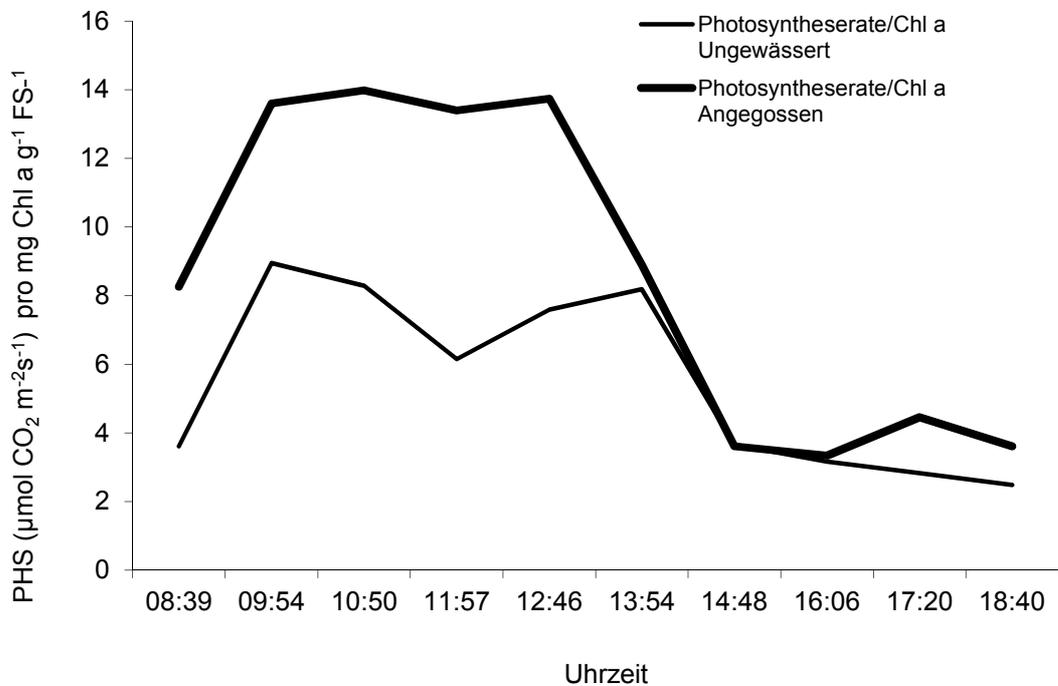


Abbildung 88. Verlauf der Photosyntheseraten bezogen auf den Gehalt an Chlorophyll a von ungewässertter und angegossener Variante von *Rheum rhabarbarum* L. (2. Mai 2003)

angegossene. Hier waren PAR und Temperatur zwar ansteigend, befanden sich aber noch im Bereich des Temperaturoptimums, so daß keine meßbaren Streßsymptome, wie z.B. sinkende Transpirations- oder Photosyntheseraten, ausgelöst wurden.

Im Zeitraum von 10:50 Uhr bis 12:46 Uhr fluoreszierte die angegossene Variante bei einer weitaus höheren PHS (mit einem Unterschied von mehr als $12 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) um durchschnittlich 0,1 Einheiten schwächer als die ungewässerte Variante. Insofern sprach dieses Verhalten für eine unterschiedliche Kautsky-Kinetik bei den Varianten, ausgelöst durch hohe Einstrahlungsstärken und auch Temperaturen, als daß am Nachmittag wiederum folgender Zustand auftrat: Nachmittags ab 13:54 Uhr verlief die CF beider Varianten an 4 Meßpunkten mit Ausnahme der Messung um 17:20 Uhr gleich, und ab 14:48 Uhr auf einem konstanten Niveau von durchschnittlich 0,19 Einheiten. Ein ähnliches Verhalten zeigten ja auch schon die Photosyntheseraten beider Varianten bei niedrigen Einstrahlungsstärken, weswegen hier von keinen meßbaren Unterschieden in der Kautsky-Kinetik zwischen den Varianten ausgegangen werden konnte.

Die FQA verlief tagsüber weitestgehend auf einem konstanten Niveau. Morgens und abends, je nach Variante, nahm sie ab bzw. zu: Die angegossene Variante fluoreszierte pro μmol eingestrahlten Lichtquanten $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ morgens und abends stärker als die ungewässerte, mittags aber überwog die ungewässerte Variante meist die angegossene Variante (Abb. 89). Die Korrelation zwischen FQA und Photosyntheseeffizienz lag bei 12,6 % (s. Anhang).

Die Verläufe von CF/GNDVI und CF/RVI (Abb. 90) befanden sich entsprechend den Tagesgängen der CF durch die Quotientenbildung auf einem anderem Niveau, wobei die Werte der ungewässerten Variante zwischen 12:50 Uhr und 12:46 Uhr höher waren als die der angegossenen Variante. Hier fluoreszierte die ungewässerte Variante relativiert auf den Chlorophyllgehalt als auch auf die Biomasse mehr als die angegossene Variante. Morgens bis zu diesem Zeitpunkt fluoreszierte die angegossene Variante mehr. Ab 13:54 Uhr waren CF/GNDVI und CF/RVI gleichläufig und differierten kaum zwischen den Varianten. Bis zum Abend gab es wie bei der CF keine relevanten Unterschiede zwischen den Varianten.

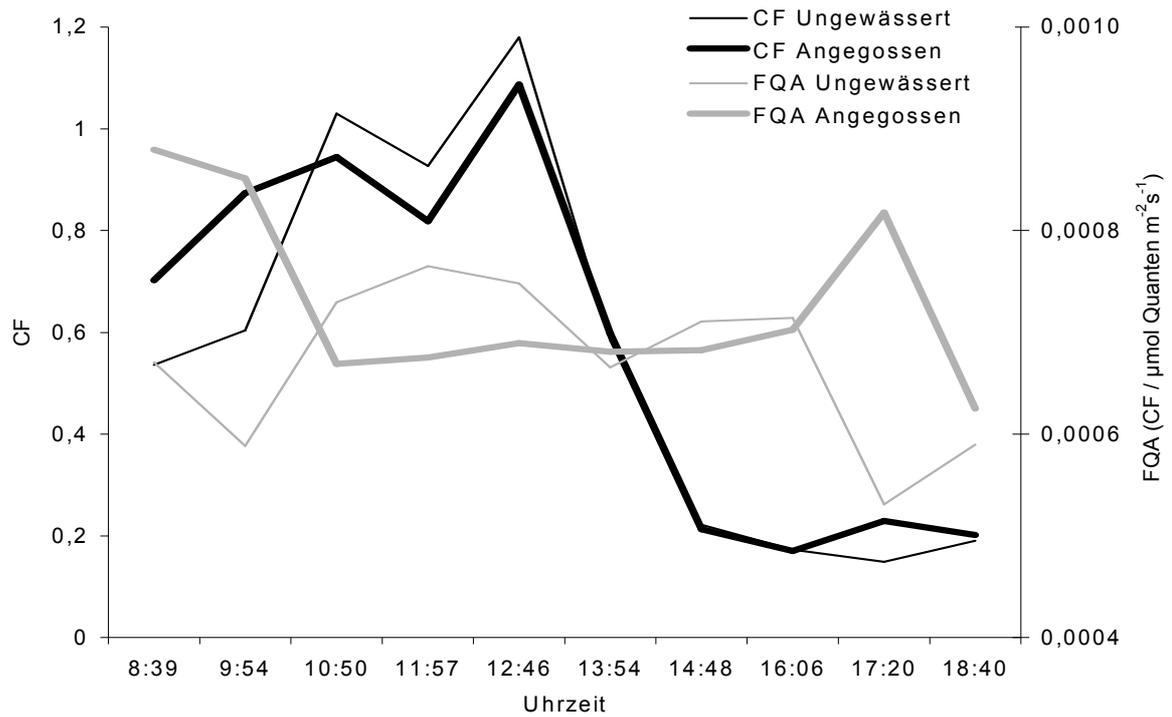


Abbildung 89. Verlauf der sonnenlicht-induzierten Chlorophyll-Fluoreszenz und der Fluoreszenzquantenausbeute von ungewässert und angegossener Variante von *Rheum rhabarbarum* L. (2. Mai 2003)

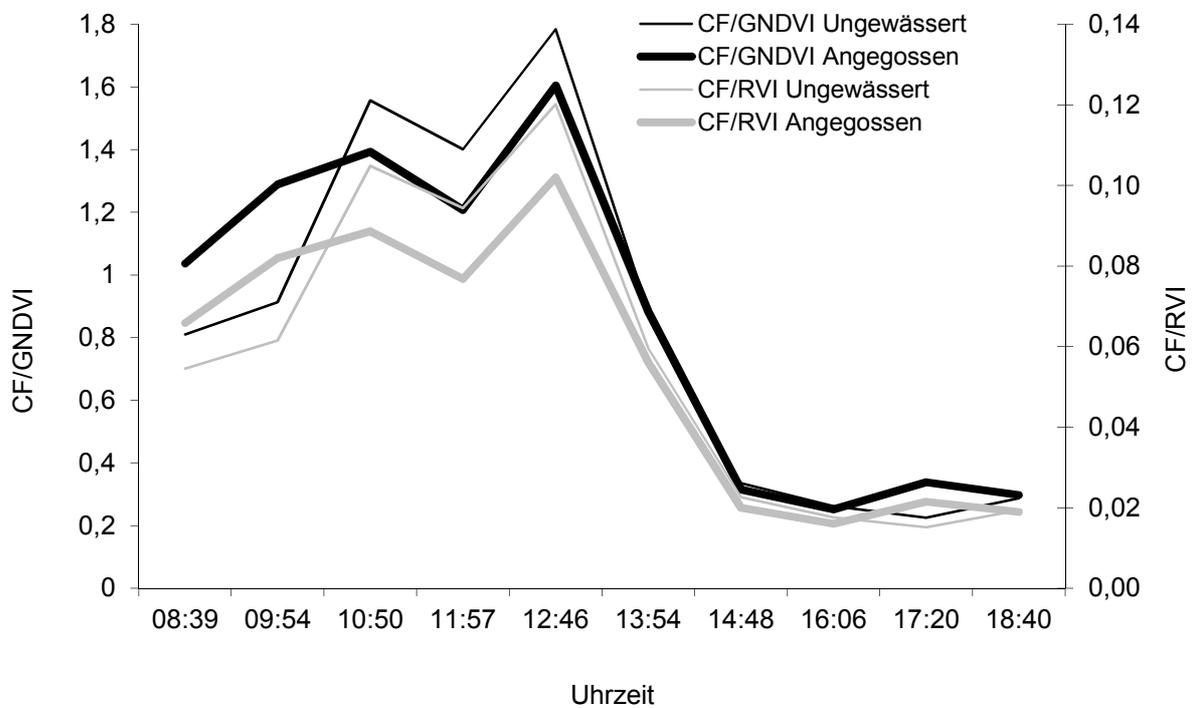


Abbildung 90. Verlauf von CF/GNDVI und CF/RVI von ungewässert und angegossener Variante von *Rheum rhabarbarum* L. (2. Mai 2003)

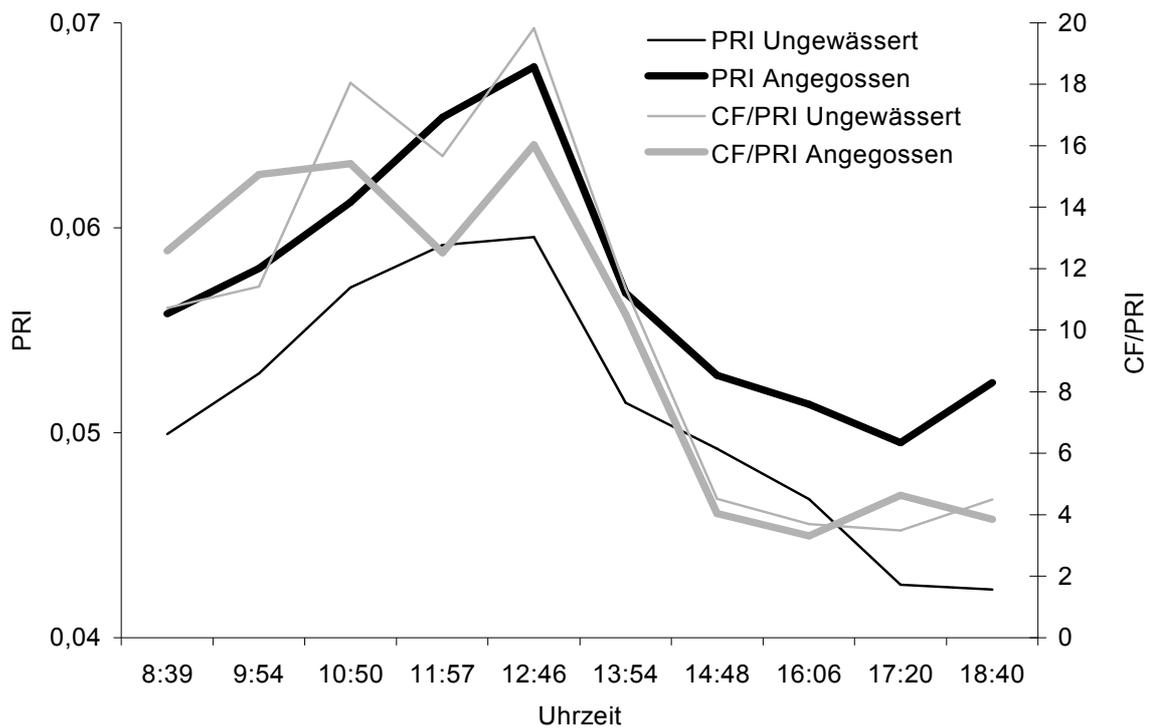


Abbildung 91. Verlauf von PRI und CF/PRI von ungewässertem und angegossenem Variante von *Rheum rhabarbarum* L. (2. Mai 2003)

Der PRI beider Varianten verlief über den gesamten Tag parallel, wobei beide Varianten meist den gleichen Abstand von durchschnittlich 0,006 Einheiten zueinander hatten. (Abb. 91): Von 8:39 Uhr bis 12:46 Uhr stieg der PRI kontinuierlich an, für den Rest des Tages fiel er wieder ebenso. Sein Maximum hatte der PRI um 12:46 Uhr gleich wie das Tagesmaximum der PAR.

Beim Quotienten CF/PRI (Abb. 91) differenzierten die Varianten mehr als bei der CF alleine: Die ungewässerte Variante fluoreszierte, bezogen auf den PRI, bei hohen Einstrahlungsstärken deutlich stärker als die angegossene Variante. Ab 13:45 Uhr waren die Unterschiede zwischen den Varianten gering und die Werte lagen ab diesem Zeitpunkt bei durchschnittlich 4,00 Einheiten.

In diesem Versuch hatte das unterschiedliche Wasserangebot unmittelbare Auswirkungen auf physiologische Faktoren wie die Transpirationsrate und Photosynthese, sowie auch auf spektrometrische Daten wie die CF und den PRI. Vor allem durch den Effekt, daß bei beiden Varianten vergleichbar große Blattflächen sowohl mit dem Spektrometer als auch mit dem LI-COR 6400 bemessen wurden, konnte hier noch einmal die unterschiedliche Umverteilung der Sonnenenergie im Photosynthesezentrum II zwischen den Varianten herausgearbeitet werden.

Außerdem war hier sehr gut ein Tagesgang ohne Mittagshitzestress zu beobachten, der von seiner Struktur her zweigeteilt war: Die erste Tageshälfte war durch hohe Einstrahlungsstärken und Temperaturen geprägt, in der definitiv eine veränderte Umverteilung der aPAR im PSII nachgewiesen werden konnte, die zweite Tageshälfte zeichnete sich durch moderate Einstrahlungsstärken und Temperaturen aus: In diesem Zeitraum „nahmen es die Varianten entspannt“, indem sie fast gleiche Blatttemperaturen, Photosyntheseraten und CFs auf niedrigem Niveau fuhren. Der PRI demonstrierte hier, daß er nicht nur den Deepoxidationsgrad der Xanthophyllfraktion anzeigt, sondern durchaus auch eine physische Information beinhalten könnte, in diesem Falle den eines unterschiedlichen Wassergehalts bzw. Turgors.

b) *Triticale* ‘Modus’

Beim *Triticale*-Bestand ‘Modus’ zeigten die aufgerollten Blätter nach einer längeren regenarmen Periode das Vorhandensein von Wassermangel an. Auch hier sollten die primären Auswirkungen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit durch Angießen einer Variante gegenüber der ungewässerten, und damit weiterhin wassergestreßten Variante untersucht werden. Dieser Versuch ging über zwei Meßtage (6. und 8. Mai 2003), wobei am ersten Meßtag die Primärfolgen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit untersucht werden sollten. Am zweiten Meßtag konnte mit den Anzeichen eines verbesserten Pflanzenwachstums aufgrund einer gesteigerten Wasser- und damit auch Stickstoffaufnahme mit daraus resultierendem höherem Chlorophyllgehalt bei der gewässerten Variante im Gegensatz zu der ungewässerten Variante gerechnet werden.

So hatte die angegossene Parzelle am Ende des ersten Meßtags mit einem Soil Fuel Mass Index von 0,25 einen feuchteren Boden als die ungewässerte mit 0,09 zur Verfügung. Auch war durch das Angießen der Feuchtegehalt der Blätter verändert: Schon kurz nach dem Angießen entrollten sich die aufgrund der Trockenheit gerollten Blätter der angegossenen Variante sichtlich. Zusätzlich betrug der Leaf Fuel Mass Index der angegossenen Variante am ersten Meßtag 3,32 und bei der ungewässerten Variante geringere 3,14 (Tab. 19). Ähnliche Unterschiede traten auch am zweiten Meßtag (8. Mai) auf. Die zweite Blattetage (F-1) enthielt mehr Feuchtigkeit als die erste Blattetage (F): Bei der angegossenen Variante betrug die Differenz 0,08 Einheiten und bei der ungewässerten Variante 0,18 Einheiten.

Dies spiegelte sich in den Chlorophyll- und Stickstoffgehalten wider (Tab. 19). Zu Meßbeginn (1. Meßtag, 6. Mai) waren beide Varianten visuell farblich gleich. Die angegossene Variante enthielt durchschnittlich $1,77 \text{ mg Chl a g}^{-1} \text{ FS}^{-1}$, bei der ungewässerten Variante waren es $1,75 \text{ mg Chl a g}^{-1} \text{ FS}^{-1}$ (Tab. 19). Am zweiten Meßtag (8. Mai) war das Grün der angegossenen Variante bereits ein wenig dunkler als das der ungewässerten Variante. Die angegossene Variante enthielt am zweiten Meßtag $1,78 \text{ mg Chl a g}^{-1} \text{ FS}^{-1}$, die ungewässerte Variante nur noch $1,54 \text{ mg Chl a g}^{-1} \text{ FS}^{-1}$. Am 9. Mai 2003 waren beide Varianten visuell gut zu unterscheiden: Die ungewässerte Variante war deutlich gelber als die angegossene, inzwischen grünbläulich gefärbte Variante. Eine höhere N-Aufnahme und Einlagerung in der zweiten Blatttage aufgrund des ausreichenden Wasserangebots während der Meßperiode verursachte bei der angegossenen Variante einen durchschnittlichen Gehalt von 4,39 N-% in ihren Blättern, bei der ungewässerten Variante waren es nur 3,15 N-% (Tab. 19).

Tabelle 19. Wassergehalte von Boden (Soil Fuel Mass) und Blättern (Leaf Fuel Mass) sowie Chlorophyll- und Stickstoffgehalte, *Triticale* 'Modus'

	Variante	Etage	LFM	Chl a ($\text{mg g}^{-1} \text{ FS}^{-1}$)	Chl b ($\text{mg g}^{-1} \text{ FS}^{-1}$)	Chl a+b ($\text{mg g}^{-1} \text{ FS}^{-1}$)	N (%)
6. Mai 03	Ungewässert	F	3,07	1,60	0,40	2,17	3,12
		F-1	3,20	1,91	0,45	2,62	3,54
	Angegossen	F	3,28	1,88	0,31	2,20	3,25
		F-1	3,37	1,66	0,46	2,31	3,73
8. Mai 03	Ungewässert	F	2,95	1,45	0,40	2,00	3,01
		F-1	3,19	1,63	0,45	2,25	3,29
	Angegossen	F	3,13	1,63	0,44	2,25	3,53
		F-1	3,20	1,92	0,49	2,62	5,25

Vorgenannte Effekte spiegelten sich auch in den Werten der tageskonstanten Vegetationsindizes wider: Die Varianten unterschieden sich bezüglich GNDVI und RG-Ratio nur minimal (Tab. 20). Der REIP beider Varianten schwankte zwischen 723,2 und 725,9. Die angegossene Variante hatte am 6. Mai einen etwas geringeren REIP als die ungewässerte, was an der Linksverschiebung des Hauptwendepunktes der Reflexionssignatur durch die höhere NIR-Schulter lag (vergleiche dazu Abb. 83). Am zweiten Meßtag war der REIP der angegossenen Variante um 0,5 Einheiten höher als der der ungewässerten Variante, was wohl auch mit der Zunahme an Biomasse und Chlorophyll, referenziert auch durch die Zunahme der anderen tageskonstanten Vegetationsindizes, lag. Der RVI der ungewässerten Variante lag am 6. Mai mit 16,4 deutlich über dem der angegossenen (12,6), am

8. Mai aber war der RVI der angegossenen Variante höher. Generell hatte die angegossene Variante am 6. Mai durchgehend niedrigere Werte der tageskonstanten Vegetationsindizes, wahrscheinlich aufgrund des höheren Wassergehalts bzw. Turgors. Am 8. Mai dann hatte die angegossene Variante durchweg höhere Werte als die ungewässerte Variante, da sie bereits als Folge der höheren Wasserverfügbarkeit mehr Biomasse und Chlorophyll aufbauen konnte.

Tabelle 20. Mittagswerte von REIP, GNDVI, RVI und RG-Ratio bei *Triticale* 'Modus'

		REIP	GNDVI	RVI	RG-Ratio
6. Mai 03	Ungewässert	724,4	0,73	16,4	2,33
	Angegossen	723,5	0,70	12,6	2,08
8. Mai 03	Ungewässert	724,4	0,73	15,9	2,33
	Angegossen	724,9	0,74	17,3	2,37

Was die RG-Ratio betrifft, hatte die ungewässerte Variante an beiden Meßtagen den gleichen Wert von 2,33, der Wert der angegossenen Variante stieg von 2,08 am 6. Mai auf 2,37 am 8. Mai an, was darauf rückschließen ließ, daß die angegossene Variante inzwischen einen höheren Anthocyangehalt hatte als die ungewässerte Variante.

Bei den Meßtagen handelte es sich um trockene, strahlungsreiche Frühlingstage mit einem gemessenen Maximum von $1.673 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ($\text{PAR}_{\text{außen}}$, 6. Mai, 13:08 Uhr, Abb. 92) und mit Temperaturen von bis zu $36 \text{ }^\circ\text{C}$ (Abb. 93). Die Lufttemperatur betrug durchschnittlich $21 \text{ }^\circ\text{C}$ und war zu $78,6 \%$ mit der photosynthetisch aktiven Strahlung korreliert. Der erste Meßtag war vor allem mittags einstrahlungsstärker und heißer als der zweite Meßtag. Luft- und die Blatttemperaturen der Varianten unterschieden sich am ersten Meßtag nicht signifikant. Morgens und abends hatte die ungewässerte Variante zumeist eine niedrigere Blatttemperatur als die angegossene Variante. Mittags aber war die Blatttemperatur der ungewässerten Variante an einigen Punkten höher. Am zweiten Meßtag lag die Blatttemperatur der angegossenen Variante um durchschnittlich $2,2 \text{ }^\circ\text{C}$ unter der Lufttemperatur und um $2,3 \text{ }^\circ\text{C}$ unter der Blatttemperatur der ungewässerten Variante, d.h., daß die Blatttemperatur der ungewässerten Variante zwischen ca. 11 Uhr und ca. 14 Uhr geringfügig, aber stringent höher war als die Lufttemperatur. In der Zeit davor war sie niedriger und

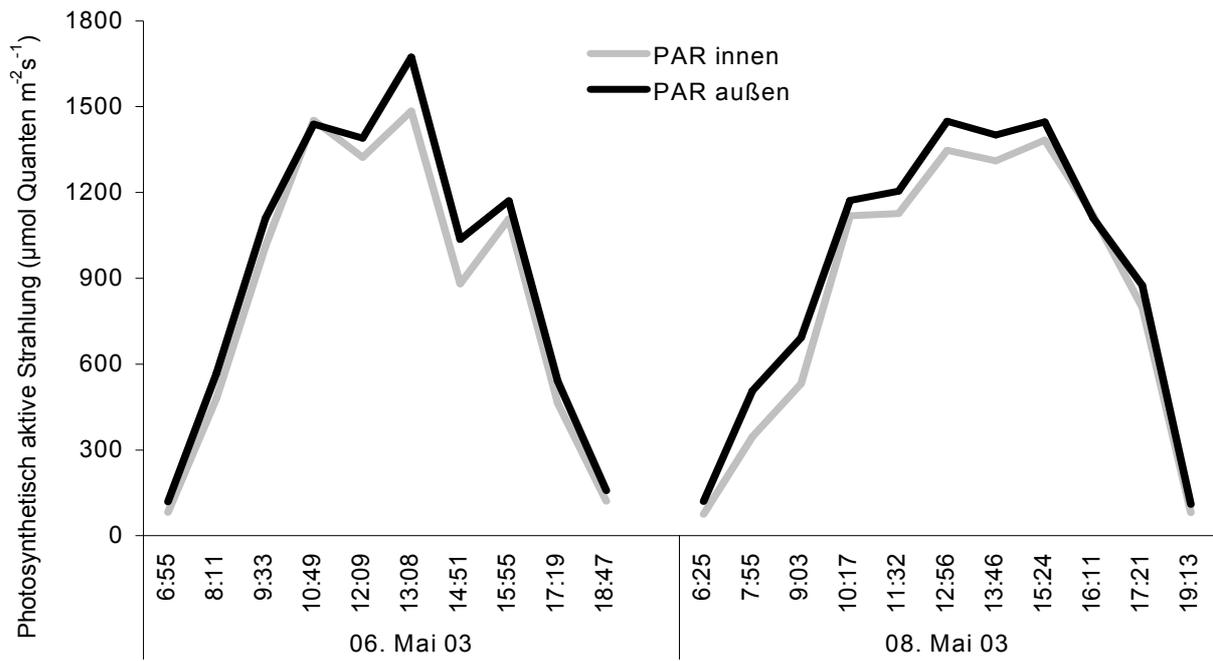


Abbildung 92. Verlauf der PAR am 6. und 8. Mai 2003

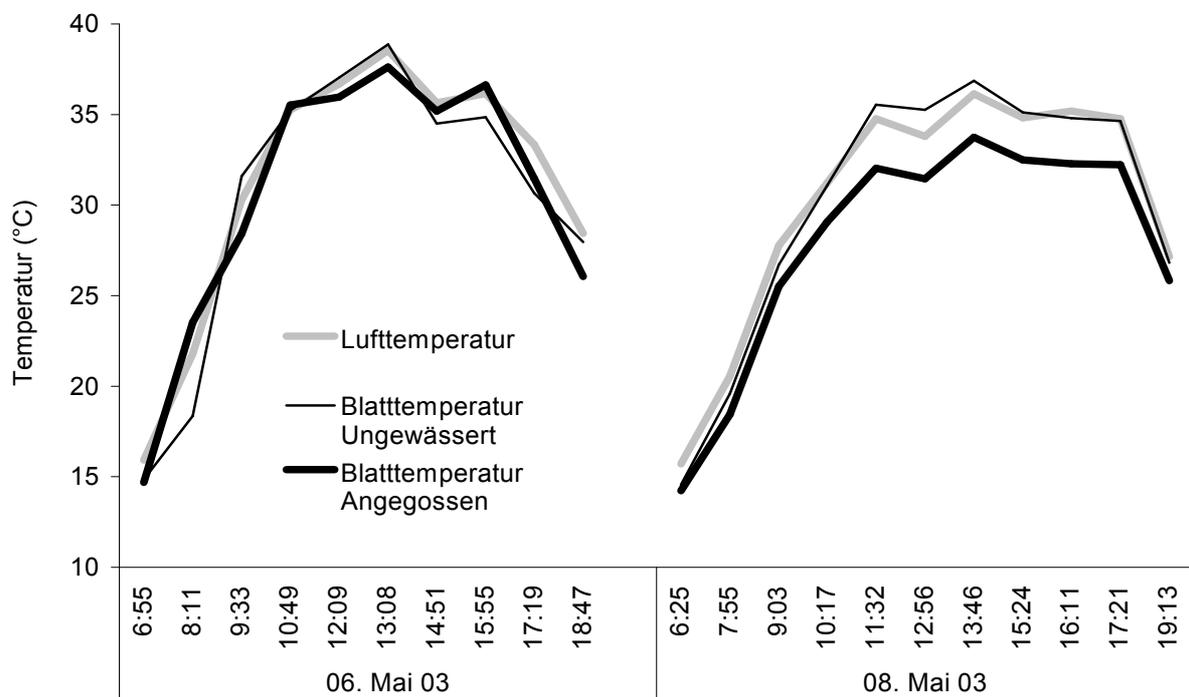


Abbildung 93. Verlauf von Luft- und Blatttemperatur bei ungewässert und angegossener Variante im *Triticale* 'Modus' am 6. und 8. Mai 2003

nahe, daß die ungewässerte Variante die Wärmeabgabe aus welchen blattinternen Prozessen auch immer genutzt hat, um die nicht genutzte Sonnenenergie abzuleiten. Die angegossene Variante hatte dann eine weitaus geringere Wärmeabgabe über die Blatttemperatur und hat deshalb die aPAR in andere Prozesse, z.B. die Photosynthese, umgeleitet. Tagsüber waren die Unterschiede zwischen den Varianten größer als morgens und abends.

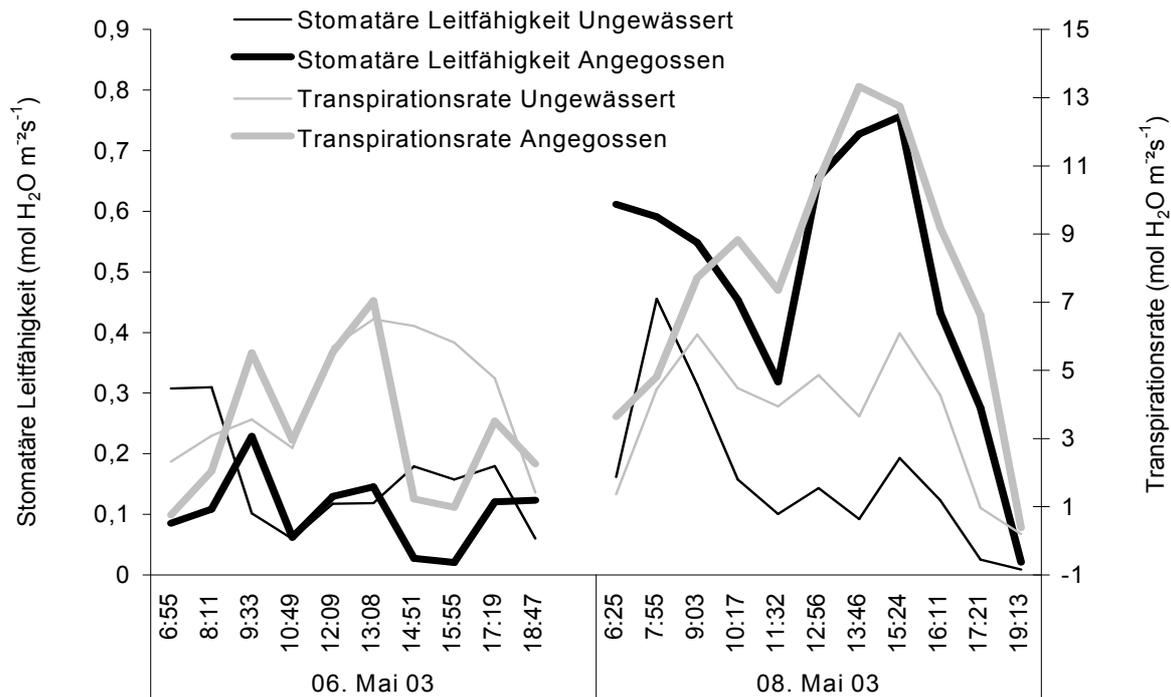


Abbildung 94. Verlauf von stomatärer Leitfähigkeit und Transpirationsrate bei ungewässert und angegossener Variante im *Triticale* 'Modus'

Das Niveau der sehr inhomogenen Tagesgänge von stomatärer Leitfähigkeit und Transpirationsrate nahm v.a. bei der angegossenen Variante zwischen erstem und zweitem Meßtag zu (Abb. 94). Bis 13:08 Uhr am ersten Meßtag unterschieden sich die Varianten in Bezug auf stomatäre Leitfähigkeit und Transpirationsrate nicht signifikant. Nachmittags war eine extreme Abnahme dieser beiden Faktoren bei der angegossenen Variante gegenüber der ungewässerten zu verzeichnen: Während beide Faktoren bei der angegossenen Variante bis 15:55 Uhr erst abnahmen und dann wieder zunahm, verliefen sie bei der ungewässerten Variante hügelartig, und nahmen zum Abend wieder hin ab. Am 8. Mai aber hatte die angegossene Variante eine weitaus höhere stomatäre Leitfähigkeit und Transpirationsrate als die ungewässerte Variante. Stomatäre Leitfähigkeit und Transpirationsrate korrelierten zu 75,7 % miteinander, wobei die Transpirationsrate zu 51,3 % mit PAR_{innen} und zu

37,9 % mit der Lufttemperatur korreliert war, aber zu 82,3 % mit der Photosyntheserate. Die stomatäre Leitfähigkeit war nur zu 1,4 % von PAR_{innen} und zu 21,1 % von der Lufttemperatur abhängig und zu 41 % mit der Photosyntheserate korreliert.

Die Photosyntheserate korrelierte zu 55,1 % mit PAR_{innen} . Die Photosyntheseraten der ungewässerten und der angegossenen Variante verliefen unterschiedlich (Abb. 95): Am 6. Mai 2003 kamen sie nach einem morgendlichen Anstieg an diesem Tag nicht über $15 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Vormittags assimilierte die angegossene Variante mehr CO_2 als die ungewässerte Variante. Ab 10:49 Uhr zeigten sich bei der angegossenen Variante für den Rest des Tages niedrigere Photosynthesewerte als bei der ungewässerten, was mit den geringeren Werten von Transpirationsrate und stomatärer Leitfähigkeit in Einklang stand, sich aber nicht sichtbar in der Blatttemperatur niederschlug. Hier fand ab 10:49 Uhr ein Mittagshitzeß statt. Am 8. Mai herrschte definitiv kein Mittagshitzeß. Als Grenze für den Stomataschluß und die Drosselung der PHS konnte für diesen Versuch eine Temperatur von 35°C gelten. Denn an diesem Tag assimilierten beide Varianten durchgängig mehr CO_2 als am 6. Mai wobei die angegossene Variante mit bis zu $28,4 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ mittags bzw. nachmittags deutlich höhere Photosynthesewerte als die ungewässerte mit durchschnittlich $12,7 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ hatte. Hier fand der vorhergehende Rückschluß seine Bestätigung, daß die angegossene Variante die aPAR vermehrt der Photosynthese zu Ungunsten der Blatttemperatur zufließen ließ, und die ungewässerte Variante die aPAR weniger in die PHS und mehr in die Wärmeabgabe fließen ließ.

Bezogen auf den Chlorophyllgehalt, der bei der angegossenen Variante während der zwei Meßtage nur leicht angestiegen und bei der ungewässerten Variante eher gefallen war, fand zum 8. Mai hin eine Annäherung der Photosyntheseverläufe zwischen den Varianten statt (Abb. 95), die zwar ähnlich den Stickstoffsteigerungsversuchen, aber in der Ausprägung lange nicht so extrem war. So assimilierte v.a. die angegossene Variante am 8. Mai um 15:24 Uhr immerhin $18,4 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, bezogen auf den Chlorophyllgehalt. Im Vergleich dazu brachte es die ungewässerte Variante auf $9,6 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ zum selben Zeitpunkt.

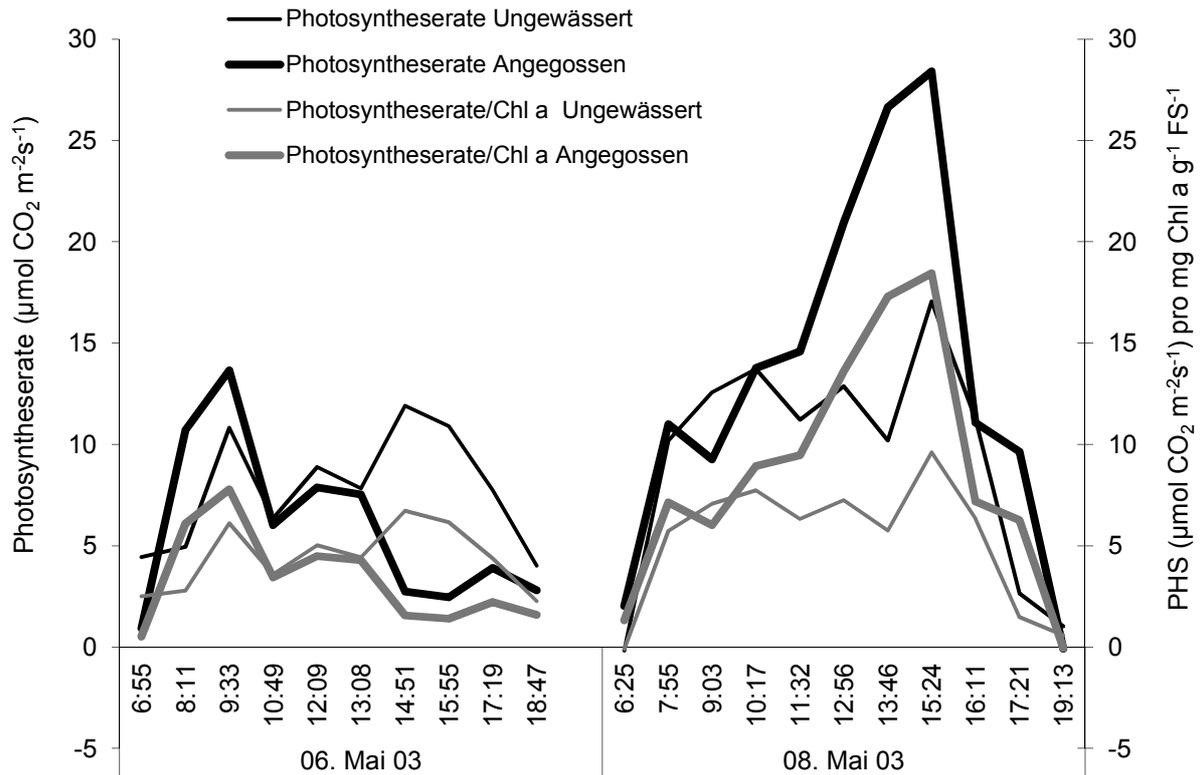


Abbildung 95. Verlauf der Photosyntheserate und Photosyntheserate/Chl a bei ungewässert und angegossener Variante im *Triticale* 'Modus'

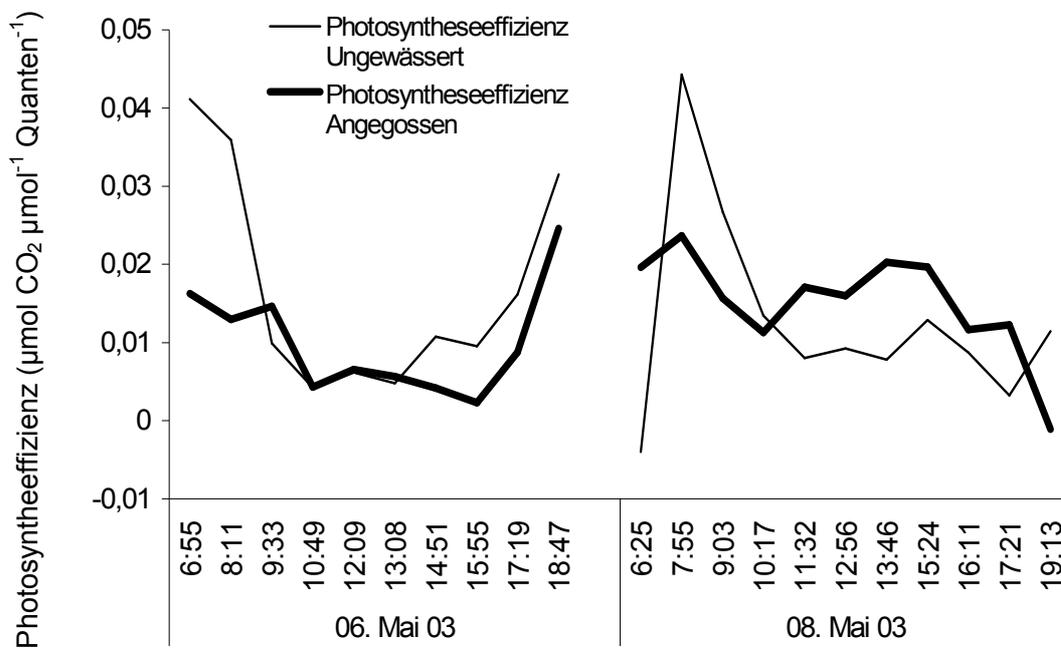


Abbildung 96. Verlauf der Photosyntheseeffizienz bei ungewässert und angegossener Variante im *Triticale* 'Modus'

Die Tagesgänge der Photosyntheseeffizienz waren flacher ausgeprägt als die der Photosyntheserate (Abb. 96). Der 6. Mai zeigte einen tendenziell u-förmigen Tagesgang vor allem aufgrund des Mittagshitzezustresses. Morgens und abends zeigten die Varianten verschiedene PE-Werte, wobei die ungewässerte höhere Werte hatte als die angegossene Variante. Zwischen 9:33 Uhr und 13:08 Uhr verliefen die Varianten gleich und unterschieden sich nicht signifikant. Am 8. Mai assimilierte die angegossene Variante meist effizienter CO_2 als die ungewässerte, mit zwei Ausnahmen: Zwischen 7:55 Uhr und 9:03 Uhr und ab 19:13 Uhr war es die angegossene Variante, die eine höhere PE betrieb. Die Verläufe der PE hatten danach bis 17:21 Uhr einen mehr oder weniger konstanten Verlauf: Bei der angegossenen Variante zeigte sich der Verlauf tendenziell hügelartig und auf höherem Niveau als am 6. Mai, v.a. deshalb, da hier ja kein bzw. nur sehr geringer Mittagshitzezustreß herrschte. Der Peak um 7:55 Uhr war bei der ungewässerten Variante weitaus stärker ausgeprägt als bei der angegossenen Variante und gilt als plausibilisiert, da beide Werte für die Berechnung der PE – PHS und $\text{PAR}_{\text{innen}}$ – von ein und demselben Gerät aufgenommen wurden und der Peak bei beiden Varianten auftrat. Aufgrund dieses Peaks und des darauffolgenden „konstanten“ Verlaufs konnte hier auf eine sehr milde Form des Mittagshitzezustresses rückgeschlossen werden.

Die CF war mit $\text{PAR}_{\text{außen}}$ zu 92,7 % korreliert (s. Anhang): Die Tagesgänge der CF folgten denen der PAR, mit einem Maximalwert von 0,97 bei der ungewässerten Variante und von 0,75 bei der angegossenen Variante um 12:56 Uhr am 8. Mai (Abb. 97). Morgens bis ca. 9 Uhr lagen die Werte der ungewässerten Variante über denen der angegossenen Variante. Früh morgens und v.a. ab dem Nachmittag bis in den Abend hinein unterschieden sich die Varianten bezüglich der CF nicht.

Die Drosselung der Photosyntheserate am 6. Mai 2003 aufgrund von hohen Temperaturen schien sich nicht auf den Verlauf der CF niederzuschlagen. Denn als sich die Photosyntheseraten der Varianten am 6. Mai von 13:08 Uhr bis 18:47 Uhr sehr unterschieden, waren die CF-Werte der ungewässerten Variante bis 14:51 Uhr höher als die der angegossenen Variante. Vormittags bis mittags aber, als die PHS-Werte der Varianten keine signifikanten Unterschiede zeigten, traten Unterschiede in der CF zwischen den Varianten zutage: Die ungewässerte Variante fluoreszierte dann weitaus stärker als die gewässerte. Dieses Verhalten ließ

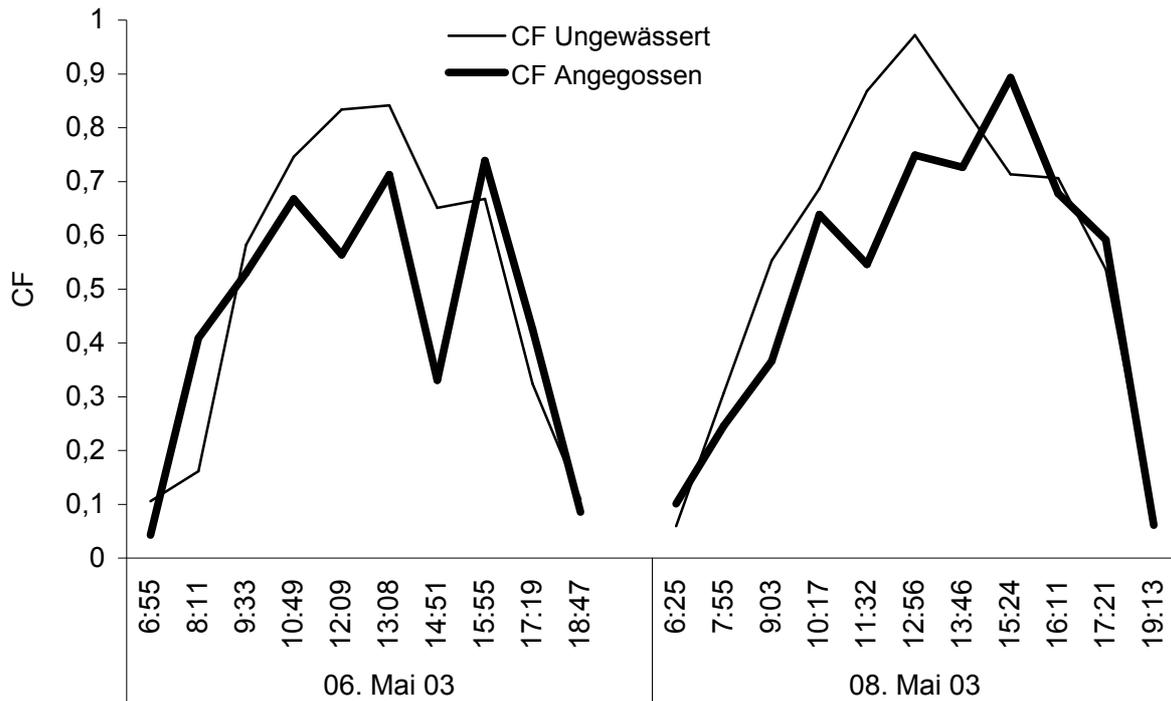


Abbildung 97. Verlauf der CF bei ungewässertter und angegossener Variante im *Triticale* 'Modus'

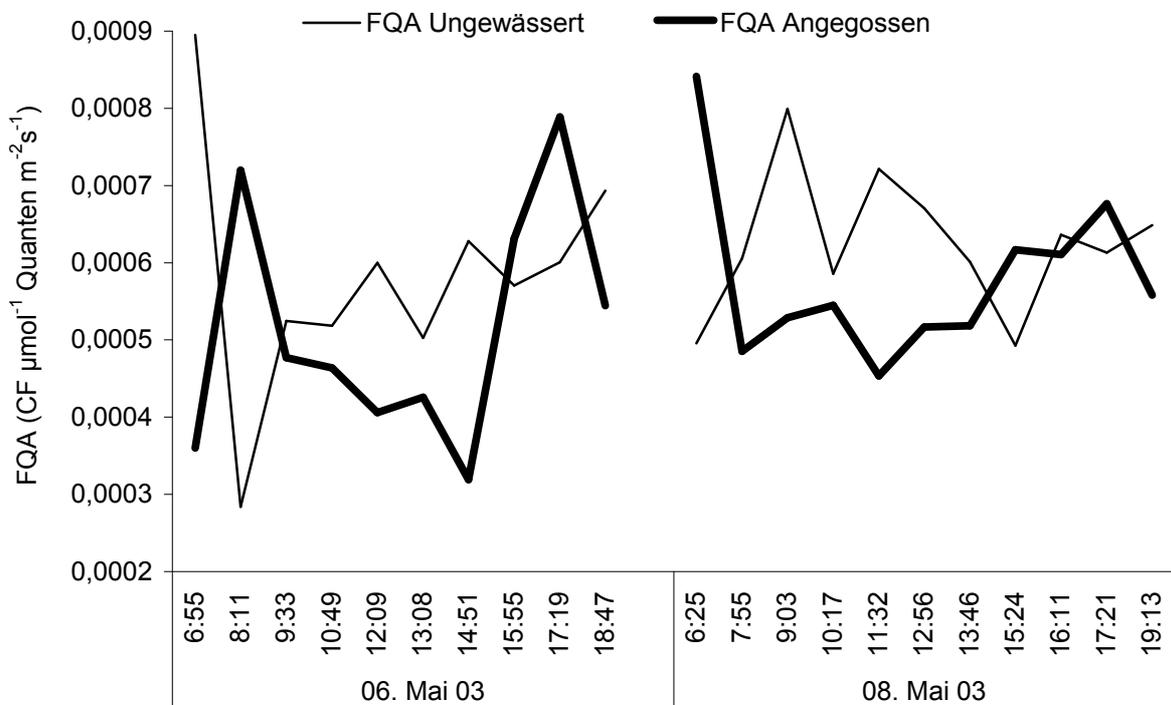


Abbildung 98. Verlauf der Fluoreszenzquantenausbeute (FQA) bei ungewässertter und angegossener Variante im *Triticale* 'Modus'

Rückschlüsse auf eine unterschiedlich stattfindende Umverteilung der aPAR um PSII in den Varianten zu. Im Zeitraum zwischen 15:55 und 18:47 Uhr wies die angegossene Variante eine geringfügig höhere CF bei einer geringeren PHS auf als die ungewässerte Variante.

Auch am 8. Mai konnte von einer Umverteilung der aPAR im PSII ausgegangen werden: Die angegossene Variante assimilierte ab 11:32 Uhr weitaus mehr CO₂ und fluoreszierte dabei zeitweise schwächer als die ungewässerte Variante. Diese betrieb am Nachmittag eine höhere PHS als die angegossene Variante, welche dafür aber nur geringfügig schwächer als diese fluoreszierte.

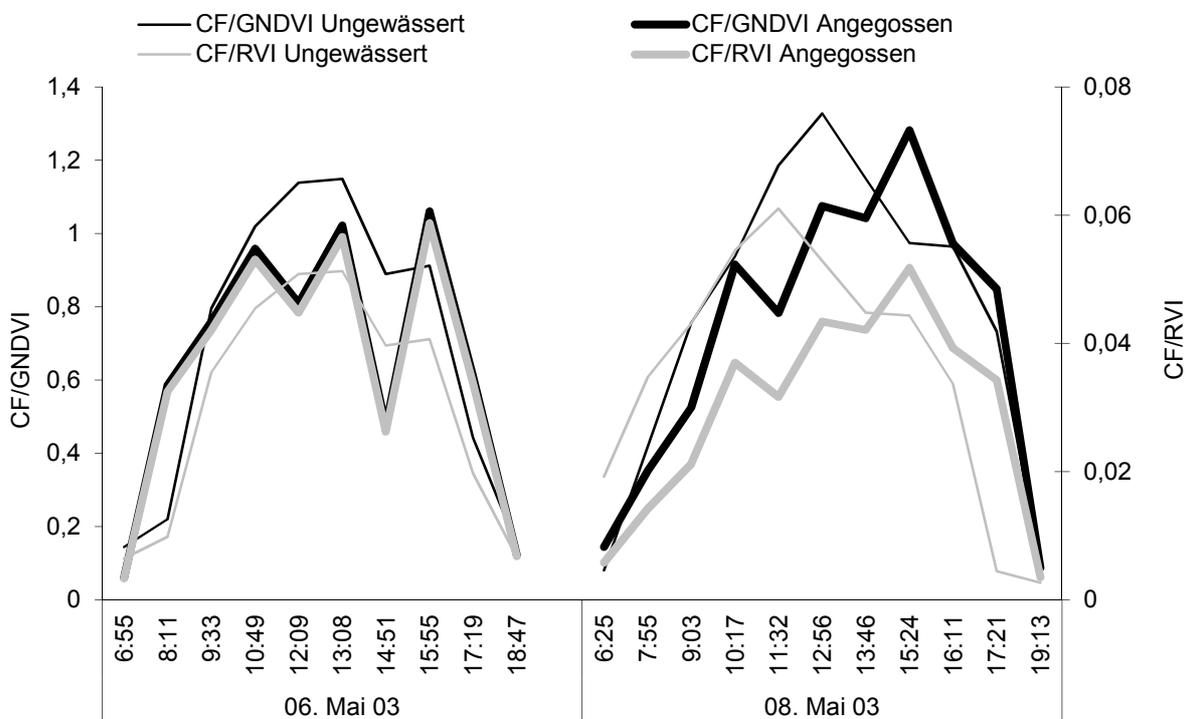


Abbildung 99. Verlauf der Quotienten CF/GNDVI und CF/RVI bei ungewässert und angegossener Variante im *Triticale* 'Modus'

Die Verläufe der Fluoreszenzquantenausbeute (Abb. 98) zeigten starke Inhomogenitäten. Die ungewässerte Variante fluoreszierte am ersten Meßtag während der Mittagszeit und am zweiten Meßtag vormittags weitaus stärker pro μmol eingestrahlt Lichtquanten $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ als die ungewässerte, und zwar auch hier unabhängig davon, ob die PHS aufgrund von Mittagshitze gestreß gedrosselt wurde oder nicht. Die FQA-Verläufe der Morgen- und auch der Abendmessungen in abgeschwächter Form waren durch sehr große Amplituden gekennzeichnet. Ein

Grund hierfür war, daß bei einer schnell ansteigenden PAR die angegossene Variante am Morgen des 6. Mai um 6:55 Uhr zuerst bemessen wurde, am 8. Mai um 6:25 Uhr war die ungewässerte Variante die erstbemessene. Entsprechend war auch der erste Morgenwert am 8. Mai 2003 verschoben. Bei schnell absinkender PAR am Abend traten die Amplituden ebenso dementsprechend auf, da auch hier die Varianten alternierend als erstes pro Meßdurchlauf gemessen wurden.

Die Verläufe von CF/GNDVI und CF/RVI (Abb. 99) waren bei beiden Varianten an beiden Meßtagen mit denen der CF identisch, verliefen aber auf einem anderem Niveau: Am ersten Meßtag hatte die ungewässerte Variante tagsüber höhere CF/GNDVI-Werte als die angegossene Variante. Am zweiten Meßtag war dies nur bis einschließlich 13:46 Uhr der Fall. Danach hatte die angegossene Variante z.T. höhere Werte als die ungewässerte Variante. Die Verläufe der CF/GNDVI der Varianten drifteten durch die Validierung auf den GNDVI am ersten Meßtag etwas auseinander. Am zweiten Meßtag näherten sie sich wieder leicht an. Die sehr geringe Veränderung des GNDVIs durch einen veränderten Chlorophyllgehalt an diesen beiden Meßtagen hatte also einen entsprechend schwachen Effekt auf die CF relativiert auf den GNDVI bei den Varianten.

Dafür waren die Verläufe von CF/RVI (Abb. 99) zwischen den Varianten durch die Relativierung mehr verschoben: So fluoreszierte die ungewässerte Variante am 6. Mai, bezogen auf die Blattfläche, bis auf zwei Zeitpunkte (12:09 Uhr und 14:51 Uhr) schwächer als die angegossene Variante. Am 8. Mai hatte die ungewässerte Variante bis 13:46 Uhr weitaus höhere CF/RVI-Werte aufzuweisen als die angegossene Variante, bis zum Abend hin waren sie dann weitaus niedriger.

Während der PRI am 6. Mai zu 62 % mit $PAR_{\text{außen}}$ korreliert war, waren es am 8. Mai nur 41 %. Die z.T. inhomogenen Verläufe des PRI (Abb. 100) unterschieden sich an beiden Meßtagen folgendermaßen: Der höhere, entfernt hügelartige Verlauf des PRI ging invers am ersten Meßtag mit der durch Mittaghitze durchgedrosselten PHS einher, was auf eine Umleitung der PAR in den Xanthophyllzyklus noch vor dem Auftreffen auf das PSII schließen ließ. Der PRI der angegossenen Variante lag am 6. Mai bis 14:51 Uhr und ab 17:19 Uhr über dem der ungewässerten Variante, zwischendurch war der PRI der ungewässerten Variante kurzfristig höher. In diesem Zeitfenster waren auch folgende Merkmale bei der ungewässerten

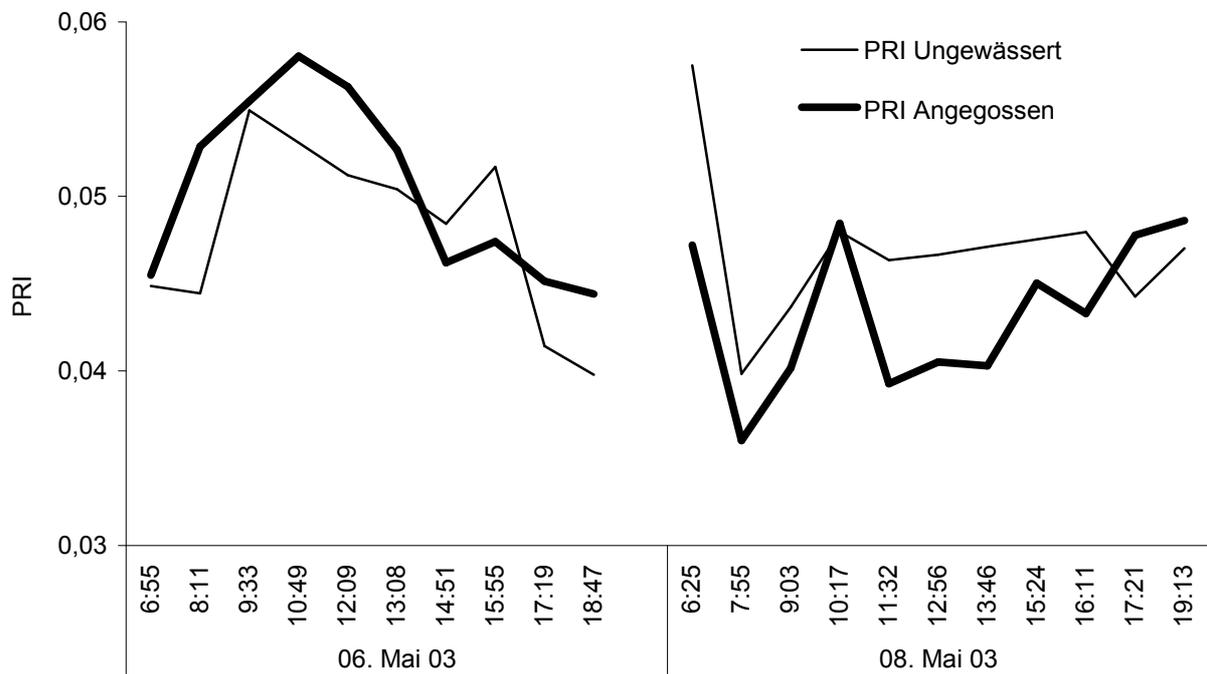


Abbildung 100. Verlauf des PRI bei ungewässert und angegossener Variante im *Triticale* 'Modus'

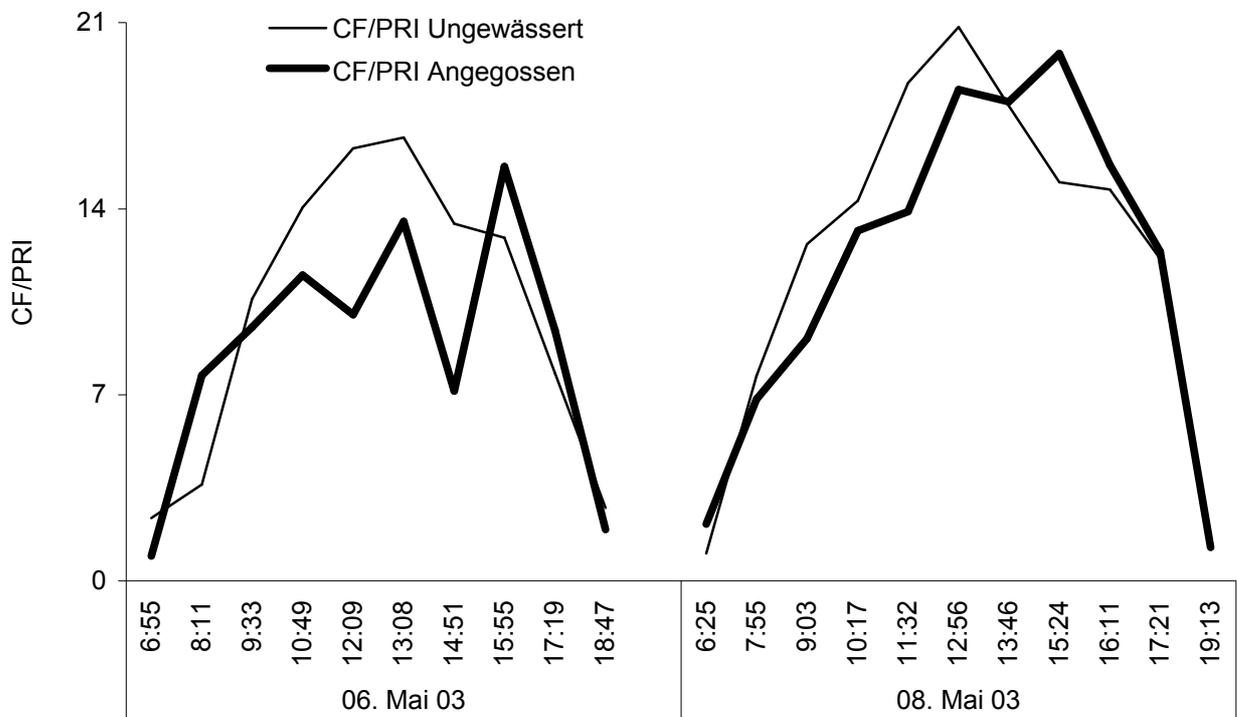


Abbildung 101. Verlauf von CF/PRI bei ungewässert und angegossener Variante im *Triticale* 'Modus'

Variante stärker ausgeprägt als bei der angegossenen Variante: Stomatäre Leitfähigkeit, Transpirationsrate, PHS, PE, während die Blatttemperatur geringer war und es bei CF sowie FQA keine klare Tendenz gab. Die Verläufe des PRI am 8. Mai waren bis einschließlich 10:17 Uhr von großen Amplituden gekennzeichnet, ab dann verlief der PRI der ungewässerten Variante auf einem mehr oder weniger konstanten Niveau, während der PRI der angegossenen Variante von 0,039 um 11:32 Uhr auf 0,049 um 19:13 Uhr anstieg. Dabei lag der PRI der ungewässerten Variante über dem der gewässerten Variante, mit Ausnahme der Messung um 10:17 Uhr und den letzten beiden Messungen des Tages. Generell begannen sich am 8. Mai die Sekundärfolgen einer erhöhten Wasserverfügbarkeit bei der angegossenen Variante auch in einem niedrigen PRI und einer höheren CF niederzuschlagen, während der PRI bei der ungewässerten Variante höher und die CF geringer ausgeprägt waren. Der PRI der angegossenen Variante zeigte um 10:17 Uhr einen Peak von 0,048, einem Zeitpunkt, an dem auch die ungewässerte Variante einen kleinen Peak auch mit 0,048 hatte. Was diesen Anstieg des PRI bei der angegossenen Variante ausgelöst haben könnte, war an keinem der anderen gemessenen Parameter nachvollziehbar.

Die Verläufe von CF/PRI waren ähnlich ausgeprägt wie die der CF (Abb. 101): Zwischen 9:33 Uhr und 15:55 Uhr am 6. Mai und 7:55 Uhr und 13:46 Uhr am 8. Mai waren die Werte der ungewässerten Variante um durchschnittlich 3,2 Einheiten höher als die der angegossenen. Bezeichnenderweise lagen die Werte der angegossenen Variante ab 13:46 Uhr am 8. Mai um durchschnittlich 1,5 Einheiten über denen der ungewässerten Variante. Auch hier verschoben sich zu diesem Zeitpunkt die CF und der PRI, aber kein anderer der bemessenen Faktoren.

In diesem Versuch konnte an den beiden Meßtagen ein unterschiedlicher Ausprägungsgrad der unmittelbaren und mittelbaren Folgen einer unterschiedlichen Bewässerung erfolgreich induziert und untersucht werden. Hier wurde auch gezeigt, daß die CF als Parameter allein für die PHS ihre Grenzen hat, denn die Drosselung der PHS im Mittagshitzeß schlug sich nicht im Verlauf der CF nieder, was sich auch aus dem Vergleich der beiden Meßtage ableiten ließ. Denn wäre eine vermehrte Ableitung der überschüssigen aPAR in die CF während der Zeit des Mittagshitzeßes erfolgt, wären die Verläufe der CF zu diesem Zeitpunkt höher. Offenbar wurde hier die überschüssige Sonnenenergie über andere bemessene

Prozesse, z.B. den PRI, die Blatttemperatur oder auch nicht bemessene und z.T. unbekannte Prozesse, z.B. andere Chlorophyllfluoreszenzen usw., abgegeben.

3.5.2 Sekundärfolgen von Wassermangel

a) Sommerweizen unter kontrollierten Bedingungen

In der Sommerweizensorte 'Triso' wurden unter kontrollierten Bedingungen unter einem mit Regensensoren ausgestatteten Rollhaus die Sekundärfolgen von Wassermangel bei der unbewässerten Variante erfolgreich induziert. Nach drei Wochen abweichender Bewässerung unterschieden sich die Varianten „Bewässert“ und „Unbewässert“ vor allem in folgenden Merkmalen: Neben stark gerollten Blättern hatte die unbewässerte Variante mit durchschnittlich 47,33 cm eine geringere Wuchshöhe als die bewässerte Variante und eine grüngelbe Farbe, was mit geringeren Werten von Spadmeter, Chlorophyll- und Stickstoffkonzentrationen einherging (Tab. 21). Die bewässerte Kontrolle zeichnete sich durch eine Höhe von 69,67 cm, einem fetten Wuchs, eine dunkelgrüne Farbe sowie höheren Werten von Spadmeter, Chlorophyll- und Stickstoffkonzentrationen aus. Bemessen wurde ein ganzer Tagesgang am 25. August 2003.

Tabelle 21. Bestandesdaten der Sommerweizensorte 'Triso' (25. August 2003)

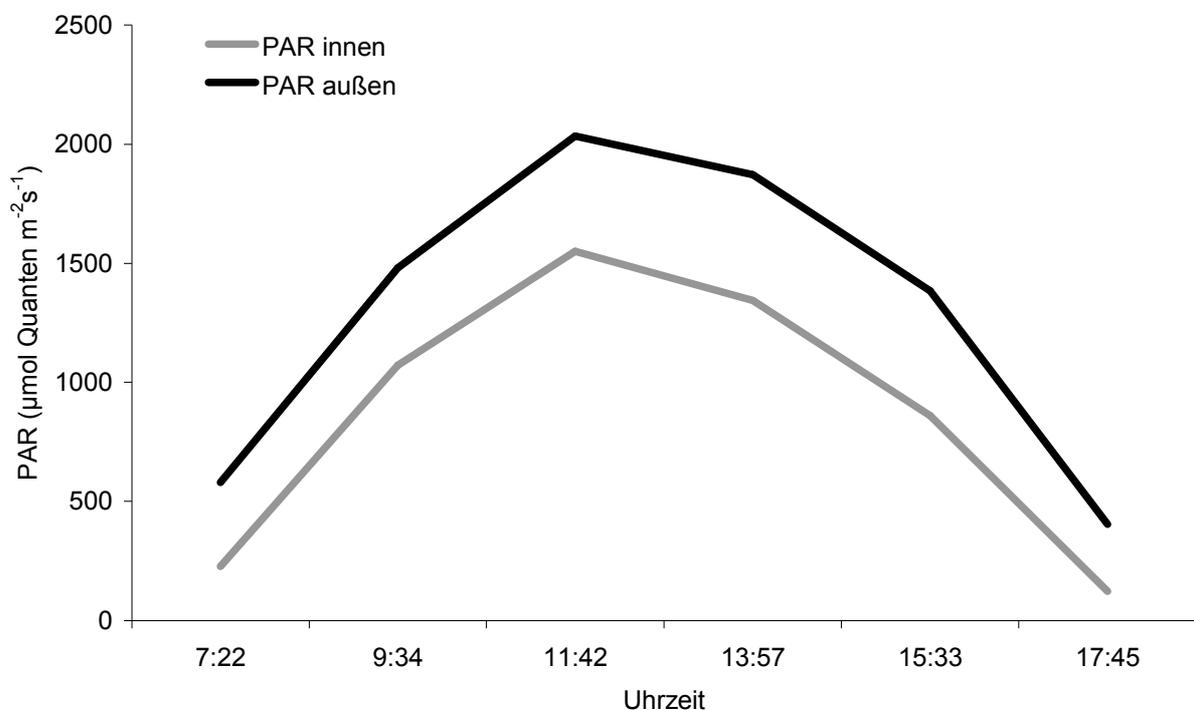
Variante	Unbewässert	Bewässert
Bewässerung	0 l m ⁻² d ⁻¹	20 l m ⁻² d ⁻¹
Blätter	gerollt	glatt
Höhe in cm	47,33	69,67
Farbe	grün mit gelb, trockene Stellen	grünblau
N-Tester	655	705
N-Gesamtgehalt (%)	3,11	3,48
Chlorophyll a (mg g⁻¹ FS⁻¹)	2,01	2,55
Chlorophyll b (mg g⁻¹ FS⁻¹)	0,55	0,63
Chlorophyll a+b (mg g⁻¹ FS⁻¹)	2,56	3,18

Die Unterschiede zwischen den Varianten schlugen sich auch in den Werten der tageskonstanten Vegetationsindizes nieder: Die Mittagswerte der tageskonstanten Vegetationsindizes waren bei der bewässerten Kontrolle höher als die der unbewässerten Variante, sowie auch die der RG-Ratio (Tab. 22). Die tageskonstanten Vegetationsindizes waren zu durchschnittlich 77 % mit der Variante korreliert. Beim Vergleich mit den Ergebnissen der Stickstoffsteigerungsversuche fanden sich ähnliche Ergebnisse bei den Folgen einer verminderten N-Düngung und den Sekundärfolgen von Wassermangel.

Tabelle 22. Mittagswerte der Vegetationsindizes REIP, RVI, GNDVI und RG-Ratio der Sommerweizensorte 'Triso' (25. August 2003)

	REIP	RVI	GNDVI	RG-Ratio
Wassermangel	724,1	7,71	0,65	1,48
Bewässert	725,9	10,75	0,71	1,66

Die photosynthetisch aktive Strahlung (PAR_{innen} und $PAR_{\text{außen}}$) zeigte den Verlauf entsprechend eines wolkenlosen, strahlungsreichen Tages mit einem gemessenen Maximum von $2.034 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ um 11:24 Uhr ($PAR_{\text{außen}}$, s. Abb. 102). PAR_{innen} und $PAR_{\text{außen}}$ unterschieden sich mit durchschnittlich $429 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ beträchtlich voneinander, was evtl. auf den niedrigeren Sonnenstand und dem damit verbundenen größeren Schattenwurf in der Blattkammer des LI-COR 6400 zurückzuführen war, dessen Meßkopf immer exakt horizontal ausgerichtet war. Die Lufttemperatur stieg kontinuierlich von $19 \text{ }^{\circ}\text{C}$ um 7:22 Uhr auf $30,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ um 17:45 Uhr an (Abb. 103) und war zu 23 % mit PAR_{innen} korreliert (s. Anhang). Tagsüber hatte die unbewässerte Variante teilweise geringfügig niedrigere Blatttemperaturen als die bewässerte Variante, z.B. um 9:34 Uhr mit einer Differenz von $0,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Um 7:22 Uhr und um 17:45 Uhr waren

Abbildung 102. Verlauf von PAR_{innen} und $PAR_{\text{außen}}$ (25. August 2003)

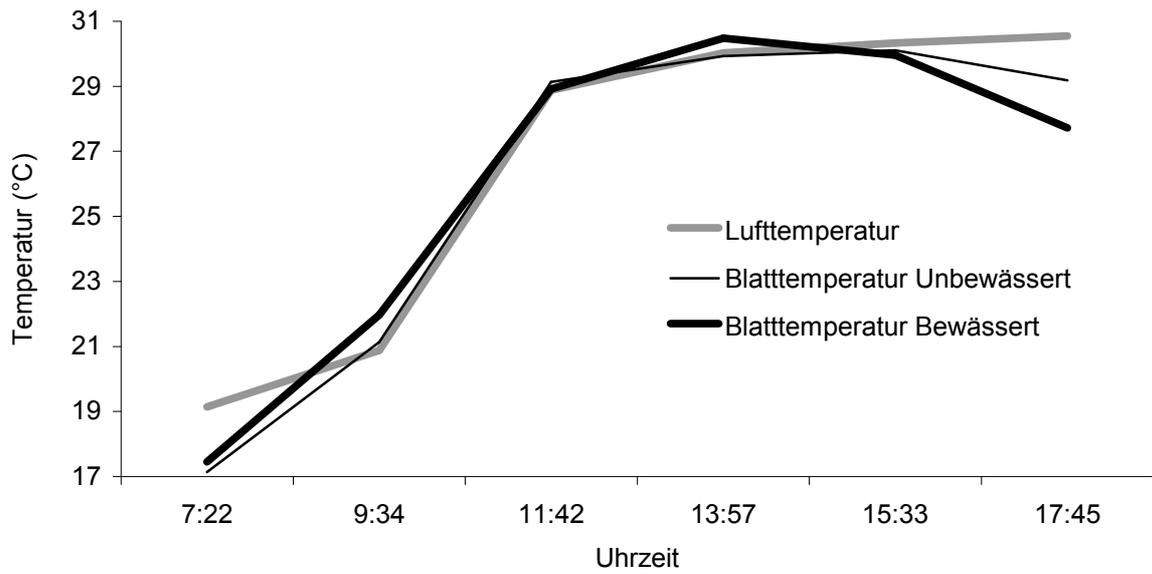


Abbildung 103. Verlauf von Luft- und Blatttemperaturen von bewässerter und unbewässerter Variante der Sommerweizensorte 'Triso' (25. August 2003)

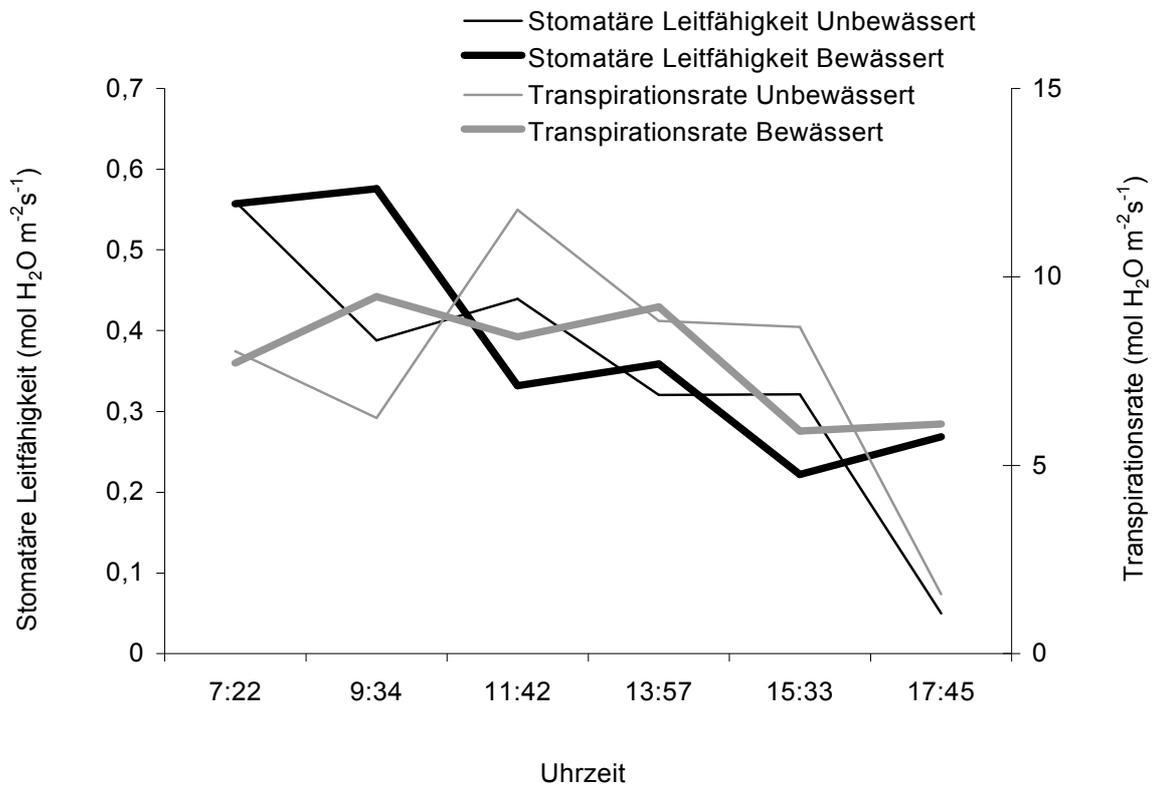


Abbildung 104. Verlauf von stomatärer Leitfähigkeit und Transpirationsrate von bewässerter und unbewässerter Variante der Sommerweizensorte 'Triso' (25. August 2003)

die Blatttemperaturen um ca. 2 °C niedriger als die Lufttemperatur, wobei die bewässerte Variante abends wiederum eine um 1,5 °C niedrigere Blatttemperatur hatte als die unbewässerte Variante.

Die stomatäre Leitfähigkeit nahm bei beiden Varianten von morgens bis abends mit zunehmender Lufttemperatur von durchschnittlich 0,56 auf 0,16 mol H₂O m⁻²s⁻¹ ab (Abb. 104), wobei die Korrelation 51,3 % betrug. Die durchschnittliche Transpirationsrate (Abb. 104) aber wuchs bis 11:42 Uhr von 7,87 auf 10,09 mol H₂O m⁻²s⁻¹ an, bis zum Abend hin wurde sie wieder geringer, bis zu einem Wert von 3,84 mol H₂O m⁻²s⁻¹ um 17:45 Uhr. Stomatäre Leitfähigkeit und Transpirationsrate waren zu 79,3 % miteinander korreliert, wobei die Transpiration mehr von PAR_{innen} (47,6 %) und weniger von der Lufttemperatur (1,7 %) abzuhängen schien. Der zickzackförmige Verlauf beider Faktoren war mit hoher Wahrscheinlichkeit meßbedingt, da die Varianten abwechselnd zuerst pro Meßgang bemessen wurden, d.h. um 11:42 Uhr war zuerst die unbewässerte, dann die bewässerte dran und um 13:57 Uhr zuerst die bewässerte und danach die unbewässerte. Eine Variantenabhängigkeit von stomatärer Leitfähigkeit mit 10,1 % bzw. von der Transpirationsrate mit 4,2 % war nicht gegeben.

Die Photosyntheserate (Abb. 105) war zu 81 % mit PAR_{innen} korreliert. Sie war signifikant mit der Transpirationsrate (79,2 %) und mit der stomatären Leitfähigkeit (44,8 %) korreliert. Bei der unbewässerten Variante wurde ein Maximum von 24,23 µmol CO₂ m⁻²s⁻¹ um 11:42 Uhr gemessen. Ab 13:57 Uhr nahm die PHS bis zum Abend hin kontinuierlich ab. Von 9:34 Uhr bis 15:33 Uhr assimilierte die unbewässerte Variante um durchschnittlich 4,07 µmol CO₂ m⁻²s⁻¹ mehr als die bewässerte Variante. Zur letzten Messung um 17:45 Uhr waren die Werte der unbewässerten Variante bereits negativ, wohl aufgrunddessen, daß diese Variante zuletzt bemessen wurde und zu diesem Zeitpunkt schon der Lichtkompensationspunkt unterschritten war. Dieser Meßtag war ein mittagshitzestressfreier Tag.

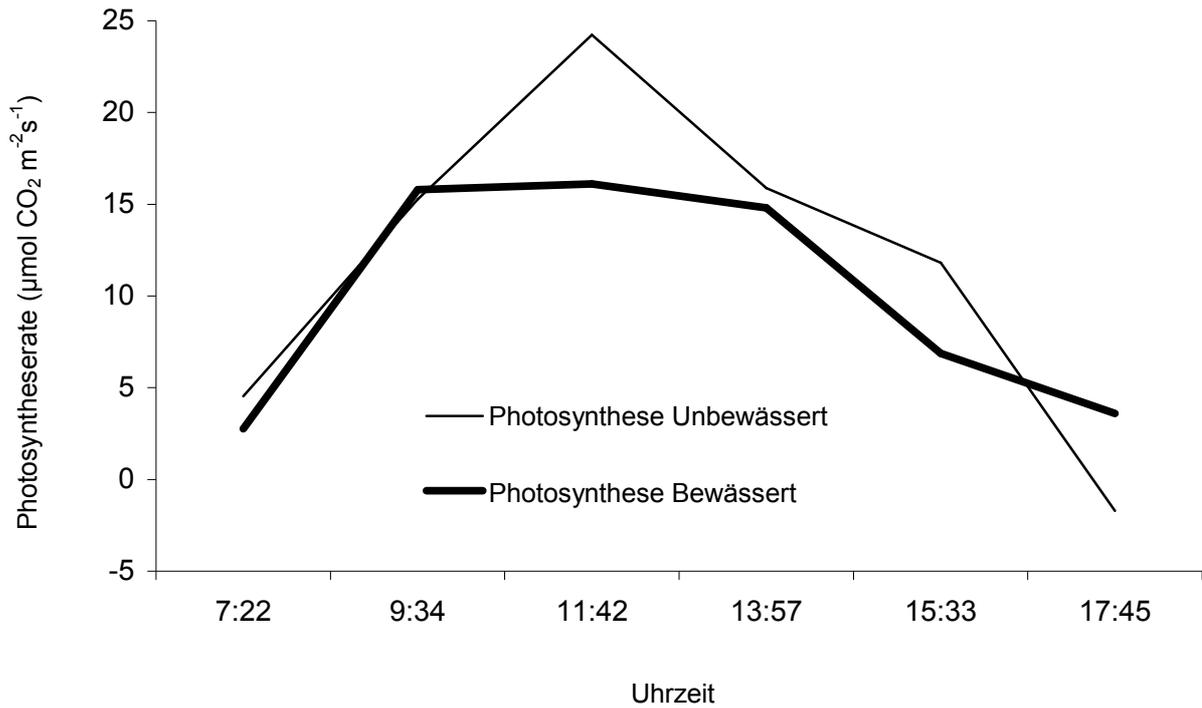


Abbildung 105. Verlauf der Photosyntheserate von bewässerter und unbewässerter Variante der Sommerweizensorte 'Triso' (25. August 2003)

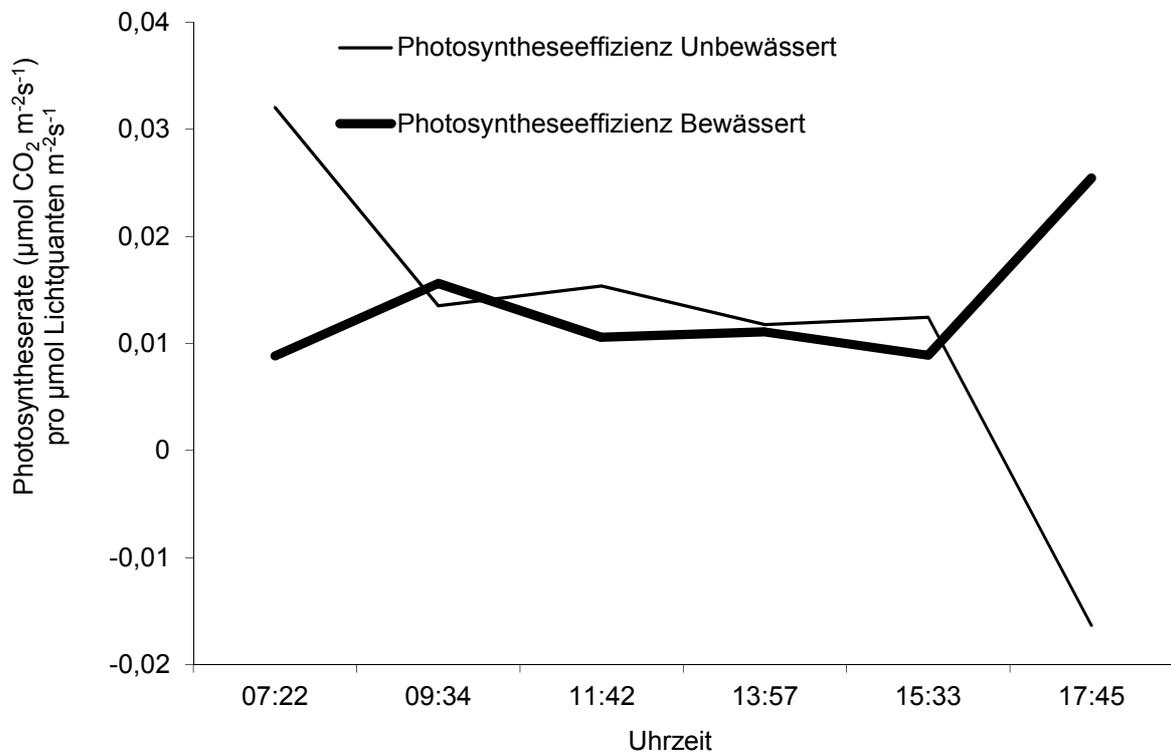


Abbildung 106. Verlauf der Photosyntheseeffizienz von bewässerter und unbewässerter Variante der Sommerweizensorte 'Triso' (25. August 2003)

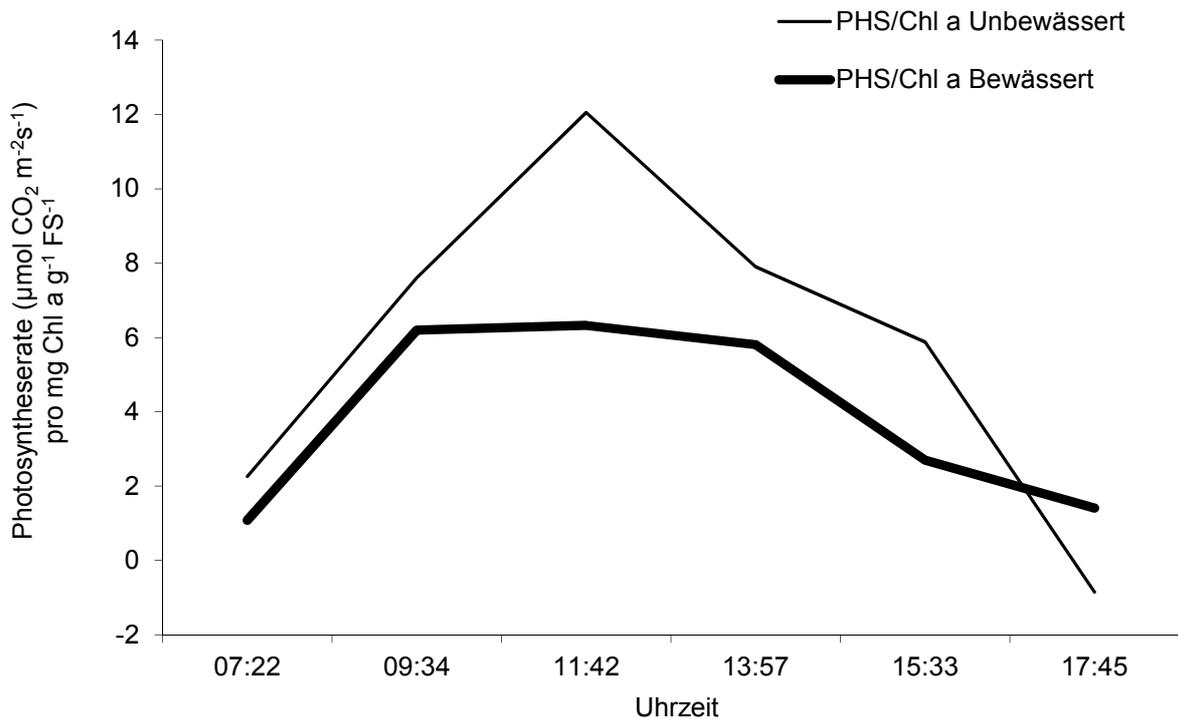


Abbildung 107. Verlauf der Photosyntheserate bezogen auf den Gehalt an Chlorophyll a von bewässelter und unbewässelter Variante der Sommerweizensorte 'Triso' (25. August 2003)

Auch bei der Photosyntheseeffizienz (Abb. 106) zeigten sich signifikante Korrelationen zur stomatären Leitfähigkeit (56,7 %) und zur Transpirationsrate (49,9 %, s. Anhang). Die PE nahm bei beiden Varianten zwischen 9:34 Uhr und 15:00 Uhr leicht ab, wobei die unbewässerte Variante zwischen 11:42 Uhr und 15:33 Uhr um durchschnittlich $0,05 \mu\text{mol CO}_2 \mu\text{mol}^{-1} \text{Quanten}^{-1}$ mehr assimilierte als die bewässerte Variante. Auch hier war der Abendwert der unbewässerten Variante entsprechend negativ.

Grundsätzlich hatte die Relativierung auf den Chlorophyllgehalt den Abstand zwischen Kurven der Varianten vergrößert, Ausnahme war hier die negative Abendmessung der unbewässerten Variante. Diese assimilierte, bezogen auf den Gehalt an Chlorophylls a, bis maximal ca. $6 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (um 11:40 Uhr) mehr als die bewässerte Variante (Abb. 107).

Beide Tagesgänge der CF waren hügelartig und zeigten keine Unregelmäßigkeiten (Abb. 108). Dabei fluoreszierte die bewässerte Variante um durchschnittlich 0,084 Einheiten stärker als die unbewässerte Variante, wobei sich

die Kurven der Varianten nicht berührten. CF und $PAR_{\text{außen}}$ korrelierten zu 89,2 % miteinander, CF und Photosyntheserate zu 73 %.

Die Fluoreszenzquantenausbeute nahm im Laufe des Meßtages um durchschnittlich 0,0003 Einheiten ab, wobei diese zu 61,5 % negativ mit der Lufttemperatur, aber nur zu 21,2 % mit $PAR_{\text{außen}}$ korreliert war (Abb. 108). Auch hier fluoreszierte die unbewässerte Variante tagsüber schwächer als die bewässerte, bezogen auf die Sonneneinstrahlung. Die FQA der unbewässerten Variante war zwischen 9:34 Uhr und 15:33 Uhr geringer als die der bewässerten Variante. Bei der letzten Messung um 17:45 Uhr aber war sie höher – wiederum ein Effekt, der mit den alternierenden Messungen mit dem Photosynthesemeßgerät (für die $PAR_{\text{außen}}$) zusammenhing.

Die Tagesgänge von CF/GNDVI (Abb. 109) hatten den gleichen hügelartigen Verlauf wie die Tagesgänge der CF, wobei die Tagesgänge der Varianten näher beieinander lagen als die Tagesgänge von CF. Dabei hatte die gewässerte Variante um durchschnittlich 0,07 Einheiten höhere Werte und fluoreszierte so durchgehend stärker als die unbewässerte Variante, bezogen auf den GNDVI.

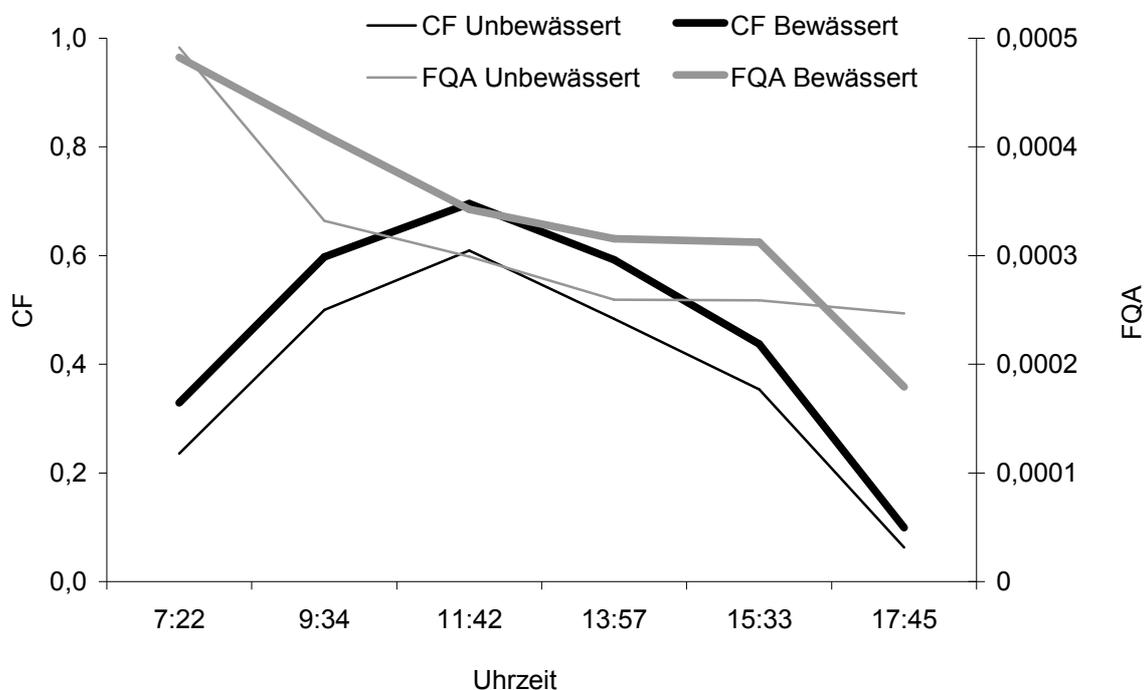


Abbildung 108. Verlauf von CF und FQA (=CF pro $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) von bewässelter und unbewässelter Variante der Sommerweizensorte 'Triso' (25. August 2003)

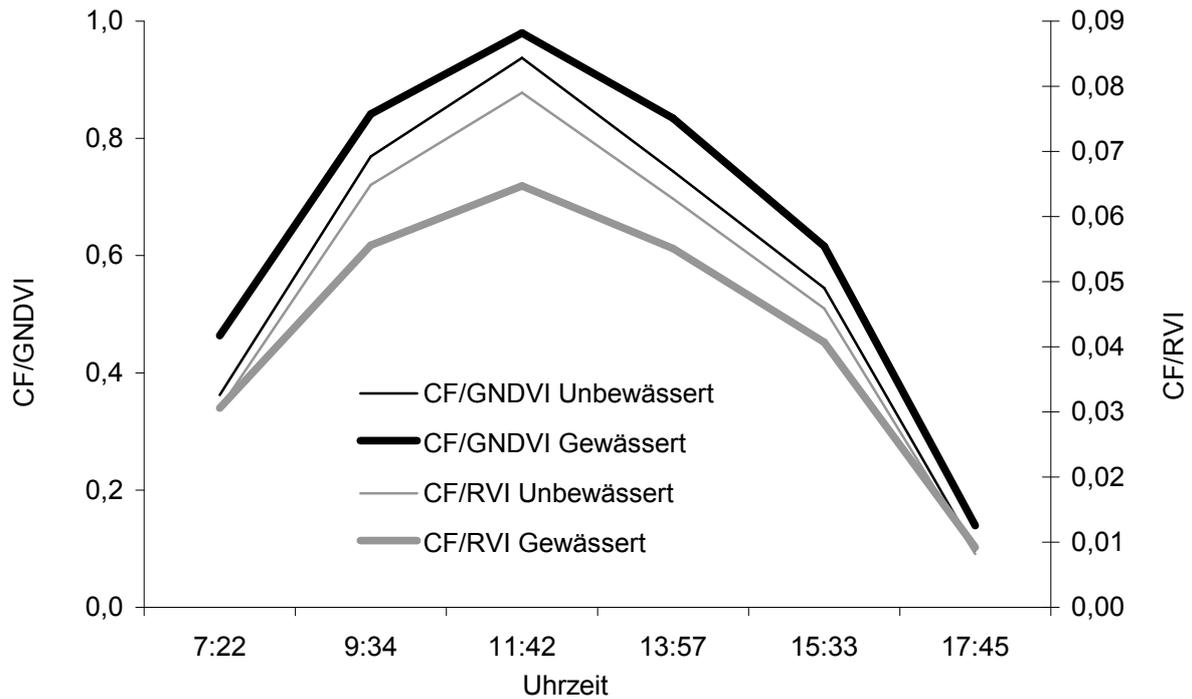


Abbildung 109. Verlauf von CF/RVI und CF/GNDVI von bewässerter und unbewässerter Variante der Sommerweizensorte 'Triso' (25. August 2003)

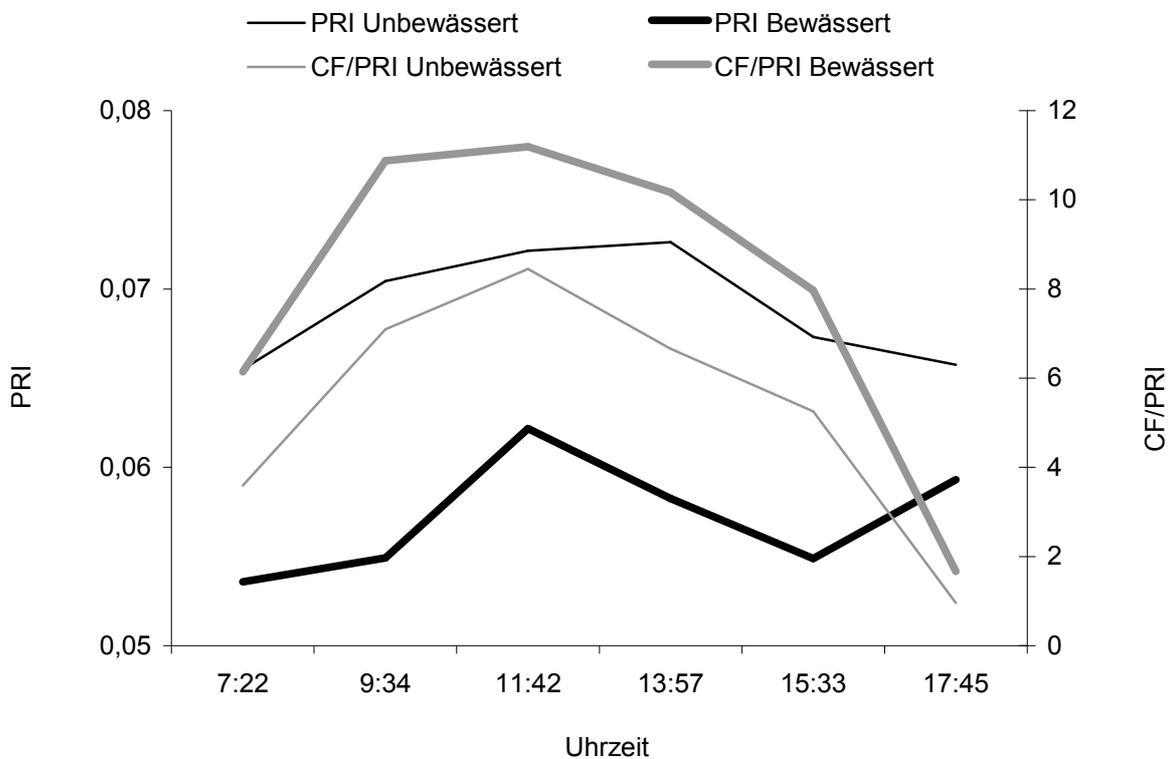


Abbildung 110. Verlauf von PRI und CF/PRI von bewässerter und unbewässerter Variante der Sommerweizensorte 'Triso' (25. August 2003)

Auch die Tagesgänge von CF/RVI waren wie die der CF geformt (Abb. 109). Die Werte der bewässerten Variante aber lagen hier um durchschnittlich 0,06 Einheiten unter denen der unbewässerten Variante. Demnach fluoreszierte die bewässerte Variante, relativiert auf die Biomasse durch den RVI, schwächer als die unbewässerte Variante.

Der Tagesgang des PRI zeigte bei beiden Varianten einen leichten Anstieg bis Mittag, bis 15:33 Uhr einen geringen Abfall und zum Abend hin wieder einen leichten Anstieg bei der bewässerten Variante (Abb. 110). Dabei war der PRI zu 25 % mit der Photosyntheserate und zu 20 % mit $PAR_{\text{außen}}$ korreliert. Die Werte der unbewässerten Variante lagen um durchschnittlich 0,012 Einheiten über denen der bewässerten Variante. Ähnliche, aber ausgeprägtere Ergebnisse fanden sich bei den Stickstoffsteigerungsversuchen im Winterweizen, bei dem die N-Mangel-Variante einen um ca. 0,022 Einheiten höheren PRI aufwies als die hochgedüngte.

Die Tagesgänge des Quotienten CF/PRI differenzierten weitaus deutlicher zwischen den Varianten als die der CF (Abb. 11), wobei der hügelförmige Verlauf durch die CF verstärkt wurde. Die bewässerte Kontrolle fluoreszierte um 2,7 Einheiten, bezogen auf die Aktivität des Xanthophyllzyklus, stärker als die unbewässerte Variante.

In diesem Versuch konnten die Sekundärfolgen von Wassermangel durch eine unterschiedliche Bewässerung unter kontrollierten Bedingungen erfolgreich induziert werden. Die Veränderungen konnten sowohl auf physischer als auch auf spektrometrischer Ebene gemessen werden. Die Symptome ähnelten in ihrer Ausprägung sehr denen der Stickstoffsteigerungsversuche, obwohl diese durch einen anderen Streßfaktor hervorgerufen wurden. Hier konnte durch die geringe Wasserverfügbarkeit nur vermindert Stickstoff aufgenommen und dadurch weniger Chlorophyll aufgebaut werden, was sich wiederum mittelfristig auf den Wuchs, die Blattfarbe usw. und somit auf die gemessenen Daten entsprechend niederschlug.

b) Sekundärfolgen von Wassermangel bei Winterweizen

Dieser Versuch wurde auf einer landwirtschaftlich genutzten Ackerfläche durchgeführt, deren Boden sich durch starke Inhomogenitäten bezüglich der Wasserverfügbarkeit auszeichnete. Die darauf angebaute Winterweizensorte 'Ludwig' wies folgende Merkmale bezüglich Wuchs, Bestandesdichte und Farbe auf: Die als „Kontrolle“ eingeteilte Variante wuchs in Bereichen mit ausreichender

Wasserverfügbarkeit und zeichnete sich durch einen fetten Wuchs, sattgrüne Farbe und einen dichten Bestand aus. Die Variante „Wassermangel“, die in Bereichen mit einer geringeren Wasserverfügbarkeit zu finden war, hatte einen schwächeren Wuchs, war eher gelblich grün und hatte eine geringere Bestandesdichte.

Tabelle 23. Wasser-, N- und Chlorophyllgehalte der Wassermangelvariante und der Kontrolle der Winterweizensorte 'Ludwig' (16. Mai 2003)

Variante	Etage	LFM	Chl a (mg g ⁻¹ FS ⁻¹)	Chl b (mg g ⁻¹ FS ⁻¹)	Chl a+b (mg g ⁻¹ FS ⁻¹)	N (%)
Kontrolle	F	3,20	1,73	0,47	2,39	1,53
	F-1	3,13	2,24	0,68	3,17	3,00
Wassermangel	F	2,43	1,72	0,44	2,33	2,84
	F-1	2,58	1,85	0,51	2,56	2,14

Die Kontrolle hatte unter anderem einen um durchschnittlich 0,56 Einheiten höheren LFM (Leaf Fuel Mass Index, s. Tab. 23) als die Wassermangelvariante, was auf einen höheren Wassergehalt in den Blättern der Kontrolle hinwies. Die erste Blattetage hatte bei der Kontrolle mit 3,20 einen höheren LFM als die zweite Blattetage mit 3,13 (Tab. 23), während der LFM der Wassermangelvariante mit einem LFM von 2,43 in der ersten und 2,58 in der zweiten Blattetage weitaus niedrigere Werte hatte. Die Kontrolle enthielt mit 2,78 mg Chl a+b g⁻¹ FS⁻¹ geringfügig mehr Chlorophyll als die Wassermangelvariante mit 2,45 mg Chl a+b g⁻¹ FS⁻¹ (Tab. 23), wobei die 2. Blattetage bei beiden Varianten einen höheren Chlorophyllgehalt aufwies als die 1. Blattetage. Die Wassermangelvariante enthielt im Fahnenblatt um durchschnittlich 1,31 % mehr Stickstoff als die Kontrolle und in der 2. Blattetage mit 2,14 % aber weniger als die Kontrolle mit 3,00 % (Tab. 23). Hier hatten sich bereits die Sekundärfolgen von länger andauerndem Wassermangel bei der Wassermangelvariante etabliert.

Tabelle 24. Mittagswerte von REIP, RVI, GNDVI und RG-Ratio bei Wassermangelvariante und ungestreifter Kontrolle der Winterweizensorte 'Ludwig' (16. Mai 2003)

	REIP	RVI	GNDVI	RG-Ratio
Kontrolle	725,63	24,51	0,78	2,71
Wassermangel	722,07	12,83	0,68	2,22

Die Mittagswerte aller in Tabelle 24 aufgeführten tageskonstanten Vegetationsindizes lagen bei der Kontrolle über denen der Wassermangelvariante, was für eine höhere Biomasse, höhere Anthocyan-, Chlorophyll- und

Stickstoffgehalte sowie einen höheren Blattflächenindex bei der ungestreßten Kontrolle als bei der Wassermangelvariante sprach.

Der 16. Mai 2003 war ein wolkenfreier, für den Monat Mai sehr strahlungsreicher und warmer Tag mit einer gemessenen Maximal- $PAR_{\text{außen}}$ von $1.760 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (12:57 Uhr, Abb. 111). $PAR_{\text{außen}}$ hatte um durchschnittlich $156 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$ höhere Werte als PAR_{innen} . Die Lufttemperatur (Abb. 112) war zu 53 % mit PAR_{innen} korreliert. Sie stieg kontinuierlich von $8,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ um 6:57 Uhr auf $27 \text{ }^{\circ}\text{C}$ um 16:37 Uhr an. Um 18:14 Uhr war es wieder etwas kühler bei $22 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Der Verlauf der Blatttemperaturen unterschied sich nur unwesentlich von dem der Lufttemperatur. Dennoch hatte die Wassermangelvariante um 09:03 Uhr und um 12:57 Uhr eine um ca. $0,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ höhere Blatttemperatur als die Kontrolle. Tagsüber waren die Werte von Lufttemperatur und Blatttemperaturen meistens gleich. Zuweilen lagen die Blatttemperaturen etwas über der Lufttemperatur, wobei die Blatttemperaturen morgens und abends um durchschnittlich $0,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ unter der Lufttemperatur lagen.

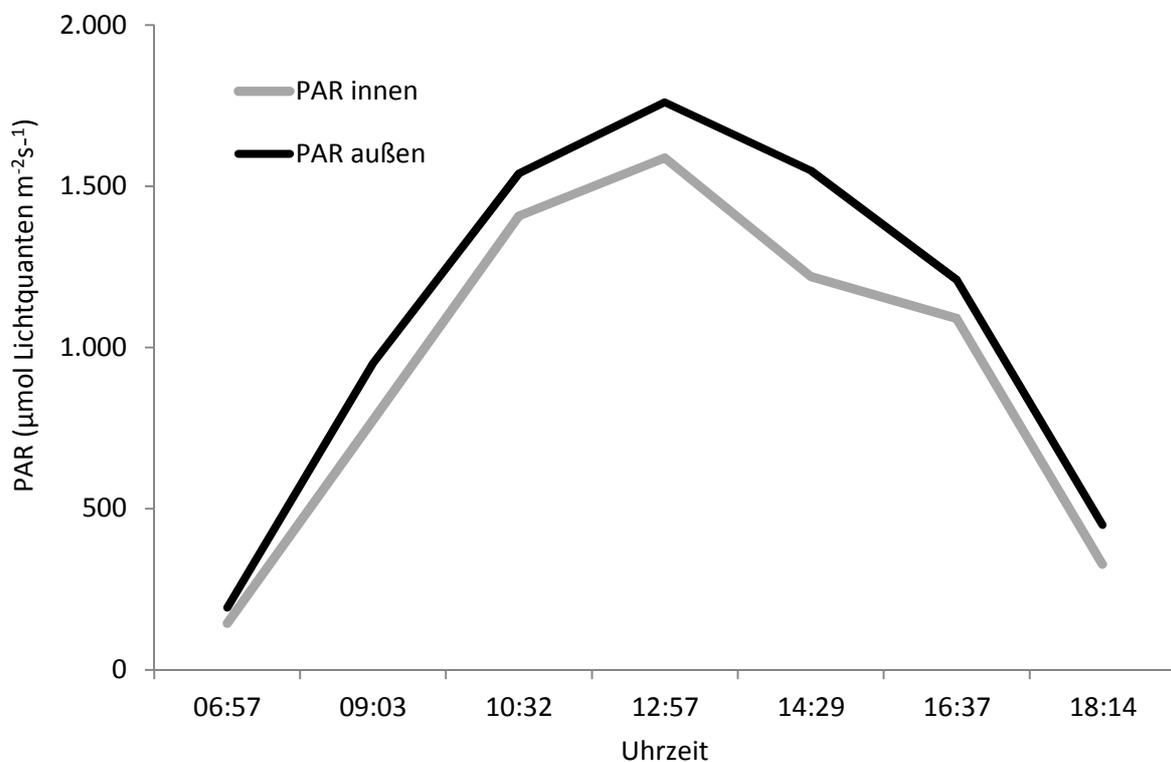


Abbildung 111. Verlauf von PAR_{innen} und $PAR_{\text{außen}}$ (16. Mai 2003)

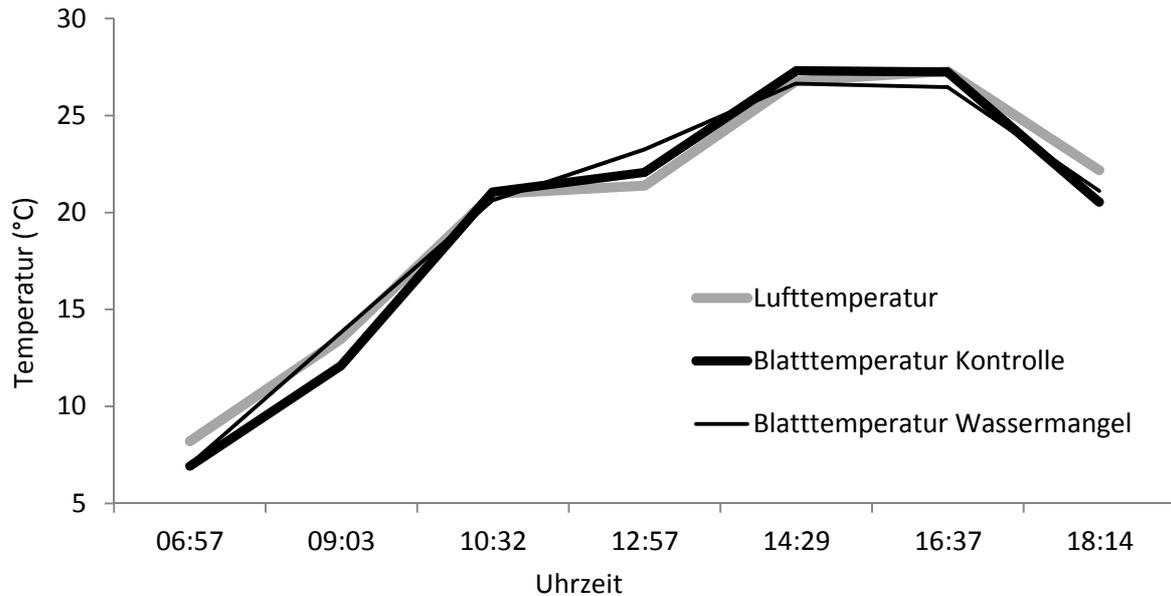


Abbildung 112. Verlauf von Luft- und Blatttemperatur bei Wassermangelvariante und nicht gestreßter Kontrolle der Winterweizensorte 'Ludwig' (16. Mai 2003)

Die erste Messung um 6:57 Uhr zeigte bei der Kontrolle sehr hohe Werte der stomatären Leitfähigkeit mit durchschnittlich $1,6 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$, bei der Wassermangelvariante lag die stomatäre Leitfähigkeit bei $0,1 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Abb. 113). Die Wassermangelvariante wurde vor der Kontrolle gemessen, weshalb steigende Temperaturen oder Einstrahlungsstärken für diese Unterschiede ausgeschlossen werden konnten. Abgesehen von dieser ersten Messung um 6:55 Uhr nahmen die Werte der stomatären Leitfähigkeit kontinuierlich von $0,36 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ um 9:03 Uhr auf $0,14 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ um 18:14 Uhr mit steigenden Temperaturen ab (Abb. 113). Von 10:23 Uhr an wies die Wassermangelvariante eine um durchschnittlich $0,04 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ höhere stomatäre Leitfähigkeit als die Kontrolle auf. Die stomatäre Leitfähigkeit war zu 44 % mit der Lufttemperatur, aber nur zu 28 % mit $\text{PAR}_{\text{innen}}$ korreliert.

Die Transpirationsrate (Abb. 113) war zu 41 % mit der stomatären Leitfähigkeit korreliert. Sie nahm morgens bis 10:32 Uhr auf durchschnittlich $4,99 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ zu und bis abends wieder kontinuierlich ab. Von 9:03 Uhr an hatte die Wassermangelvariante um durchschnittlich $0,83 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ höhere Werte als die Kontrolle. Insgesamt waren die Transpirationsraten ab 9:03 Uhr für so weit geöffnete Stomata ausnehmend gering, im Vergleich zu den Transpirationsraten der

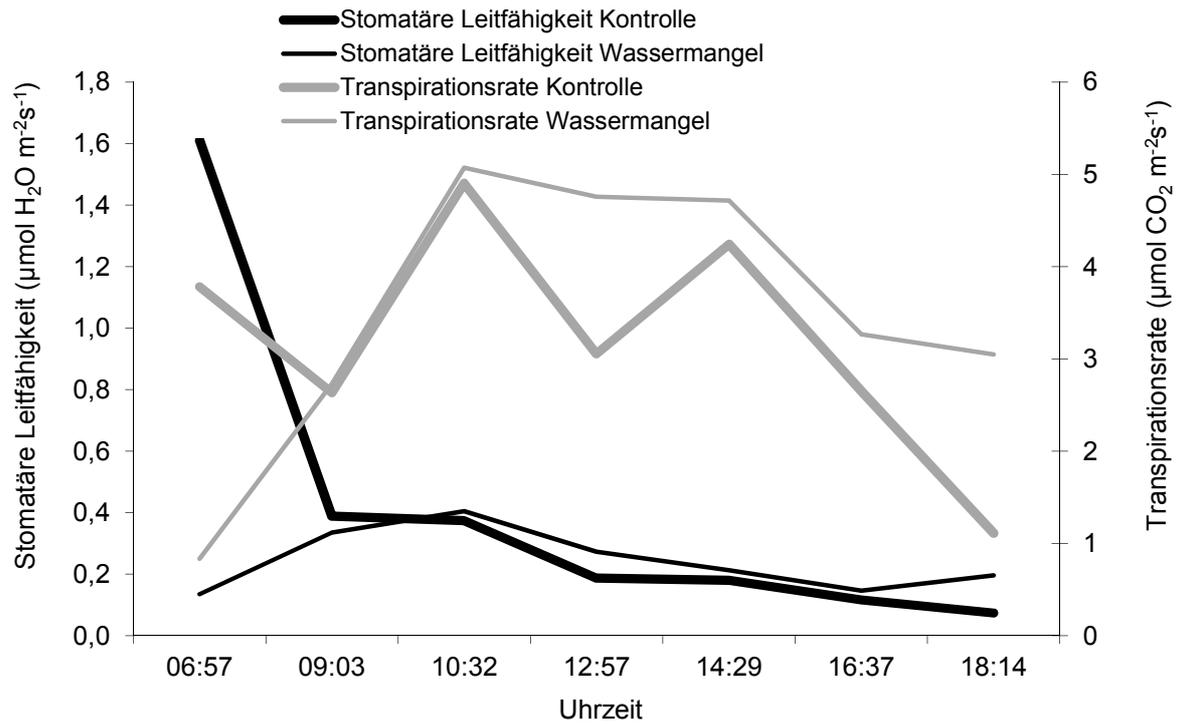


Abbildung 113. Verlauf von stomatärer Leitfähigkeit und Transpirationsrate bei Wassermangelvariante und nicht gestreifter Kontrolle der Winterweizensorte 'Ludwig' (16. Mai 2003)

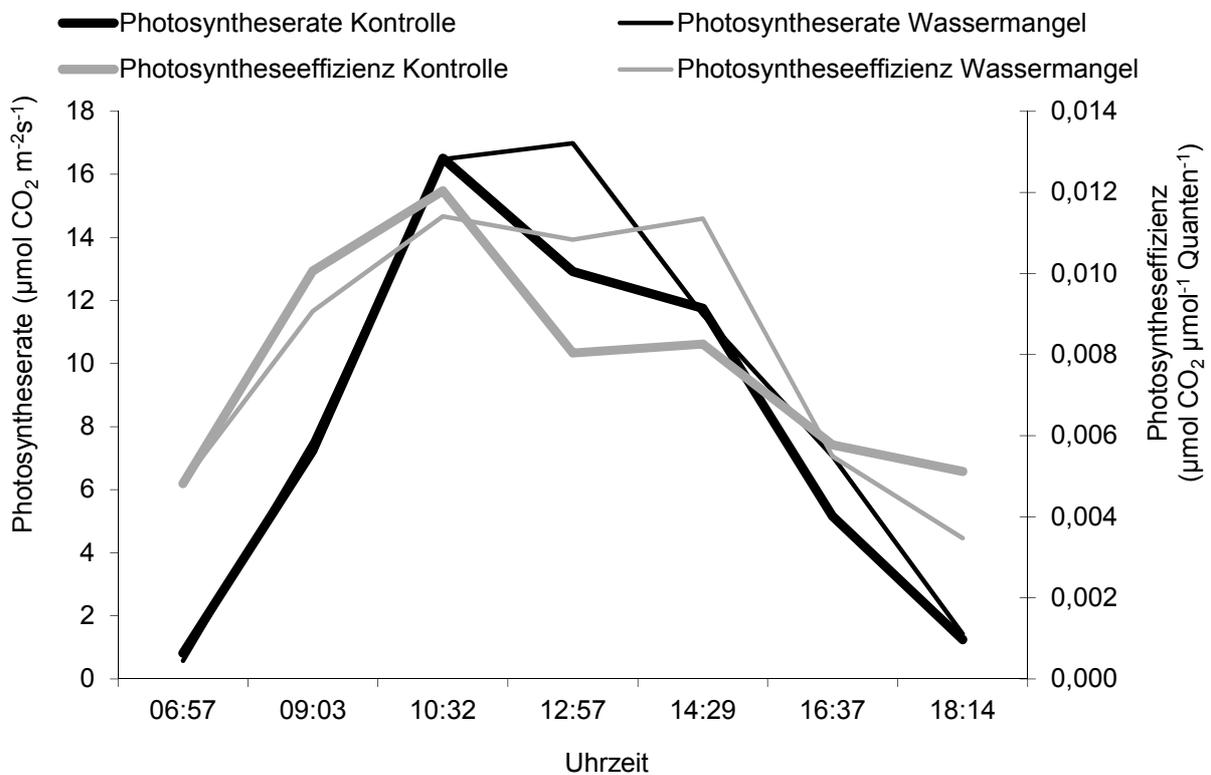


Abbildung 114. Verlauf der Photosyntheserate bei Wassermangelvariante und nicht gestreifter Kontrolle der Winterweizensorte 'Ludwig' (16. Mai 2003)

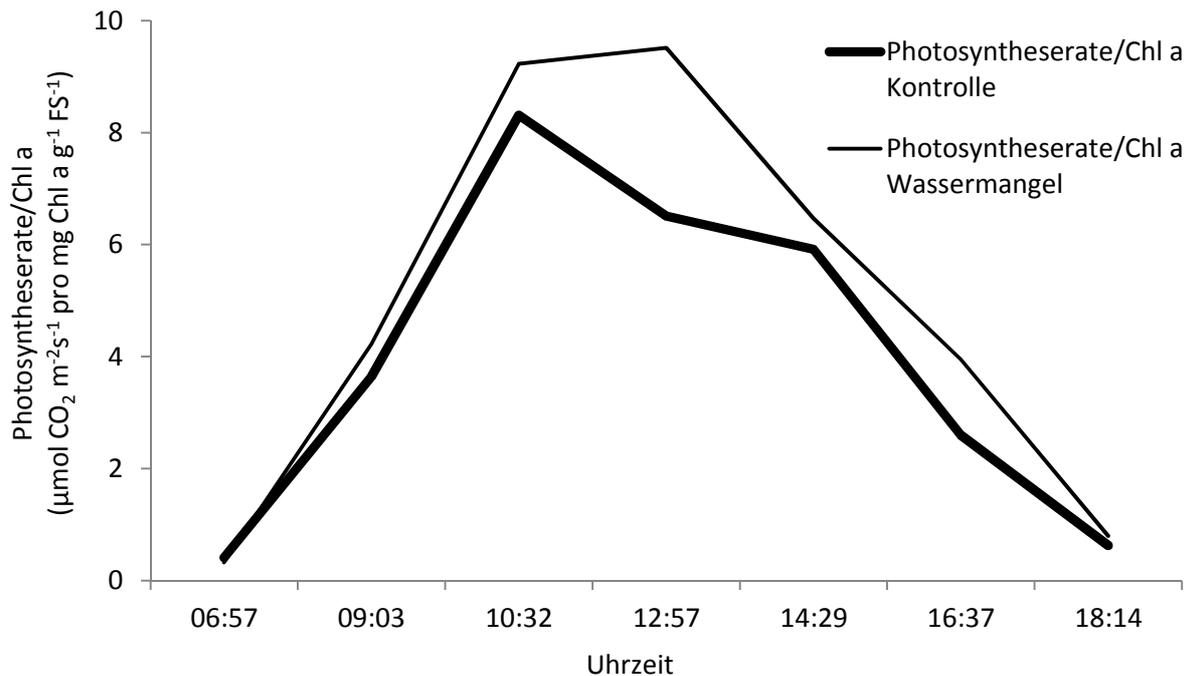


Abbildung 115. Verlauf der Photosyntheserate bezogen auf den Gehalt an Chlorophyll a bei Wassermangelvariante und nicht gestreßter Kontrolle der Winterweizensorte 'Ludwig' (16. Mai 2003)

vorhergehenden Versuche, in denen die Transpirationsraten mit der stomatären Leitfähigkeit hohe Korrelationen von bis zu 93 % (z.B. in *Solanum tuberosum* 'Selma') aufwiesen.

Der Verlauf des Tagesgangs der Photosyntheserate war an diesem Tag zu 63 % mit der PAR_{innen} korreliert. Die wassergestreßte Variante assimilierte um durchschnittlich $0,86 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ mehr als die Kontrolle (Abb. 114). An fünf von insgesamt sieben Meßzeitpunkten unterschieden sich die beiden Varianten nicht; während der anderen zwei Messungen assimilierte die Wassermangelvariante um $4,07$ (12:57 Uhr) und $1,9$ (16:37 Uhr) mehr $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ als die Kontrolle. Bei der Photosyntheseeffizienz lagen die Vormittagswerte der wassergestreßten Variante geringfügig unter denen der Kontrolle, nur während der Messungen um 12:57 Uhr und 14:29 Uhr kehrte sich das Verhältnis um (Abb. 114) und die Wassermangelvariante assimilierte um einige $\mu\text{mol CO}_2$ pro μmol an eingestrahlt Lichtquanten mehr als die Kontrolle.

Durch die Relativierung der Photosyntheserate auf den Chlorophyllgehalt rückten die Verläufe der Varianten auseinander, so daß $1 \text{ mg Chl a g}^{-1}$ der Wassermangelvariante tagsüber durchschnittlich $1,0 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ mehr assimilierte als die Kontrolle (Abb. 117).

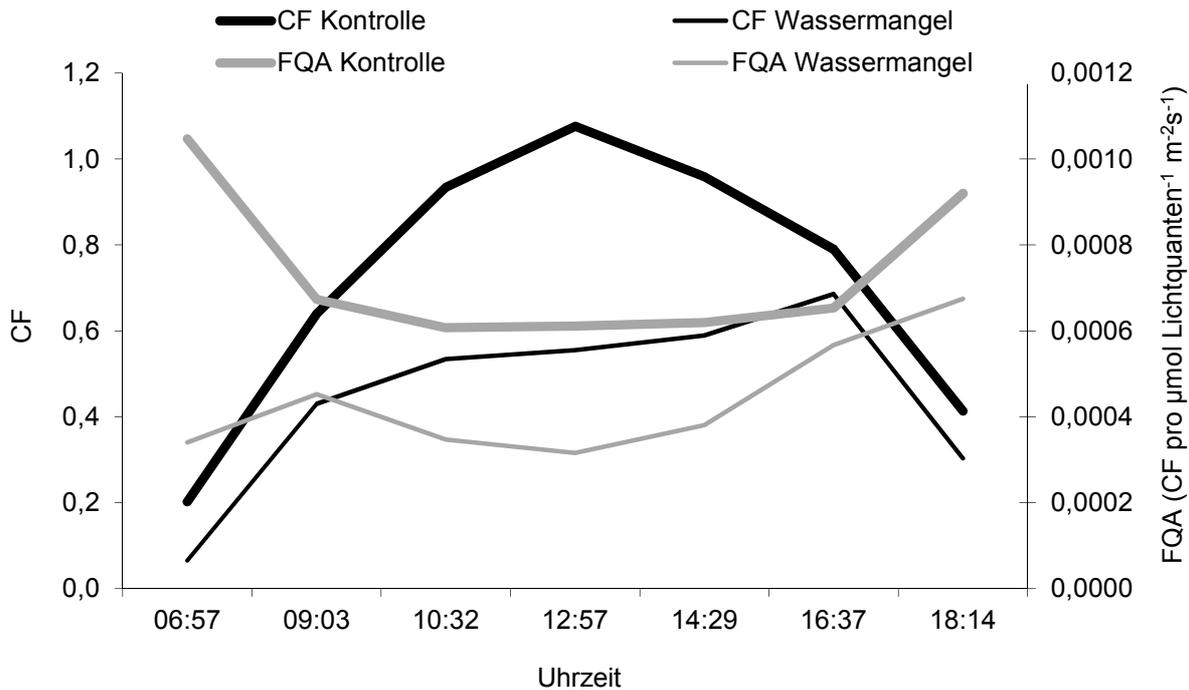


Abbildung 116. Verlauf von CF und FQA von Wassermangelvariante und nicht gestreßter Kontrolle der Winterweizensorte 'Ludwig' (16. Mai 2003)

Die CF der Kontrolle war zu 80 % mit $PAR_{\text{außen}}$ korreliert. Während die Kontrolle dem typischen hügelartigen Tagesgang mit einem gemessenen Höchstwert von 1,08 folgte (Abb. 116), zeigte sich beim Tagesgang der Wassermangelvariante eine abgeflachte Kurve und keine Hügelform wie bei der ungestreßten Kontrolle. Die Korrelation zwischen Photosyntheserate und CF lag bei 45 %, was wohl auch an der abgeflachten Kurve der Wassermangelvariante zwischen 9:03 Uhr und 16:37 Uhr lag, denn in diesem Zeitrahmen assimilierte, wenn auch etwas verspätet, die Wassermangelvariante mehr CO_2 als die Kontrolle.

Der Tagesgang der FQA (Abb. 116) war bei beiden Varianten gestreckt u-förmig ausgeprägt und korrelierte invers zu 36 % mit der Photosyntheserate und zu 13 % mit der Photosyntheseeffizienz. Auch hier fluoreszierte die Kontrolle grundsätzlich stärker pro μmol an eingestrahlt Lichtquanten als die unbewässerte Variante. Die Varianten haben, bezogen auf $PAR_{\text{außen}}$, morgens (6:57 Uhr) und abends (18:14 Uhr) mehr fluoresziert als tagsüber.

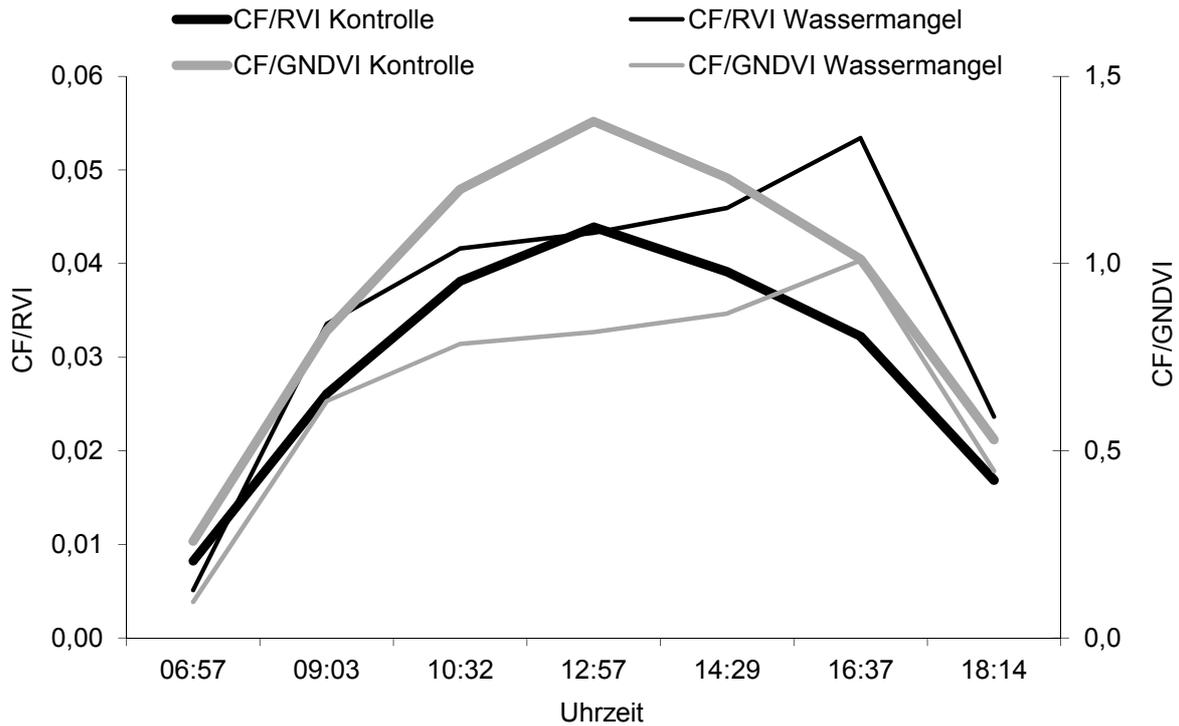


Abbildung 117. Verlauf von CF/RVI und CF/GNDVI bei Wassermangelvariante und nicht gestreifter Kontrolle der Winterweizensorte 'Ludwig' (16. Mai 2003)

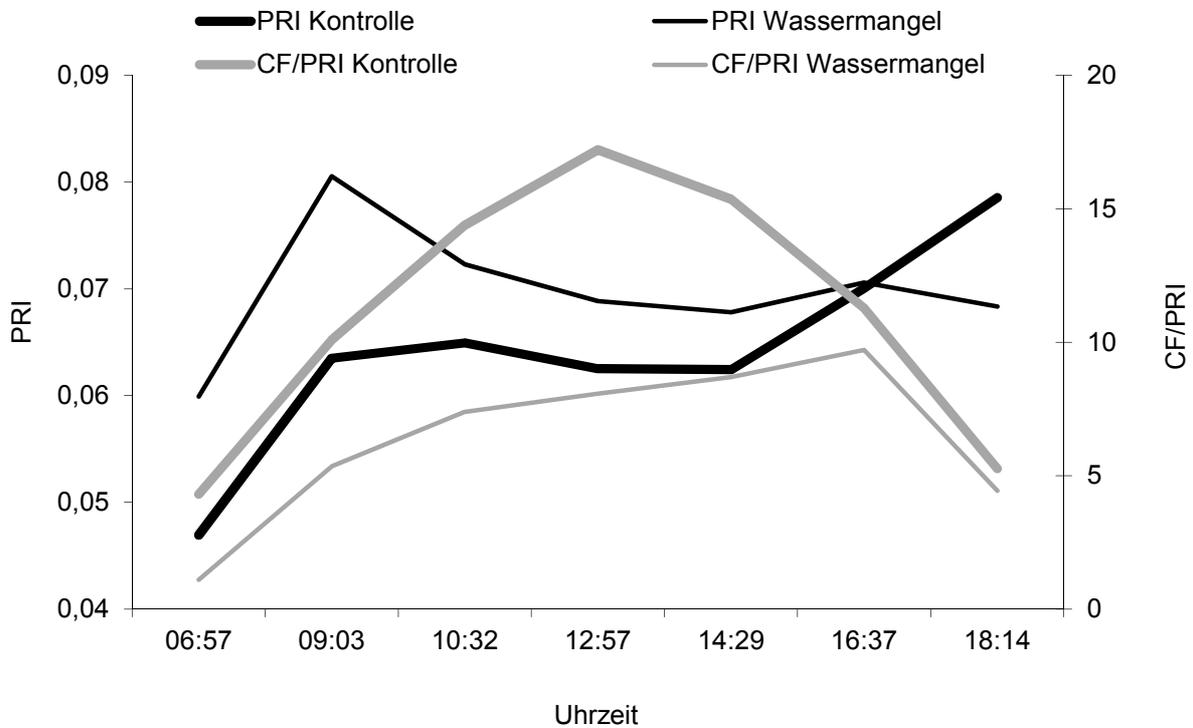


Abbildung 118. Verlauf von PRI und CF/PRI bei Wassermangelvariante und nicht gestreifter Kontrolle der Winterweizensorte 'Ludwig' (16. Mai 2003)

Die Tagesgänge von CF/GNDVI (Abb. 116) verliefen auf leicht höherem Niveau als die der CF und die Kurven der Varianten haben sich durch die Quotientenbildung angenähert, d.h. daß nun die Wassermangelvariante, relativiert auf den GNDVI, stärker fluoreszierte als die Kontrolle. Ausnahme hierbei war die Messung um 18:14 Uhr, bei der die Wassermangelvariante fast gleiche Werte wie die unbewässerte Kontrolle hatte.

Im Gegensatz zum Verlauf der CF (Abb. 116) fielen die CF/RVI-Werte der Kontrolle um durchschnittlich 0,006 Einheiten geringer aus als der wassergestreßten Variante, wobei die Verläufe selber die gleichen waren (Abb. 117): Bezogen auf die Blattfläche (dargestellt durch den RVI) fluoreszierte die Wassermangelvariante zumeist weitaus stärker als die Kontrolle, v.a. um 16:37 Uhr.

Der Tagesgang des PRI war zu 32 % mit $PAR_{\text{außen}}$ korreliert. Bis auf die letzte Messung des Tages um 18:14 Uhr lagen die Werte der Wassermangelvariante um 0,06 Einheiten über denen der Kontrolle (Abb. 118). Dieses Verhältnis eines hohen PRI bei geringerer CF bei der gestreßten Variante zeigte sich bereits in den Stickstoffsteigerungsversuchen und im vorausgegangenen Versuch zu den Sekundärfolgen von Wassermangel in der Sommerweizensorte 'Triso'. Auch hier gab es tagsüber ein Plateau beim PRI, was bisher eher untypisch für den PRI war.

Auch bei CF/PRI (Abb. 118) zeigte sich ein ähnliches Bild wie bei den Verläufen der CF: Die Werte der gestreßten Variante lagen um durchschnittlich 4,7 Einheiten unter denen der Kontrolle, d.h. durch die Verrechnung der CF durch den PRI sind die Kurven ein wenig auseinandergerückt: So fluoreszierte die Kontrolle, bezogen auf den PRI bzw. die Aktivität des Xanthophyllzyklus., weitaus stärker als die Wassermangelvariante. Ab 16:37 Uhr verliefen die CF/PRI der Varianten parallel und nah beieinander.

Auch in diesem „auf freier Flur“ ausgeführten eintägigen Versuch konnten die Auswirkungen der Sekundärfolgen von Wassermangel mit dem Spektrometer nachgewiesen werden. Vor allen ging es hier um die Anwendbarkeit der Meßmethodiken *in situ* bei einer spontan aufgetretenen Inhomogenität.

3.6 *Solanum tuberosum* L. cv. 'Edelstein' im multivariaten Versuch

Im multivariaten Versuch in der Kartoffelsorte 'Edelstein' wurde die jeweilige Ausprägung von drei verschiedenen Streßarten (Stickstoffmangel, Wassermangel, Krankheitsdruck) erfolgreich parallel und separat induziert. Dabei bildete die gut versorgte, gebeizte und streßfreie Kontrolle einen gut gewachsenen und dunkelgrünen Bestand aus, während die anderen drei Streßvarianten früher oder später die entsprechenden Streßsymptome zeigten:

- geringere Spadmeterwerte und Wüchsigkeit bei der ungedüngten Variante „N50“,
- Erkrankung bei der ungebeizten und auch ansonsten unbehandelten Variante „Ungebeizt“,
- Primär-, gefolgt von den Sekundärfolgen von länger andauerndem Wassermangel bei der unbewässerten Variante „Unbewässert“.

Es bestand durchaus die Möglichkeit, daß schon bei Meßbeginn am 29. Juni 2004 die ungebeizte Variante bereits erkrankt war, aber noch keine Symptome zeigte. Genauso waren die Unterschiede zwischen ungedüngter Variante und hochgedüngte Kontrolle am 29. Juni noch nicht visuell erfaßbar, da die unterschiedliche N-Düngung erst am 22. Juni einsetzte. Zwischen Kontrolle und unbewässerten Variante bestanden am 29. Juni 2004 noch keine Unterschiede, da die differenzierte Bewässerung erst am 4. August 2004 einsetzte und beide Varianten bis zu diesem Zeitpunkt gleich behandelt wurden.

In der zweiten Junihälfte hatte es nur 18,7 mm geregnet. Vom 1. bis einschließlich 26. Juli betrug der Niederschlag insgesamt 113,1 mm, wobei die höchsten Niederschlagsmengen am 8. und 9. Juli mit insgesamt 34,5 mm zu verzeichnen waren. Ab dem 27. Juli bis einschließlich 11. August fiel gar kein Regen. Erst am 12. August regnete es wieder mit 45,5 mm. Über den gesamten August fielen insgesamt 92,8 mm Niederschlag.

Die Parzellen 10 bis 12 der unbewässerten Variante wurden nach der länger anhaltenden Trockenperiode, welche ab dem 27. Juli herrschte, weiterhin nicht bewässert. Die übrigen Varianten wurden am 4. August 2004 bewässert. Nur wenige Stunden zuvor wurden die ersten Proben für die Bestimmung des LFM (Leaf Fuel Mass Index, Abb. 119) entnommen. Zu diesem Zeitpunkt hatte die dritte

Blatttage aller Varianten einen höheren Wassergehalt als die erste, mit Ausnahme der ungebeizten Variante. Es traten noch keine signifikanten Differenzierungen zwischen den Varianten auf. Vor allem am letzten Entnahmetermine enthielt die unbewässerte Variante speziell in der 1. Blatttage deutlich weniger Wasser als die Kontrolle und die N-Mangel-Variante. Von der ungebeizten Variante war zum letzten Entnahmetermine am 18. August 2004 nicht mehr ausreichend Blattmaterial vorhanden.

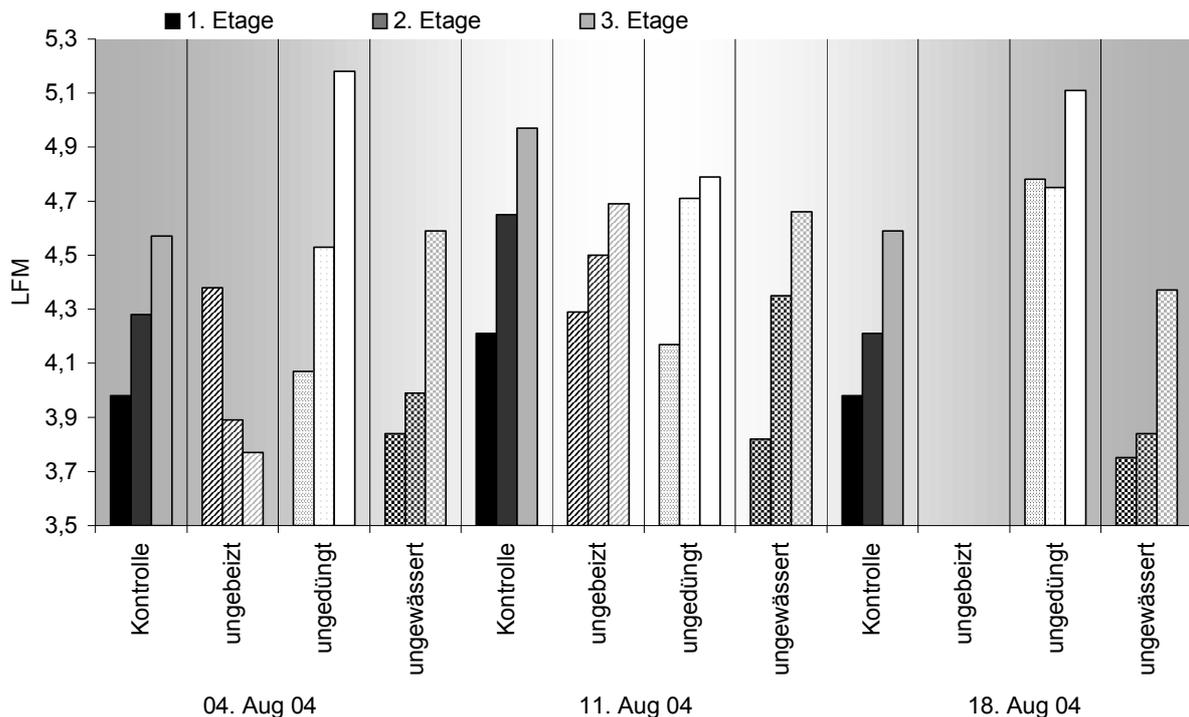


Abbildung 119. Wassergehalte („Leaf Fuel Content – LFM“) der einzelnen Blatttage von *Solanum tuberosum* L. cv. 'Edelstein' in der Bewässerungsperiode

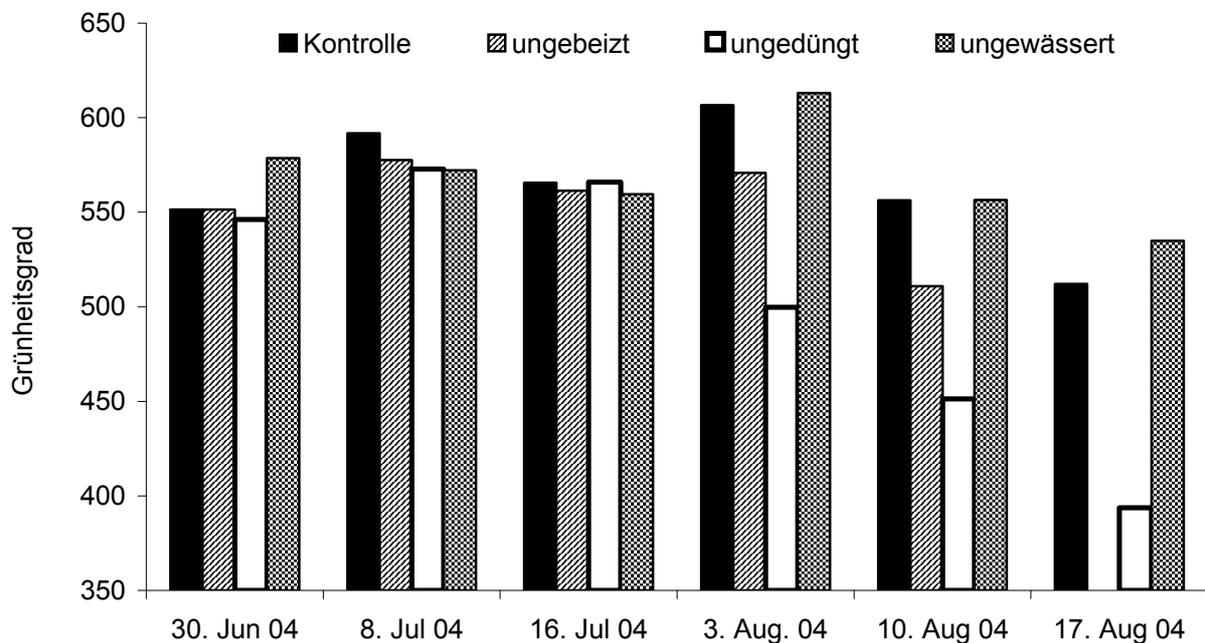
Erste Erkrankungssymptome von *Alternaria* traten bei der ungebeizten Variante am 20. Juli 2004 auf (Tab. 25). Die Erkrankung dauerte einen vollen Monat bis zum völligen Zusammenbruch des Bestandes an. Erst am 17. August 2004 zeigten auch die gebeizten Varianten leichte Erkrankungssymptome.

Bezüglich der Grünheit der Bestände nahmen die Werte des Spadometers zwischen dem 30. Juni und dem 3. August 2004 vegetationsbedingt leicht zu (Abb. 120). Danach nahmen die Werte reifebedingt wieder ab. Bis zum 16. Juli unterschieden sich die Varianten nicht signifikant. Ab dem 3. August differenzierten die Varianten immer stärker. Die Blätter der ungebeizten Variante waren am 17. August 2004 aufgrund des hohen Nekrotisierungsgrades nicht mehr

Tabelle 25. Durchschnittliche Werte des Blattbefalls mit *Alternaria* (%) bei *Solanum tuberosum* L. cv. 'Edelstein'

	Kontrolle	Ungebeizt	Ungedüngt	Unbewässert
30. Jun 04	0	0	0	0
08. Jul 04	0	0	0	0
16. Jul 04	0	0	0	0
20. Jul 04	0	8	0	0
03. Aug 04	0	37	0	0
10. Aug 04	0	47	0	0
17. Aug 04	5	74	5	5

meßbar. Die unbewässerte Variante hatte vom 3. August an geringfügig höhere Werte als die Kontrolle aufzuweisen, z.B. am 17. August um 23 Einheiten mehr. Dies konnte mit der verringerten Zellmasse durch die Turgorabnahme bei gleichem Chlorophyllgehalt im Gegensatz zur Kontrolle erklärt werden. Die ungedüngte Variante hatte zuletzt die niedrigsten Spadmeterwerte mit 394; bei der ungebeizten Variante war am 17. August 2004 nicht mehr genügend meßbare Blattfläche vorhanden.

Abbildung 120. Balkendiagramm der Werte des Spadmeters in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Edelstein'

In Abb. 121 sind die Gehalte von Chlorophyll a und b bei den einzelnen Varianten im Balkendiagramm über die Meßperiode dargestellt. Bis zum 16. Juli hin nahmen die Chlorophyllgehalte der Varianten ab, wobei die am 21. und 25. Juli wiederum

hoch waren. Grundsätzlich waren die höchsten Chlorophyllgehalte am 25. Juli zu finden, sowohl beim Chlorophyllgesamtgehalt als auch bei Chlorophyll a absolut sowie in Relation zu Chlorophyll b. Am 5. August waren die Chlorophyllgehalte – vergleichbar zum 16. Juli – gering. Zum 11. August hin stiegen die Chlorophyllgehalte der Variante Kontrolle und noch mehr bei der unbewässerten Variante. Der Chlorophyllgehalt der ungedüngten Variante und der ungebeizten Variante blieb unterdessen konstant. Zum letzten Entnahmeterrin war kein verwertbares Blattmaterial mehr bei der ungebeizten Variante vorhanden. Die differenzierte Bewässerung setzte am 4. August ein und hatte zunächst keine Auswirkungen auf einen veränderten Chlorophyllgehalt bei der unbewässerten Variante: Am 5. August waren die Unterschiede bezüglich des Gesamtchlorophyllgehalts zwischen den Varianten am geringsten, wobei die ungedüngte Variante einen leicht reduzierten Wert hatte. Am 11. und 18. August waren die Chlorophyllgehalte der unbewässerten Variante sogar höher als bei der Kontrolle. Die ungedüngte Variante hatte vom 5. August an den niedrigsten Chlorophyllgehalt.

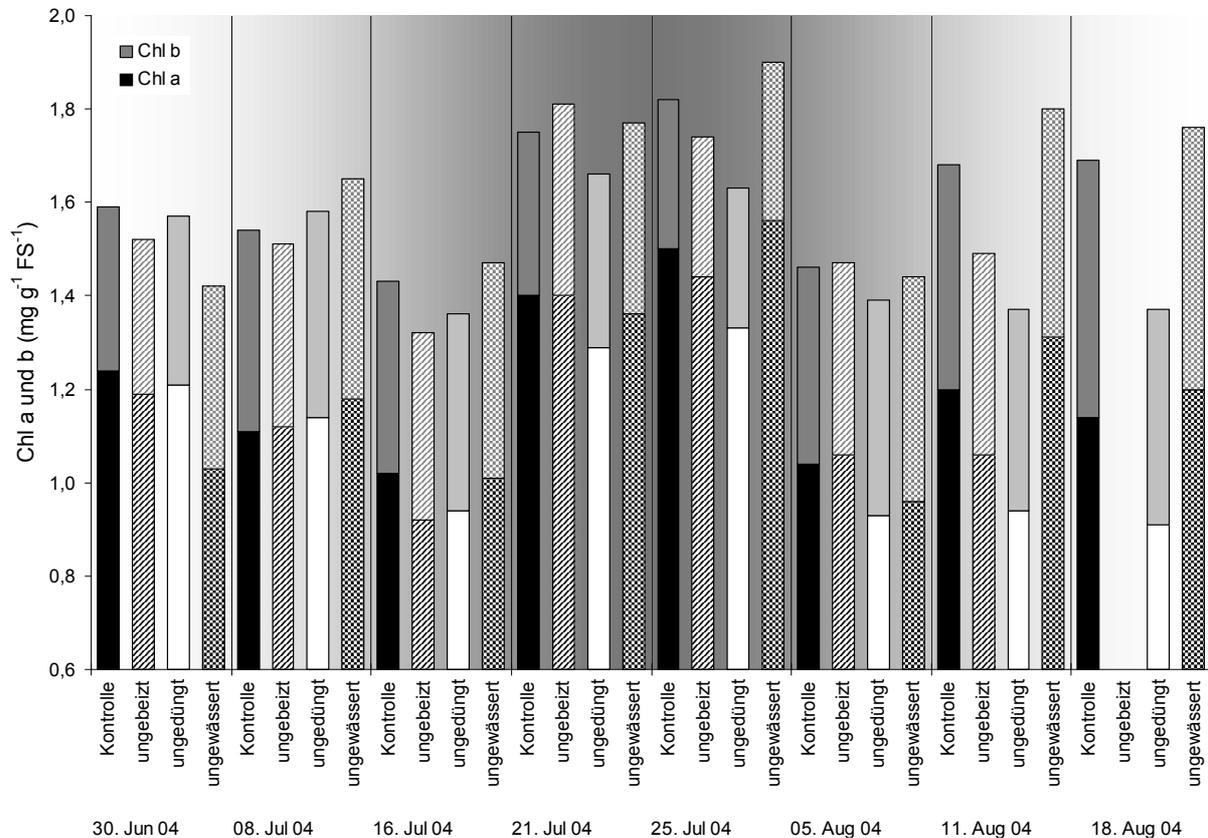


Abbildung 121. Balkendiagramm der Chlorophyllgehalte (Chlorophyll a) in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Edelstein'

In Abb. 122 sind die Stickstoffgehalte der Varianten zu den Entnahmetermi-
 abgetragen. Auch hier war ein ähnlicher, vegetationsbedingter Verlauf der
 Stickstoffgehalte wie bei den Chlorophyllgehalten über die Meßperiode hinweg zu
 verzeichnen: Bis zum 16. Juli hin nahmen die Werte leicht ab, wobei die der Kontrolle
 konstant blieben. Am 25. Juli erreichten die Werte für den Chlorophyllgehalt das
 gemessene Maximum und nahmen bis zum 18. August wieder ab. Bis zum
 16. Juli zeigten sich keine auffälligen Unterschiede zwischen den Varianten. Am
 8. Juli und ab dem 21. Juli bis zum Meßende hin hatte die ungedüngte Variante
 einen weitaus geringeren Stickstoffgehalt als die anderen Varianten. Offenbar
 zeigten sich bei der ungebeizten Variante keine schwerwiegenden negativen
 Auswirkungen auf den Stickstoffgehalt, der meist ähnlich hoch wie der der Kontrolle
 war, mit Ausnahme des 16. Juli. Zum letzten Entnahmetermi-
 war bei der ungebeizten Variante nicht mehr genügend Blattmaterial vorhanden.
 Bei der unbewässerten Variante konnte nur am 18. August ein geringfügig negativer Einfluß
 einer ungenügenden Wasserverfügbarkeit auf den Stickstoffgehalt im Vergleich zu
 den bewässerten Varianten festgestellt werden. Die Werte von Chlorophyll a und des
 Stickstoffgehalts waren zu 48 % miteinander korreliert.

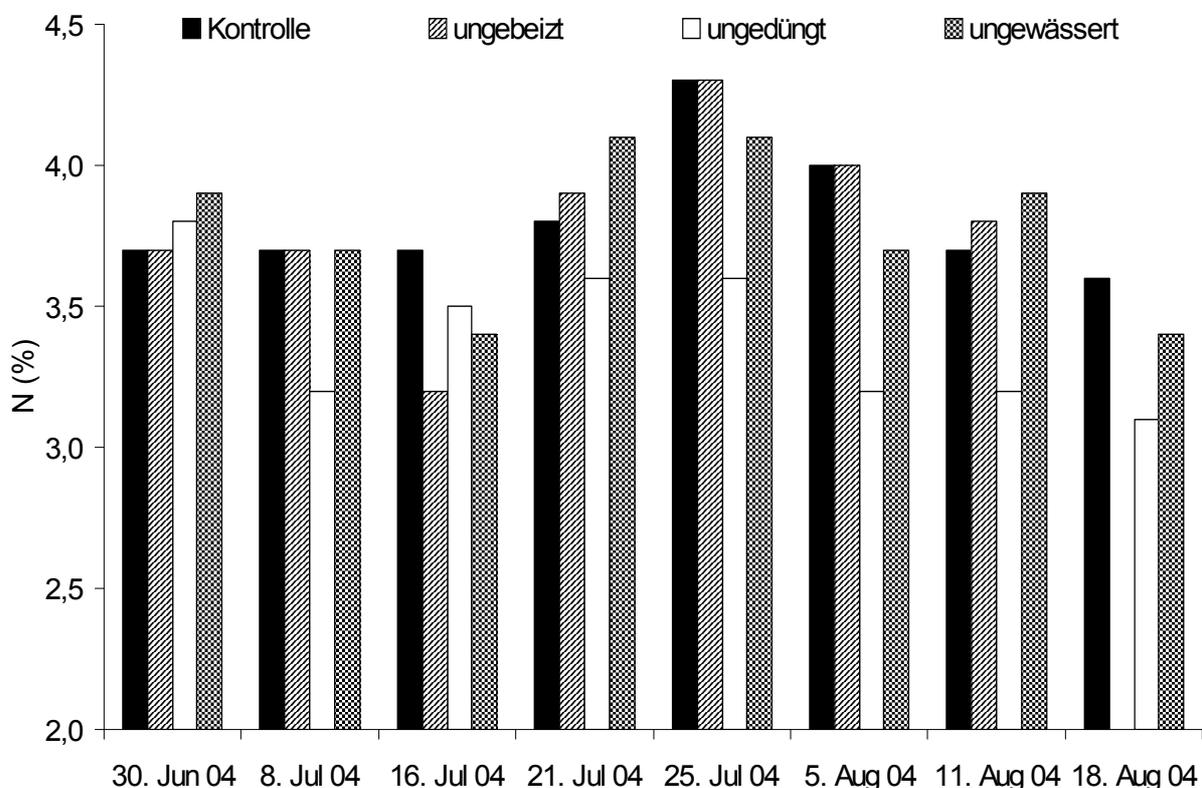


Abbildung 122. Balkendiagramm der Stickstoffgehalte in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Edelstein'

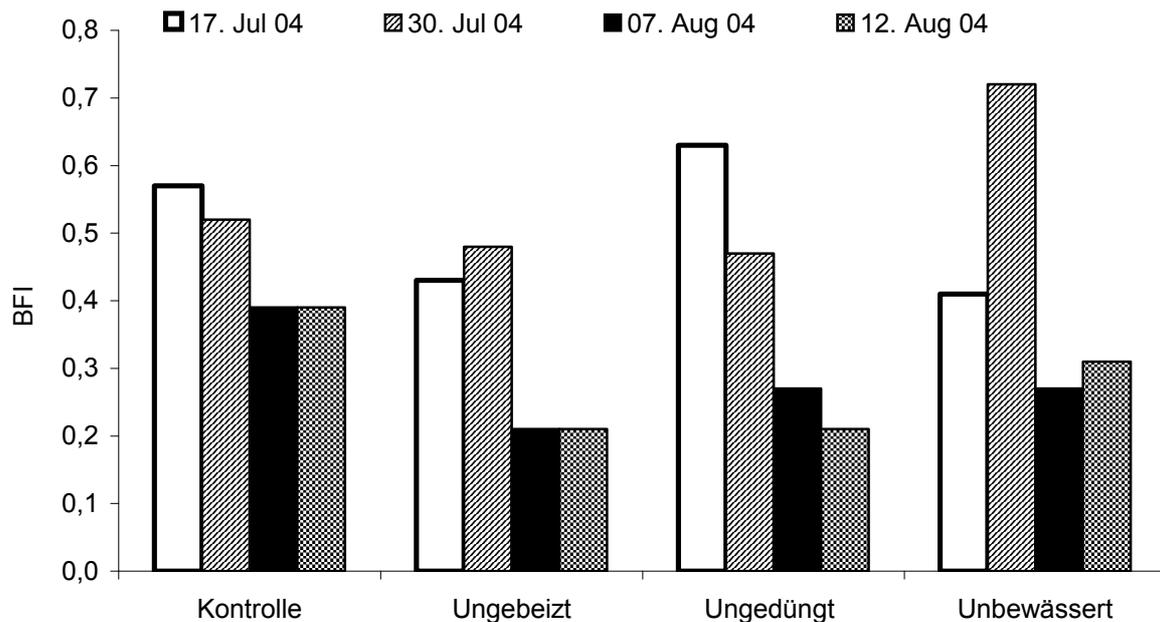


Abbildung 123. Durchschnittliche Werte des Blattflächenindex (BFI) der Varianten von *Solanum tuberosum* L. cv. 'Edelstein'

Die Varianten zeigten eine dem Vegetationsverlauf entsprechende Abnahme des Blattflächenindex (BFI) zwischen dem 17. Juli und 12. August 2004, wobei die Kontrolle am 12. August mit 0,39 einen höheren Wert als die Varianten hatte, als die ungebeizte und die ungedüngte Variante mit 0,21 und die unbewässerte Variante mit 0,31 (Abb. 123). Den gemessenen Höchstwert von 0,72 zeigte die unbewässerte Variante am 30. Juli 2004. Bezüglich des BFI waren keine signifikanten Unterschiede feststellbar.

Tabelle 26. Durchschnittliche Erntedaten von *Solanum tuberosum* L. cv. 'Edelstein'

	Knollengröße			Summe kg	Ertrag dt ha ⁻¹ FM	Stärkeertrag dt ha ⁻¹
	> 55 mm	35-55 mm	< 35 mm			
Ungebeizt	6,7	30,7	7,0	44,4	344,6	50,3
Kontrolle	8,1	42,7	4,5	55,3	460,0	73,6
N50	7,5	40,0	5,1	52,6	437,9	71,8
Unbewässert	7,3	43,9	5,5	56,7	469,2	79,3

Die unterschiedliche Kulturführung wirkte sich auch auf die Erntedaten aus (Tab. 26): Den höchsten Ertrag hatte die unbewässerte Variante mit 469,2 dt ha⁻¹ FM, den niedrigsten die N₅₀-Variante mit einem Wert von 437,9 dt ha⁻¹ FM. Die ungebeizte Variante brachte mit 40,5 dt ha⁻¹ den niedrigsten Stärkeertrag, die unbewässerte Variante mit 70,9 dt ha⁻¹ den höchsten und die Kontrolle einen mittleren mit 61 dt ha⁻¹, dicht gefolgt von N₅₀ mit 60,6 dt ha⁻¹. Dabei

war der Stärkeertrag nicht mit dem Ertrag selber korreliert: Die N₅₀-Variante zeigte einen sehr viel höheren Stärkeertrag bei einem geringeren Ertrag als die ungebeizte Variante. Die unbewässerte Variante hatte die besten Ernteergebnisse, sowohl in der Größensortierung als auch im Gesamtertrag, gefolgt von der Kontrolle, während die ungebeizte die geringsten Werte aufwies. N₅₀ lag tendenziell zwischen ungebeizter Variante und Kontrolle.

Tabelle 27. Mittagswerte von REIP, RG-Ratio, RVI und GNDVI der Varianten von *Solanum tuberosum* L. cv. 'Edelstein'

Datum Uhrzeit	29. Jun 11:35 Uhr	16. Jul 10:58 Uhr	20. Jul 12:29 Uhr	29. Jul 14:59 Uhr	4. Aug 15:21 Uhr	5. Aug 13:29 Uhr	10. Aug 12:15 Uhr
REIP _{Kontrolle}	720,3	720,8	721,8	721,9	721,7	721,0	721,0
REIP _{Unbewässert}	720,1	720,7	721,9	722,2	722,4	722,0	721,6
REIP _{Ungebeizt}	720,4	720,9	721,0	720,0	720,4	719,5	719,6
REIP _{N₅₀}	720,3	720,5	721,2	721,2	720,4	719,8	719,1
RG-Ratio _{Kontrolle}	3,32	3,28	3,29	2,99	2,88	2,94	2,95
RG-Ratio _{Unbewässert}	3,19	3,28	3,22	2,85	2,77	2,84	2,81
RG-Ratio _{Ungebeizt}	3,38	3,30	3,26	2,63	2,42	2,48	2,34
RG-Ratio _{N₅₀}	3,17	3,35	3,43	3,12	3,26	3,27	3,29
RVI _{Kontrolle}	20,39	20,56	24,00	20,97	19,47	18,40	18,59
RVI _{Unbewässert}	19,31	20,79	23,96	20,41	20,20	19,86	18,25
RVI _{Ungebeizt}	21,14	21,03	21,65	14,25	13,40	13,01	12,05
RVI _{N₅₀}	19,42	20,67	23,30	19,44	19,03	18,21	16,66
GNDVI _{Kontrolle}	0,708	0,714	0,747	0,735	0,727	0,710	0,711
GNDVI _{Unbewässert}	0,705	0,717	0,751	0,740	0,744	0,734	0,713
GNDVI _{Ungebeizt}	0,713	0,717	0,722	0,661	0,671	0,652	0,644
GNDVI _{N₅₀}	0,707	0,710	0,731	0,708	0,694	0,680	0,655

In Tabelle 27 sind die Mittagswerte der tageskonstanten Vegetationsindizes abgebildet. Der REIP nahm während der Meßperiode vegetationsbedingt zuerst zu und dann wieder ab. Am 29. Juni und 16. Juli unterschieden sich die REIP-Werte der Varianten nicht signifikant voneinander. Erst am 20. Juli nahm der REIP bei der N₅₀- und der ungebeizten Variante leicht ab, was sich bis zum Meßende hin verstärkte. Bei der ungebeizten Variante wurde zudem am 20. Juli ein Nekrotisierungsgrad von 8 % bei einem REIP von 720,0 festgestellt. Am 10. August wies die unbewässerte Variante einem REIP von 721,9 auf, gefolgt von der Kontrolle mit 720,9. Die niedrigsten Werte hatten zu diesem Zeitpunkt die ungebeizte Variante mit 719,6 und die N₅₀-Variante mit 719,4.

Beim GNDVI war eine vegetationsbedingte Zunahme der Werte bis zum 20. Juli mit darauffolgender Abnahme als Zeichen der beginnenden Abreife festzustellen. Die ungebeizte Variante wies am 10. August mit 0,644 den geringsten Wert auf. Die

N₅₀-Variante lag mit 0,655 knapp darüber. Die unbewässerte Variante hatte einzig am 29. Juni mit 0,705 einen geringeren GNDVI als die Kontrolle, und davor bis zum 29. Juli einen leicht höheren GNDVI als diese. Ab Einsetzen der unterschiedlichen Bewässerung am 4. August hatte die unbewässerte Variante einen um durchschnittlich 0,17 Einheiten höheren GNDVI und erst wieder am 10. August einen fast gleichen GNDVI als die Kontrolle. Ab dem 20. Juli bis zum Ende der Meßperiode lagen die GNDVI-Werte der unbewässerten Variante über denen der anderen Varianten. Im selben Zeitraum nahmen die GNDVI-Werte von ungebeizter und N₅₀-Variante sehr viel mehr als die von Kontrolle und unbewässerter Variante ab.

Auch beim RVI zeigte sich vom 29. Juni bis 20. Juli eine vegetationsbedingte Zunahme, wobei die Varianten hier nicht allzusehr differierten. Erste Unterschiede zwischen den Varianten zeigten sich am 20. Juli, als die ungebeizte Variante mit einem Wert von 21,65 ein geringeres Maximum als die anderen drei Varianten erreichte, die zwischen 23,30 und 24,00 lagen. Bis zum 10. August nahm der RVI bei allen Varianten auf einen Wert von unter 20 Einheiten ab. Der RVI der ungebeizten Variante nahm vergleichsweise am stärksten von 21,65 am 20. Juli auf 12,05 am 10. August um eine Differenz von 9,6 Einheiten ab. Bei der N₅₀-Variante verlief die Abnahme ähnlich, aber auf einem höheren Niveau von 23,30 auf 16,66. Kontrolle und unbewässerte Variante unterschieden sich bezüglich des RVI nicht signifikant. Auch die vegetationsbedingte Abnahme gestaltete sich bei diesen Varianten weniger dramatisch als bei der ungebeizten und der ungedüngten Variante, nämlich nur um durchschnittlich 5,56 Einheiten.

Die REIP-, RVI- und GNDVI-Werte von Kontrolle und unbewässerter Variante bzw. von ungedüngter und ungebeizter Variante lagen vor allem ab dem 29. Juli näher beieinander als z.B. zwischen Kontrolle und ungebeizter Variante. Bemerkenswert ist die Differenzierung der RG-Ratio zwischen den Varianten im Laufe der Meßperiode: Die Werte der einzelnen Varianten drifteten in „ungewohnter“ Weise auseinander (Tab. 27). Zwischen dem 29. Juni und 20. Juli hielten alle Varianten ein mehr oder weniger konstantes Niveau von durchschnittlich 3,29. Danach nahm die RG-Ratio je nach Variante unterschiedlich stark ab: Die Werte der Kontrolle sowie der unbewässerten Variante verringerten sich ab dem 20. Juli parallelläufig, wobei die unbewässerte Variante um durchschnittlich 0,11 Einheiten geringere Werte hatte als die Kontrolle. Die RG-Ratio der ungebeizten Variante nahm an den ersten 3 Meßtagen nur geringfügig ab; sie verringerte sich

aber rapide von 3,26 am 20. Juli auf 2,34 am 10. August. Im Vergleich dazu blieben die Werte der ungedüngten Variante relativ konstant, zuletzt mit einem Wert von 3,29 am 10. August.

Es wurden drei vollständige Tagesgänge mit dem Spektrometer aufgenommen (20. Juli, 4. August (durch ein Unwetter verkürzt) und 10. August 2004). Ansonsten handelte es sich hier um wolkenfreie, strahlungsreiche Sommertage (Abb. 124), wobei die Temperaturkurve zeitlich versetzt hinter der Kurve der Globalstrahlung verlief. Die Einstrahlungsspitzen um 11:00 bzw. 12:00 Uhr mittags lagen bei ca. $850 \text{ W m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Das Temperaturmaximum betrug $29,3 \text{ }^\circ\text{C}$ am 10. August um 13:00 Uhr.

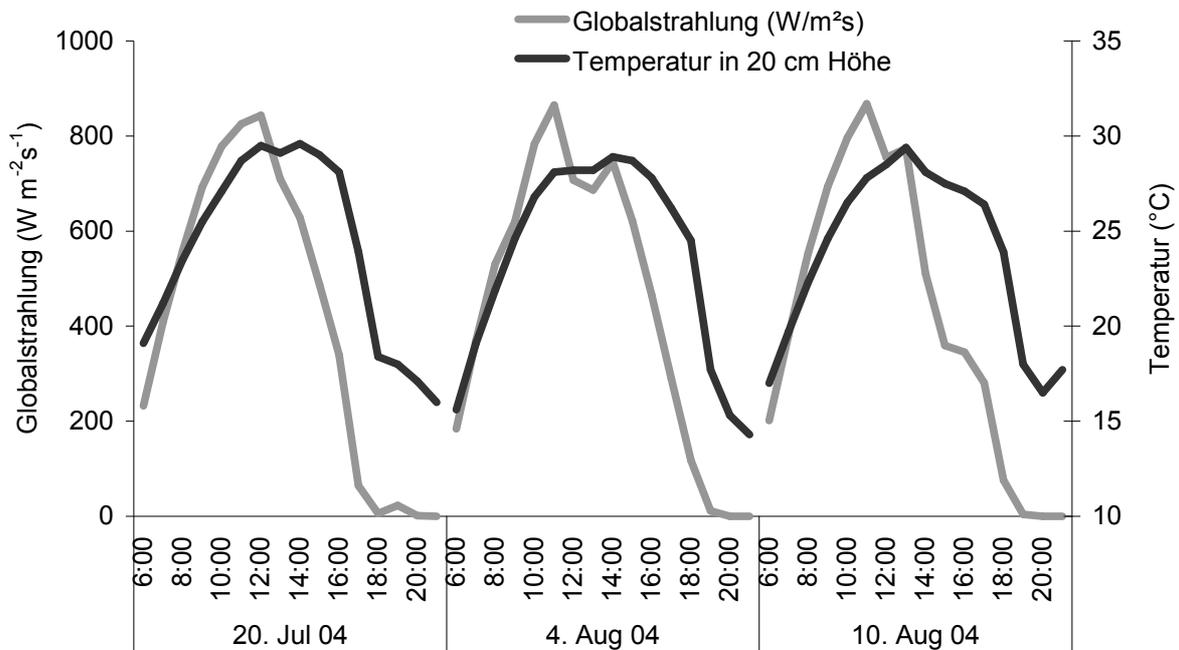


Abbildung 124. Verlauf von Lufttemperatur und Globalstrahlung an den drei Meßtagen (Daten der Wetterstation Nr. 008 in Freising des Agrarmeteorologischen Meßnetzes Bayern)

Die sonnenlicht-induzierte Chlorophyll-Fluoreszenz (Abb. 125) korrelierte an den drei Meßtagen zu 54,6 % mit der Globalstrahlung (s. Anhang, Tab. 48). Das Niveau der Tagesgänge der CF war bei den sonst sehr ähnlichen Einstrahlungs- und Temperaturverhältnissen an allen drei Meßtagen am zweiten und dritten Meßtag deutlich niedriger als am ersten Meßtag (Abb. 125), was der beginnenden Seneszenz geschuldet war.

Am 20. Juli um 11:34 Uhr brachen die CF-Werte ein, während die Globalstrahlung zu diesem Zeitpunkt stetig ohne nennenswerte Unregelmäßigkeiten zunahm. Hier hat ein durchziehendes, örtlich beschränktes Wolkenfeld die Einstrahlung punktgenau am Meßort verringert, aber nicht über der betroffenen Wetterstation. An diesem ersten Meßtag (20. Juli) hatte die Kontrolle bei voller Sonneneinstrahlung die höchsten CF-Werte, bei der ungebeizten Variante waren sie am niedrigsten. Die ungedüngte und die unbewässerte Variante lagen mit ihren Werten tendenziell dazwischen und unterschieden sich nur geringfügig.

Am 4. und 10. August tendierten die Tagesgänge der CF wieder zur klassischen Hügelform. Dabei fluoreszierte die ungebeizte Variante deutlich schwächer als die anderen Varianten, z.T. mit einer Differenz von bis zu 40 % um die Mittagszeit herum. Die ungedüngte Variante fluoreszierte tendenziell etwas weniger als die Kontrolle, und diese wiederum zumeist weniger als die unbewässerte Variante.

Die Tagesgänge der Fluoreszenzquantenausbeute (FQA, hier der Quotient aus den Werten von CF und Globalstrahlung der Wetterstation) waren in ihrer Ausprägung inhomogener (Abb. 126). Am 20. Juli zeigte sich eher ein Zickzackkurs, mit dem bereits bei der CF auffallenden Minimum um 11:34 Uhr. Deutete sich am 4. August eher eine Hügelform an, war der Tagesgang am 10. August tendenziell u-förmig ausgeprägt. Vor allem an den letzten beiden Meßtagen lagen die Werte der ungebeizten Variante weit unter denen der anderen drei Varianten. Am 20. Juli hatte die Kontrolle höhere FQA-Werte als die unbewässerte und die ungedüngte Variante, welche sich untereinander kaum unterschieden. Am zweiten und auch am dritten Meßtag hatte die ungedüngte Variante geringere Werte als die unbewässerte Variante, die Kontrolle aber ließ sich dann keiner eindeutigen Position zuordnen (Abb. 26).

Der Quotient CF/RVI differenzierte zwischen den Varianten an den ersten beiden Meßtagen nicht signifikant (Abb. 127). Einzige Ausnahme war die Messung am 20. Juli um 11:34 Uhr, wo die Werte der Varianten wie bereits bei CF und FQA geringer waren. Am letzten Meßtag fluoreszierte die Kontrolle tendenziell schwächer, bezogen auf die Biomasse, als die anderen drei Varianten, zwischen denen sich auch an diesem Meßtag keine signifikanten Unterschiede feststellen ließen. Es war

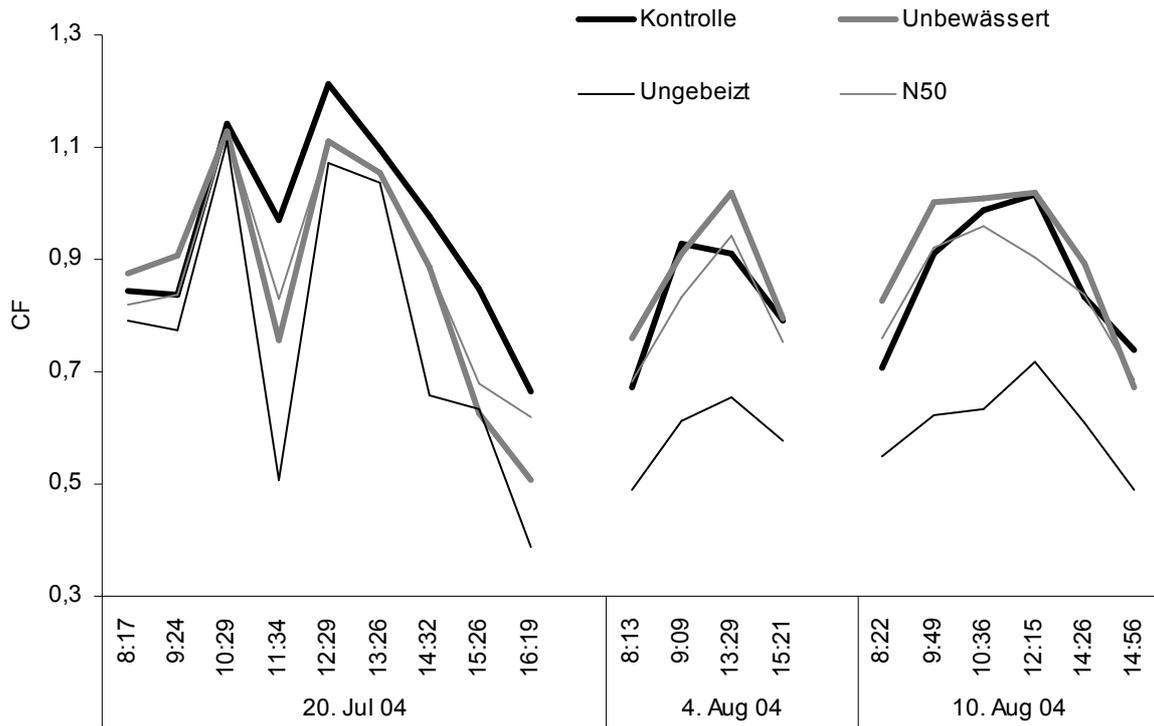


Abbildung 125. Verlauf der sonnenlicht-induzierten Chlorophyll-Fluoreszenz bei *Solanum tuberosum* L. cv. 'Edelstein' an den drei Meßtagen

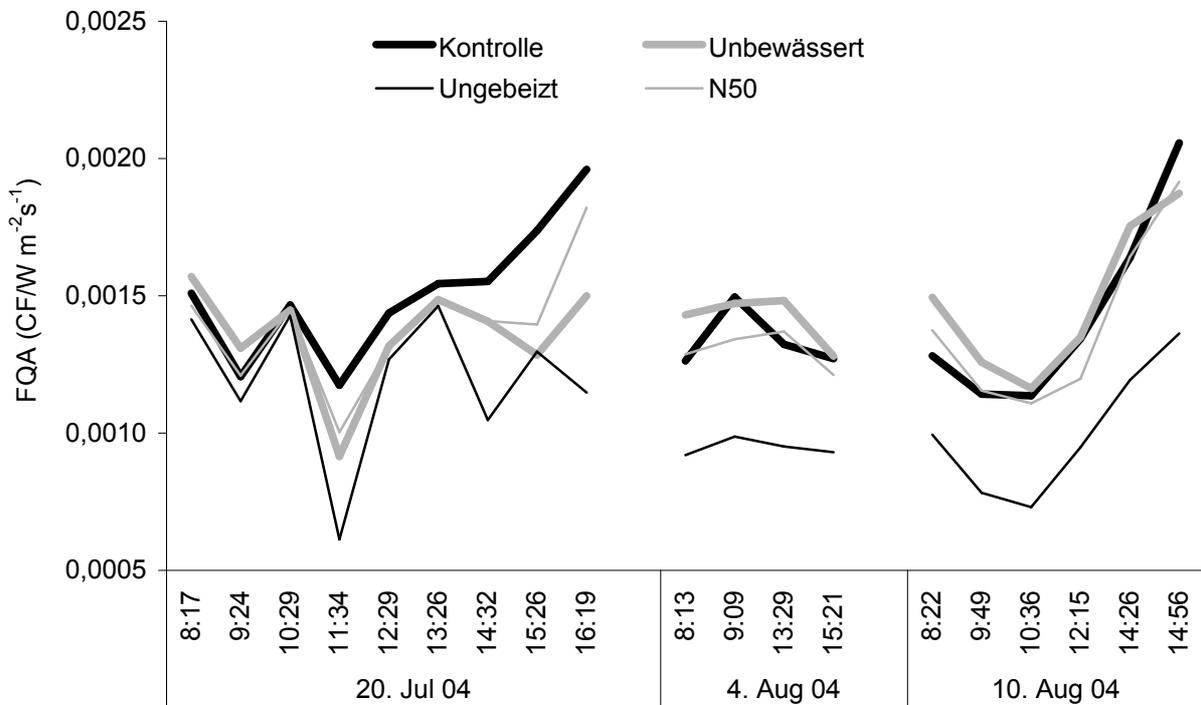


Abbildung 126. Verlauf der Fluoreszenzquantenausbeute (FQA) bei *Solanum tuberosum* L. cv. 'Edelstein' an den drei Meßtagen (errechnet durch CF/Globalstrahlung)

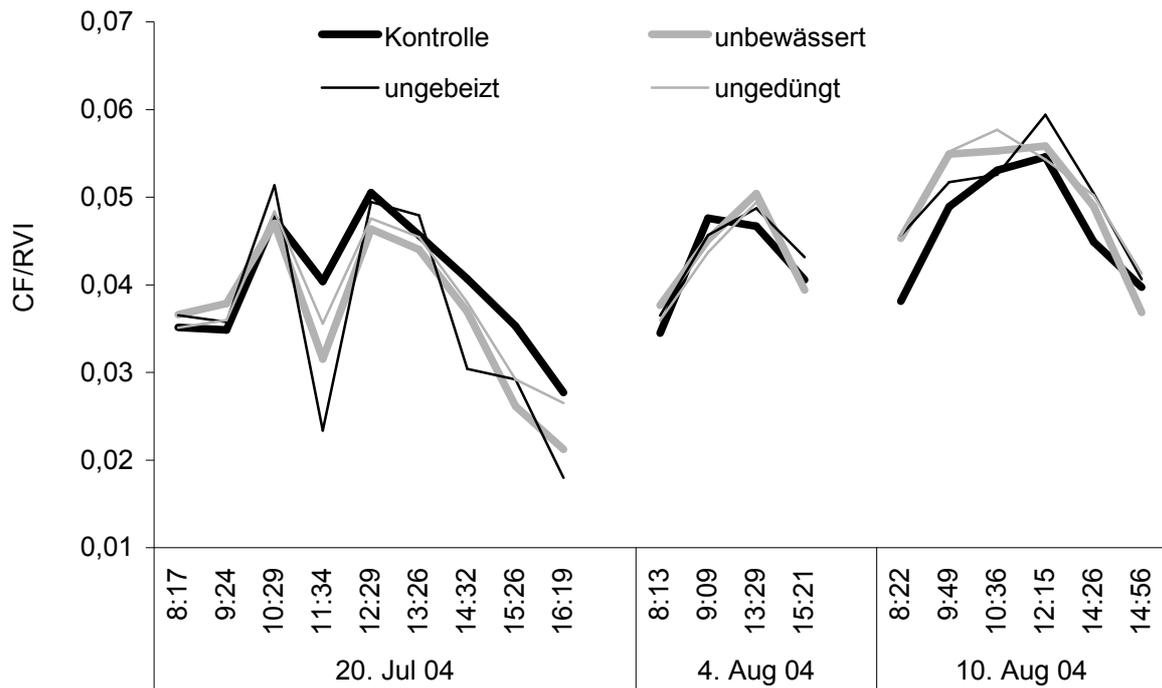


Abbildung 127. Verlauf von CF/RVI bei *Solanum tuberosum* L. cv. 'Edelstein' an den drei Meßtagen

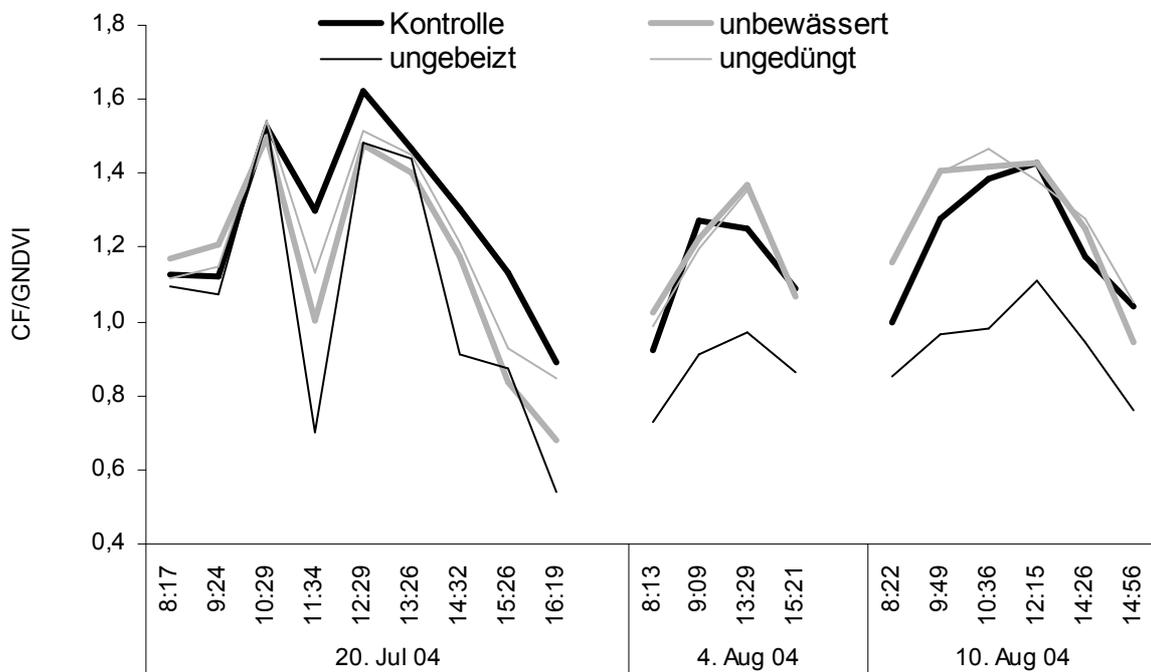


Abbildung 128. Verlauf von CF/GNDVI bei *Solanum tuberosum* L. cv. 'Edelstein' an den drei Meßtagen

über die Meßperiode eine generelle Zunahme des Tagesgangniveaus von CF/RVI zu verzeichnen. Die Werte der CF wurden bei der ungebeizten Variante durch die Quotientenbildung in Richtung der anderen Varianten angehoben, so daß sich die Werte der CF/RVI der vier Varianten an diesen beiden letzten Meßtagen nicht signifikant unterschieden. Nur die Kontrolle hatte an diesem 20. August tendenziell geringere Werte als die Streßvarianten.

Die Verläufe von CF/GNDVI (Abb. 128) zeigten ein anderes Bild als die von CF/RVI. Die Unterschiede zwischen den Varianten waren im Verlauf der drei Meßtage ähnlich verteilt wie bei der CF (Abb. 125): Die ungebeizte Variante fluoreszierte, bezogen auf eine Chlorophylleinheit, vor allem an den letzten beiden Meßtagen weitaus schwächer als die anderen Varianten. Die Kontrolle hatte am ersten Meßtag ab 11:34 Uhr höhere Werte als alle anderen Varianten, während des zweiten Meßtags unterschied sie sich nicht signifikant von der ungedüngten und der unbewässerten Variante. Am dritten Meßtag aber lagen die Werte der ungedüngten und der unbewässerten Variante zumeist über denen der Kontrolle, wobei sie sich nicht signifikant unterschieden. Am ersten Meßtag waren ab 11:34 Uhr bei der ungedüngten Variante leicht höhere Werte als bei der unbewässerten Variante festzustellen.

Der PRI (Abb. 129) war zu 34 % mit der Globalstrahlung korreliert (s. Anhang, Tabelle 48), wobei die Varianten N₅₀ und Ungebeizt die geringsten Korrelationen zeigten. Am ersten Meßtag differenzierten die Varianten zumeist untereinander, wobei sich einzig die ungebeizte Variante am ersten Meßtag keinem eindeutigen Verlauf zuordnen ließ, der sich durch mal höhere, mal niedrigere Werte als die N₅₀-Variante auszeichnete. Ansonsten hatte die unbewässerte Variante die geringsten Werte, die Kontrolle zeigte höhere PRI-Werte, und die ungedüngte Variante hatte noch höhere als die anderen beiden Varianten. Über alle drei Meßtage zeigten sich in der Tagesmitte höhere PRI-Werte als morgens und abends. Das höchste Niveau hatte am 20. Juli die ungebeizte Variante, dicht gefolgt von der ungedüngten Variante. Vor allem an den letzten beiden Meßtagen differenzierten die Varianten eindeutig: Den höchsten PRI hatte die ungebeizte Variante mit einem Wert von 0,106 am 10. August um 12:15 Uhr, wobei ihr die N₅₀-Variante mit 0,104 etwas unterlegen war. Die unbewässerte Variante zeigte zu diesem Zeitpunkt einen Wert von 0,086 und die Kontrolle lag mit 0,092 darüber. Auch wuchs das Niveau der Tagesgänge des PRI während der drei Meßtage als Zeichen der Seneszenz an.

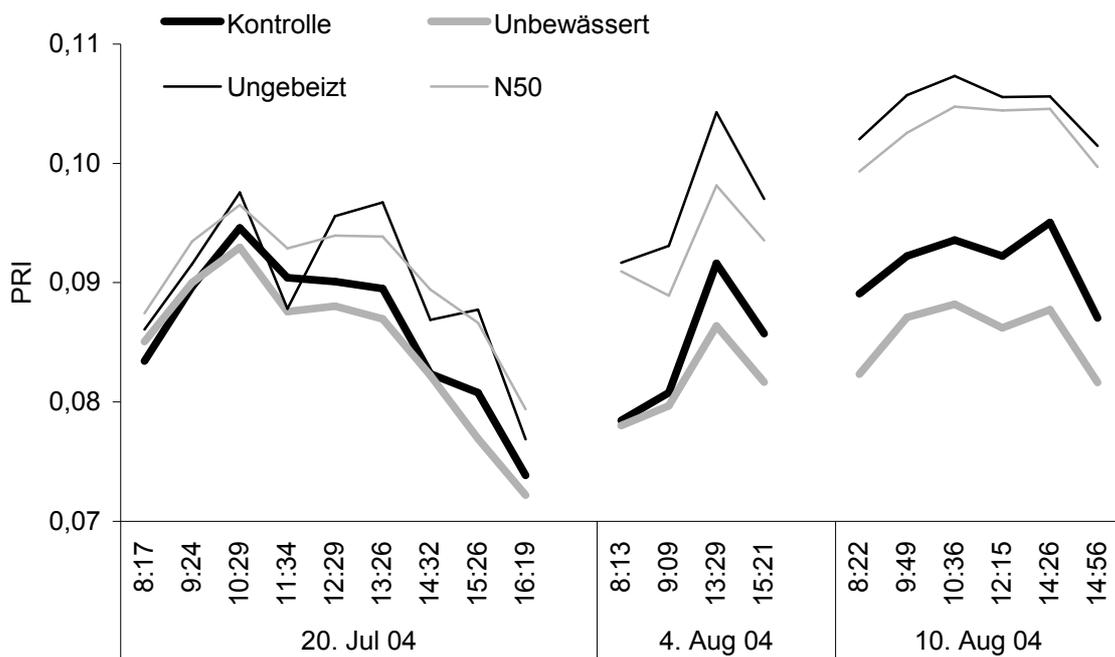


Abbildung 129. Verlauf des PRI der einzelnen Varianten von *Solanum tuberosum* L. cv. 'Edelstein' an den drei Meßtagen.

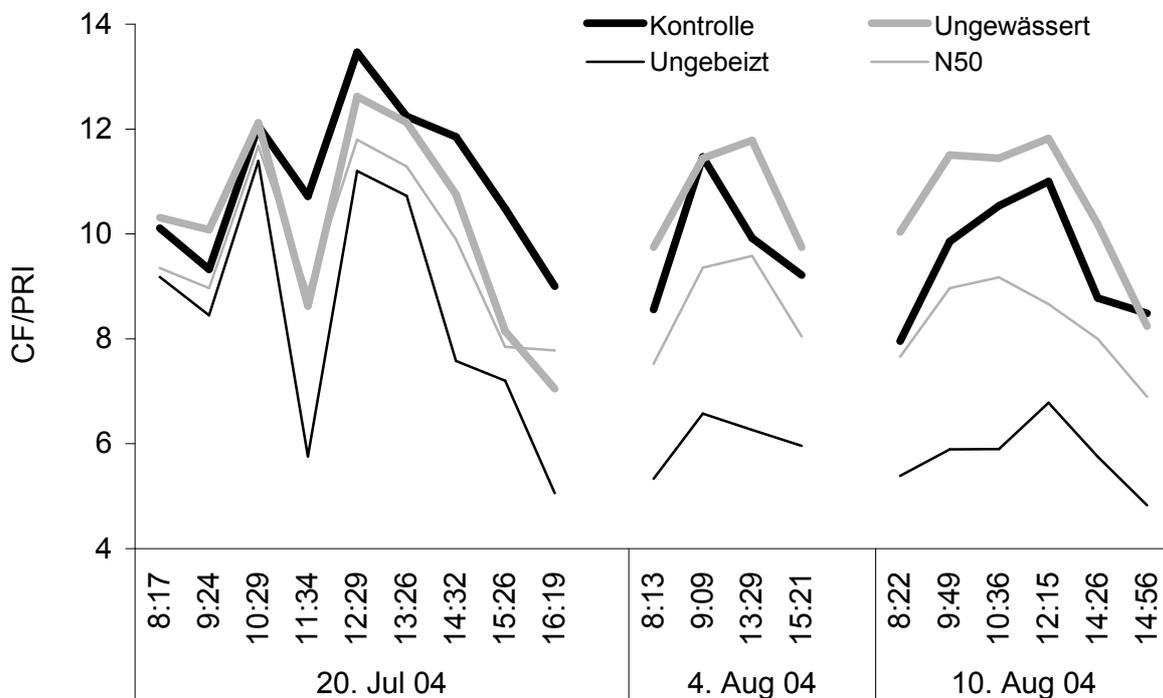


Abbildung 130. Verlauf des Verhältnisses CF/PRI der einzelnen Varianten von *Solanum tuberosum* L. cv. 'Edelstein' an den drei Meßtagen

Der Quotient CF/PRI war zu 36 % mit der Globalstrahlung korreliert (s. Anhang, Tab. 48). Die Varianten differenzierten bereits ab 12:29 Uhr am ersten Meßtag deutlich (Abb. 130). Beispielsweise erreichte die Kontrolle zu diesem Zeitpunkt mit einem Wert von 13,5 das Maximum, gefolgt von der unbewässerten Variante mit einem CF/PRI von 12,6, der N₅₀-Variante mit 11,7 und Ungebeizt mit 11,2. An den letzten beiden Meßtagen differierten die Varianten noch mehr auseinander, wobei die unbewässerte Variante durchweg höhere Werte als die Kontrolle zeigte. Die N₅₀-Variante fluoreszierte zudem im Gegensatz zur ungebeizten Variante weitaus stärker, bezogen auf die Aktivität des Xanthophyllzyklus. Auch hier tendierten die Tagesgänge von CF/PRI weitestgehend zur Hügelform.

In diesem abschließenden multivariaten Versuch konnten die Symptome der Streßarten Stickstoffmangel, Krankheitsdruck und Wassermangel erfolgreich induziert und mit dem Spektrometer gemessen werden.

4 Diskussion

Berührungslose Meßverfahren werden im Remote Sensing (Fernerkundung) vor allem zur Gewinnung von Informationen über die Erdoberfläche eingesetzt. Sie haben u.a. eine sehr hohe Bedeutung für ökologische Zwecke (z.B. Bestandesbeobachtung von bedrohten Regenwäldern vom Satelliten oder Flugzeug aus) und im Precision Farming. Dieses soll vor allem auf kleinräumige Variationen bei der Ertragsbildung reagieren, um die bestmögliche Ausschöpfung des Ertragspotentials bei gleichzeitiger Minimierung negativer Auswirkungen auf die Umwelt zu sichern. Voraussetzung für ein derart gezieltes Vorgehen ist die spezifische Kenntnis der Bedürfnisse des Pflanzenbestandes (Dünger, Wasser etc.). Auch der möglichst effiziente Pflanzenschutzmitteleinsatz ist unabdingbar. Idealerweise steuert ein Schlepper bei der Feldbearbeitung über einen Sensor den Dünger- und Pflanzenschutzmitteleinsatz teilflächenspezifisch. Solche Techniken zum gezielten Ausbringen von Dünger sind bereits vielfach im Einsatz. Wünschenswert war es daher, Methoden zu finden, die eine ebensolch gezielte Anwendung weiterer Kulturmaßnahmen wie z.B. Wasser oder Fungizidmitteleinsatz möglich machen.

Bei den Techniken zur Bestimmung des Düngemittleinsatzes kommen vornehmlich spektrale Meßmethoden zur Anwendung, welche sich in aktive (z.B. Einsatz von Lasermeßgeräten, die ein aktives Signal in einer bestimmten Wellenlänge aussenden und die Reflexion des Pflanzenbestandes messen) und passive Meßverfahren (z.B. Einsatz von spektroskopischen Geräten, welche die Reflexion eines Pflanzenbestandes über einen größeren Wellenlängenbereich messen) einteilen lassen. Zu letzteren zählt die aus Sonneneinstrahlung und Reflexion des Pflanzenbestandes (im Wellenlängenbereich um die Sauerstoffabsorptionsbande bei 760 nm von einem Spektrometer gemessen) errechnete sonnenlicht-induzierte Chlorophyll-Fluoreszenz (CF), die ein vor allem von der Chlorophyllkonzentration abhängiger Vegetationsindex ist (MAIER *et al.*, 2003), der einen Tagesgang besitzt. Mit der CF soll der Photosynthesestatus eines Pflanzenbestandes erfaßbar sein (MAIER *et al.*, 1999).

Hauptziel dieser Arbeit war die Untersuchung der sonnenlicht-induzierten Chlorophyll-Fluoreszenz (CF) im Freiland in unterschiedlichen Nutzpflanzenbeständen im Tagesgang. Die Beantwortung der rein pflanzenphysiologischen Aufgabenstellung wurde auf der Basis der Untersuchung

des Grundverhaltens der CF und von vergleichender Grundlagenforschung unter verschiedenen Streßeinwirkungen betrieben. Aus den erzielten Ergebnissen ließen sich Kernsätze ableiten, die nicht nur für das Precision Farming praktische Bedeutung haben könnten, sondern auch für pflanzenphysiologische, ökologische und ökonomische Fachgebiete wertvoll sein können.

Für eine bessere Übersicht wird auf eine Orientierungshilfe (Tab. 48, Anhang) verwiesen, die noch einmal exemplarisch die Tendenz der wichtigen Einzelfaktoren und -merkmale in den einzelnen Versuchen bei größter Ausdifferenzierung und unter höheren Einstrahlungsstärken wiedergibt. Situationen während des Mittagshitzezustresses und bei geringeren Einstrahlungsstärken (z.B. morgens, abends und bei einem hohen Bewölkungsgrad) wurden in dieser Tabelle nicht berücksichtigt, da ersterer für Extreme steht, bei denen die Prozesse Photosynthese und CF entkoppeln, und es bei letzterem keine oder nur geringe Differenzierungen zwischen den Varianten gab. Im Folgenden wird zuerst auf die tageskonstanten Vegetationsindizes (REIP, GNDVI, RVI und RG-Ratio) eingegangen, dann auf physiologische Faktoren (Photosyntheserate, Blatttemperatur, stomatäre Leitfähigkeit, Transpirationsrate) und daraufhin auf die CF sowie den PRI und deren Kombinationen. Danach findet diese Arbeit ihre Kulmination in der Auseinandersetzung mit den in den Versuchen realisierten einzelnen Zuständen der Kautsky-Kinetik, deren Variationen und den Möglichkeiten zur Streßunterscheidung durch spektrometrische Methoden. Das Fazit schließt mit weiteren Ausführungen über die CF und ihre Thematik ab.

Tageskonstante Vegetationsindizes:

Da der Spektrometer in einer Bandbreite von 400 bis 820 nm mit einer Auflösung von 0,8 nm Einstrahlung und Reflexion erfaßte, bestand die Möglichkeit, aus dem Datenmaterial viele andere Vegetationsindizes zu errechnen. Im Laufe der Literaturarbeit und Nachbearbeitung des spektrometrischen Datenmaterials konnten so einige verschiedene Vegetationsindizes ermittelt werden, wie z.B. der NDVI (Normalized Difference Vegetation Index nach ROUSE *et al.*, 1974; LICHTENTHALER, 1992; GITELSON und MERZLYAK, 1995; GITELSON *et al.*, 1996; YODER und WARING, 1994), welcher zwar auf geringe Chlorophyllgehalte, einen geringen Anteil der Bodenbedeckung und demzufolge auch auf einen geringen Gehalt an aPAR reagiert, aber nicht auf höhere Chlorophyllgehalte oder auf die

Photosyntheserate bei einer größeren Bodenbedeckung (MAIER und GÜNTHER, 2001). Aus der sich daraus ergebenden eingeschränkter Verwendbarkeit aufgrund seiner geringeren Bandbreite und da MAIER und GÜNTHER (2001) den NDVI bereits bei ihren Untersuchungen zur CF herangezogen hatten, wurde in dieser Arbeit auf den NDVI verzichtet. Auf diese und ähnliche Weisen fiel die Auswahl von insgesamt der Literatur entnommenen 27 Vegetationsindizes auf die fünf in der Arbeit zusätzlich verwendeten tageskonstanten Vegetationsindizes REIP, RVI, GNDVI, RG-Ratio und schließlich den tagesveränderlichen PRI, da sie verschiedene Merkmale eines Bestandes darstellen sollen (s. Einleitung) und so die anderen Ergebnisse unterstützen konnten.

Die als tageskonstant geltenden Vegetationsindizes (REIP, RVI, GNDVI und RG-Ratio) wiesen einen mehr oder weniger weitestgehend von der Einstrahlungsstärke unabhängigen, durchweg gleichlaufenden, minimalst u-förmig ausgeprägten Tagesgang auf, wobei sich auch hier die allgemein empfohlenen Mittagswerte als die verlässlichsten erwiesen, da die Vegetationsindizes dann die größten Unterschiede zwischen den Varianten zeigten. Zusätzlich veränderten sich die tageskonstanten Vegetationsindizes im Laufe der Vegetationsperiode aber entsprechend der Zunahme an Biomasse, Chlorophyll usw. im Zuge des Pflanzenwachstums und der darauffolgenden artspezifischen Abnahme dieser Merkmale im Zuge der beginnenden Seneszenz bzw. Abreife.

Red Edge Inflection Point (REIP)

Die Werte des REIP variierten in den verschiedenen Versuchen zwischen 715 und 740. Steigende N-Gehalte bewirkten eine Zunahme der Biomasse und damit einen höheren REIP, wie von STICKSEL *et al.* (2004) beschrieben. Das konnte vor allem im Stickstoffsteigerungsversuch in den Winterweizensorten 'Pegassos' und 'Xanthos' gezeigt werden, die auch durch ihre Blattstellung einen Einfluß auf die Höhe des REIP hatten: 'Pegassos' zeigte mit seinen planophilen Blättern einen höheren REIP als 'Xanthos' mit seinen erectophilen Blättern. In den Versuchen zu den Primärfolgen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit hob die durch die Turgorzunahme hervorgerufene Zellvergrößerung die Reflexionssignatur im Nahinfrarotbereich an, was sich mit den Beobachtungen von PEÑUELAS und FILELLA (1998) deckte. Aufgrunddessen verschob sich der Hauptwendepunkt in Richtung des kürzerwelligen Bereichs, womit der REIP theoretisch hätte geringer

ausfallen sollen. Diese äußerst geringe Verschiebung fand nur bei *Triticale* 'Modus' auf, bei *Rheum rhabarbarum* L. ergaben sich keine signifikanten Unterschiede. Auch in den Fungizidvergleichsversuchen ließen sich keine signifikanten Unterschiede bezüglich des REIP zwischen den Varianten realisieren. In den Stickstoffsteigerungsversuchen und den Versuchen zu den Sekundärfolgen von Wassermangel erwies sich der REIP durchaus als nützlich, da er hier zwischen den Varianten gut ausdifferenzierte. Da sich die Symptommatiken von N-Mangel und den Sekundärfolgen von Wassermangel glichen, erbrachte der REIP hier keine signifikanten Unterscheidungsmöglichkeiten zwischen den beiden Streißarten.

Der REIP nahm im Laufe der Vegetationsperiode zu bzw. ab, entsprechend dem Wachstumsstadium, in dem sich der jeweilige Pflanzenbestand befand. Die vegetationsbedingte Zu- und Abnahme der Biomasse ließ sich anhand des REIP, z.B. in den Versuchen zur Stickstoffdüngung in der Kartoffelsorte 'Selma' oder in den Fungizidvergleichsversuch in der Braugerste 'Duet', nachverfolgen.

Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)

Der GNDVI hatte als Referenzgröße für den Chlorophyllgehalt Werte zwischen 0,40 und 0,87. In den Abdunklungsversuchen sowie in den Versuchen unter den durchziehenden Wolkenfeldern und während der Tagesgänge veränderte sich der GNDVI als tageskonstanter Vegetationsindex nur minimal. In den Stickstoffsteigerungsversuchen zeigte er durch höhere Werte einen erhöhten Chlorophyllgehalt an und differenzierte gut aus. In den Fungizidvergleichsversuchen spiegelten sich geringfügig höhere Chlorophyllgehalte bei den behandelten Varianten in den um 0,1 bis 0,2 Einheiten erhöhten Werten des GNDVI – im Gegensatz zu den unbehandelten – wider. In den Versuchen zu den Primärfolgen von Wassermangel waren die Unterschiede zwischen den Varianten vergleichsweise gering, trotzdem zeigte der GNDVI mit durchschnittlich 42 % eine überraschend hohe Korrelationen zur Variante. Noch höher lagen die Korrelationen in den Stickstoffsteigerungsversuchen und den Versuchen zu den Sekundärfolgen von Wassermangel mit 72 %, wobei der GNDVI ähnlich wie der REIP keine Unterscheidungsmöglichkeit zwischen den beiden Streißarten bot.

Auch beim GNDVI ließ sich sehr gut die vegetationsbedingte Zu- und Abnahme des Chlorophyllgehalts eines Pflanzenbestandes verfolgen, gut nachzuvollziehen z.B. in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Edelstein' im multivariaten Versuch.

RG-Ratio

Bezüglich der RG-Ratio lagen keine Konzentrationsmessungen des Anthocyans vor wie bei den Chlorophyllgehalten, da die RG-Ratio erst im Zuge der Datennachbereitung des spektrometrischen Datenmaterials nach Versuchsbeendigung als möglicher Vegetationsindex miteinbezogen wurde. Die Werte der RG-Ratio variierten zwischen 1,1 und 6,7. Auch dieser Vegetationsindex verhielt sich tageskonstant, wobei er bei den N-Mangelvarianten (Winterweizen, Kartoffel) deutlich geringer ausfiel als in gut genährten Beständen. Die RG-Ratio zeigte höhere Korrelationen zum Wachstumsstadium als zur Variante. In den Versuchen zu den Primärfolgen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit zeigten sich keinerlei Differenzen zur Kontrolle und in den Versuchen zu den Sekundärfolgen von Wassermangel war die RG-Ratio der bewässerten Bestände deutlich höher als die der ungewässerten Bestände. Bei den unbehandelten Gerstenbeständen hatten die mit Fungiziden behandelten Varianten eine leicht höhere RG-Ratio als die unbehandelten Varianten.

Einzig im multivariaten Versuch in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Edelstein' zeigte die ungedüngte Variante die höchste RG-Ratio von allen vier Varianten und die ungebeizte Variante die niedrigste. Die Ergebnisse dieses Versuchs ließen die RG-Ratio als Vegetationsindex zur Unterscheidung der einzelnen Streßvarianten in Kombination mit der CF, dem PRI und CF/PRI zu. Die RG-Ratio hat sich hier als einzigartig erwiesen, berechnet sie sich aus ganzen Wellenlängenbändern im Gegensatz zu anderen Vegetationsindizes. Diese Aufklaffung der Werte der RG-Ratio zeigte sich aber erst ca. eine Woche nach dem visuellen Auftreten der Erkrankungssymptome und trat nur in diesem Versuch in dieser Verteilung auf. Hier konnte die anfangs zitierte Aussage von GITELSON *et al.* (2009), daß ein höherer Anthocyangehalt eine Folge von Streß sei, nicht bestätigt werden, zumeist hatten die ungestreßten Kontrollen laut RG-Ratio die höheren Anthocyangehalte als ihre gestreßten Gegenstücke.

Es war eine vegetationsbedingte Zu- und Abnahme der Werte der RG-Ratio während der verschiedenen Meßperioden zu beobachten, z.B. in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Edelstein' oder in der Braugerstensorte 'Duet'.

Ratio Vegetation Index (RVI)

Die Werte des RVI variierten zwischen 3 und 69. Der RVI war also dramatischeren Veränderungen unterworfen als der GNDVI, verhielt sich aber ähnlich wie dieser. Auch nahm er wie bei BROGE und MORTENSEN (2002) im Laufe der Entwicklung eines Pflanzenbestandes zu und während dessen Abreife wieder ab. In mit Stickstoff hochgedüngten Beständen fiel der RVI ca. doppelt so hoch aus wie in niedriggedüngten Beständen. Vergleichbare Unterschiede fanden sich auch in den Versuchen zu den Sekundärfolgen von Wassermangel. In den Fungizidvergleichsversuchen war zwar eine rapide Abnahme des RVI über die Meßperioden hinweg, aber keine signifikante Differenzierung zwischen den Varianten zu beobachten.

Bei dem bemessenen Blattausschnitt von *Rheum rhabarbarum* L. im Versuch zu den Primärfolgen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit lagen die Mittagswerte des RVI bei durchschnittlich 10. Das könnte bei Betrachtung des RVI als LOI (Leaf overlapping index) nach BARET und GUYOT (1991) als Wert gelten, bei dem sich nichts überlappt, da mit dem Spektrometer ein Ausschnitt eines großen Blattes – ohne andere Blätter darunter oder darüber in diesem Ausschnitt – vermessen wurde. Trotzdem hatte in die angegossene Variante von *Rheum rhabarbarum* L. einen um 0,8 Einheiten höheren RVI als die ungewässerte, weswegen der RVI nicht nur den BFI repräsentieren kann, sondern zusätzlich auch für die Biomasse steht. Der RVI differenzierte im Gegensatz zum REIP und zum GNDVI im Versuch zu den Primärfolgen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit im *Triticale* 'Modus' aus, und könnte sich deswegen zukünftig als nützlich erweisen.

Photochemical Reflectance Index (PRI)

Der PRI (Photochemischer Reflexionsindex) konnte erfolgreich mit Werten zwischen 0,02 und 0,18 erfaßt werden. In den Abdunklungsversuchen verlief der PRI invers zur CF und zeigte hohe Korrelationen mit der Photosyntheserate, weshalb die Aktivität des Xanthophyllzyklus mit der Aktivität des PS II in Zusammenhang gebracht werden könnte. Der PRI originiert aber bekannterweise nicht wie die CF aus dem PSII, sondern ist diesem quasi vorgeschaltet (DEMMIG-ADAMS und ADAMS, 1996).

In den Versuchen unter durchziehenden Wolken war der PRI positiv mit $PAR_{\text{außen}}$, der Photosyntheserate und der CF korreliert. Die trotzdem geringere Korrelation

zwischen PRI und $PAR_{\text{au\ss en}}$ (85,6 %) als zwischen CF und $PAR_{\text{au\ss en}}$ (99,0 %) könnte daher rühren, daß es sich bei dem Xanthophyllzyklus um eine enzymatische Reaktion handelt und es minutenlang dauern konnte, bis die Deepoxidation von Violaxanthin zu Zeaxanthin auftrat (DEMMIG-ADAMS und ADAMS, 1996). Das wurde auch aus den Daten der Abdunklungsversuche ersichtlich, in denen der PRI in ca. 83 sec von Null auf das der Einstrahlungsstärke entsprechende Niveau anwuchs.

In den Tagesgängen der übrigen Versuche waren dagegen unterschiedliche Verläufe mit geringeren Korrelationen zu $PAR_{\text{au\ss en}}$ zu verzeichnen. Der PRI wurde deshalb als induktionskinetisch reagierender Vegetationsindex betrachtet, der mit der $PAR_{\text{au\ss en}}$ korrelierte, aber *in situ* nicht positiv und direkt mit dem Photosynthesegeschehen korreliert war, obwohl mit diesem eng verknüpft (MUNNÉ-BOSCH und ALEGRE, 2000; LOUIS *et al.*, 2005). Oft wurde eine mehrmalige Zu- und Abnahme im Laufe eines Tagesgangs, auch mit größeren Amplituden, aufgenommen: Wahrscheinlich waren die endlich vorhandenen Violaxanthinmoleküle „verbraucht“ und die Aktivität des Xanthophyllzyklus nahm so ab, bis durch die enzymatische Rückreaktion der Zeaxanthinmoleküle wieder genügend Violaxanthin für einen aktiveren Xanthophyllzyklus entstanden sind. Ein ähnliches Verhalten wurde schon von DEMMIG-ADAMS und ADAMS (1996) beobachtet.

Die Aussage von GAMON *et al.* (1992), daß der PRI in nährstoffgestreßten und Kontrollbeständen von *Helianthus annuus* L. einem Tagesgang folgt, aber nicht notwendigerweise in wassergestreßten, konnte nur teilweise bestätigt werden. Das Auftreten eines geringeren PRIs bei Pflanzenbeständen mit hoher N-Düngung und damit Chlorophyllgehalten konnte die Aussagen von GAMON *et al.* (1992) bekräftigen. Bei den im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Versuchen zum Wassermangel konnte sehr wohl ein Tagesgang bei der Wassermangelvariante sowie der Kontrolle als auch eine klare Differenzierung zwischen diesen festgestellt werden, sowohl bei den Primärfolgen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit als auch bei den Sekundärfolgen von Wassermangel. In den Versuchen zu den Primärfolgen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit war der PRI der ungewässerten Variante niedriger als bei der angegossenen Variante. In den Versuchen zu den Sekundärfolgen von Wassermangel waren die Verläufe des PRI ähnlich zu denen in den Stickstoffsteigerungsversuchen: Das Tagesgangniveau des

PRI war bei der chlorophyllärmeren Wassermangelvariante generell ein weitaus höheres als bei der chlorophyllreicheren Kontrolle.

Zumeist zeigte der PRI an Tagen, die nicht durch Mittagshitzestress dominiert waren, einen Tagesgang, der hohe Korrelationen mit der PHS aufwies. Das war aber nicht immer so, denn der Tagesgang der PHS z.B. in der Zuckerrübe 'Tatjana' war durch keinerlei Mittagshitzestress beeinflusst, während der Tagesgang des PRI durch weder einen zur PHS parallelen noch inversen, sondern durch einen inhomogenen Verlauf mit hohen und tiefen Amplituden gekennzeichnet war.

So ist auch klar geworden, daß der PRI allein nicht die PHS, wie z.B. von FILELLA *et al.* (1996) statuiert, repräsentieren konnte, denn sein Verlauf folgte dem der Photosyntheserate nur teilweise: Der PRI war vor allem ein lichtabhängiger Prozeß; die PHS wurde aber bei exzessiven Temperaturen gedrosselt, und galt somit nur teilweise als lichtabhängig. An Tagen mit Mittagshitzestress zeichnete sich der Tagesgang des PRI meist durch einen weiter oben besprochenen inhomogenen Verlauf mit entsprechenden höheren und tieferen Amplituden aus. Ein gutes Beispiel hierfür waren die Tagesgänge in der *Solanum tuberosum* L. cv. 'Selma'. Der PRI zeigte im Mittagshitzestress niedrige Korrelationen zu allen nichtspektrometrischen Daten (PAR, Luft- und Blatttemperatur, stomatare Leitfähigkeit und Transpiration, Photosyntheserate und -effizienz).

Zur Unterscheidung der Auswirkungen der einzelnen Stressoren war vor allem die Höhe des PRI im Vergleich zur Höhe der CF bezeichnend. Die ungewässerten Varianten mit den Primärsymptomen von Wassermangel zeigten in allen drei Versuchen eine höhere CF bei einem niedrigeren PRI und einer geringeren Photosyntheserate als die angegossene Kontrolle. Auf der Basis dieser Ergebnisse konnte für die ungewässerte Variante von *Solanum tuberosum* L. cv. 'Edelstein' rückgeschlossen werden, daß diese zuletzt (10. August 2004) eine geringere Photosynthese betrieb als die Kontrolle. Sehr schön zu beobachten war in diesem Versuch die zunehmende Differenzierung des PRI zwischen den Varianten während der gesamten Meßperiode.

Photosyntheserate (PHS)

Die Photosyntheserate konnte in den meisten Versuchen – je nach Verfügbarkeit des Photosynthesemeßgeräts – erfolgreich erfaßt werden. Üblicherweise zeigte sie hohe Korrelationen mit PAR_{innen}. In den Abdunklungsversuchen konnte die

Induktions- bzw. Kautsky-Kinetik der PHS mit der CF nachgewiesen werden. Im Versuch unter den Wolkendurchzugsfeldern zeigte die PHS sehr hohe Korrelationen mit PAR_{innen} . Auch in dem Versuch zum repräsentativen Tagesgang hatte die PHS, eng korreliert mit PAR_{innen} , einen hügel förmigen Verlauf wie diese. Dieser Tag war nicht durch übermäßig hohe Temperaturen und Einstrahlungsstärken gekennzeichnet; es trat also kein Mittagshitze stress auf.

An sehr heißen, strahlungsreichen Tagen aber zeigte sich das eingangs beschriebene Phänomen des Mittagshitze stresses in Form einer gedrosselten Photosyntheserate (TENHUNEN *et al.*, 1984, 1985 und 1990; FILELLA *et al.*, 1996; MOHOTTI und LAWLOR, 2002; OGAYA und PEÑUELAS, 2003), aufgetreten beispielsweise an allen fünf Meßtagen im Stickstoffsteigerungsversuch in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Selma' oder am ersten Meßtag im Versuch zu den Primärfolgen von Wassermangel im *Triticale* 'Modus'. Grenzwerte waren hierfür meist Temperaturen um 35 °C, je nach Pflanzenart und Stresssituation.

In den Versuchen zur N-Düngung aber zeigte sich das Phänomen, daß die niedrig N-gedüngten Bestände eine höhere PHS aufwiesen als die normal gedüngten Bestände. Hier trat ein bis dato unbekanntes Phänomen einer erhöhten PHS bei einem geringeren Chlorophyllgehalt in Blättern von niedriggedüngten Pflanzenbeständen und eine geringere PHS bei einem höheren Chlorophyllgehalt in Blättern von hoch gedüngten Pflanzenbeständen auf. Dies war vor allem dann der Fall, wenn auch andere Stressfaktoren wie höhere Temperaturen, Lichtangebot, Trockenheit usw. auf die Pflanzen einwirkten. Die Photosyntheseraten von chlorophyllarmer und -reicher Variante waren frühmorgens und auch abends aufgrund dieser dann fehlenden zusätzlichen Stressoren in vergleichbarer Höhe zu finden.

Als Ursache war zu vermuten, daß in der ungedüngten und dadurch gestreßten Pflanze mehr Energie in die Stressabwehr (hier der Kanal PHS) umgeleitet wurde als in der ungedüngten, ungestreßten Pflanze. Höchstwahrscheinlich war der Grund hierfür, daß eine Pflanze ein genetisch festgelegtes Wachstumsziel, also eine Art Soll an Wuchshöhe, Blattmasse, Chlorophyllgehalt, Blütenanzahl, Samenanzahl und -größe usw. hat, welches theoretisch unter optimalen Wachstumsbedingungen erfüllt werden kann. In diesem Fall mußte die Photosyntheserate einer gut gewachsenen Pflanze nicht maximal sein. Wurde aber dieses Soll aufgrund von weniger optimalen

Wachstumsbedingungen nicht erreicht, hier z.B. durch ein N-Mangelangebot, wurde die Photosyntheseleistung erhöht, um dieses genetisch vorgegebene Wachstumsziel doch noch zu erfüllen.

Hier wurde also in mehreren Versuchen stringent ein bisher der Autorin unbekanntes Phänomen einer erhöhten PHS bei Blättern mit einem niedrigem Chlorophyllgehalt vor allem bei höheren Einstrahlungsstärken verifiziert. Diese Ergebnisse widersprachen den eingangs erwähnten Aussagen von MOHOTTI und LAWLOR (2002) und CHENG (2001), wonach eine verminderte N-Düngung einen geringeren Chlorophyllgehalt der Blätter und damit eine geringere Photosyntheserate verursache.

Eine Relativierung der PHS auf den Chlorophyllgehalt (durch den Quotienten $PHS/Chl\ a$) glich die Extreme zwischen den unterschiedlich gedüngten Varianten nicht etwa aus, sondern ließ sie noch mehr zutage treten: Ein Blattareal mit einem geringeren Chlorophyllgehalt assimilierte vor allem tagsüber mehr CO_2 , bezogen auf den Chlorophyllgehalt, als eine Pflanze mit hohem Chlorophyllgehalt. Dies ließ den Rückschluß zu, daß hier eine Leistungserhöhung in den einzelnen Chloroplasten bei der niedriggedüngten Variante vorlag, um doch noch das genetisch vorprogrammierte „Soll“ zu erfüllen, welchem die hochgedüngte Variante bereits näher war, und deswegen die PHS nicht mehr „auf Hochtouren“ fahren mußte. Dieses Phänomen trat auch in weiteren Versuchen, z.B. zu den Sekundärfolgen von Wassermangel, auf: Die Wassermangelvariante hatte einen geringeren Chlorophyllgehalt, fuhr aber bei höheren Einstrahlungsstärken eine intensivere PHS als die ungestreßte Kontrolle.

In den Versuchen zu den Primärsymptomen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit in *Rheum rhabarbarum* L. war die PHS der gewässerten Variante bei höheren Einstrahlungsstärken (vormittags) weitaus höher als bei der ungewässerten Variante. Bei den nachmittags aufgetretenen geringeren Einstrahlungsstärken verlief die PHS beider Varianten ohne Unterschiede auf dem gleichen niedrigen Niveau.

Auch bei *Triticale* 'Modus' in den Versuchen zu den Primärfolgen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit lag die PHS der angegossenen Variante morgens über der ungewässerten Variante, nachmittags war es dann an diesem ersten strahlungsreichen und heißen Meßtag umgekehrt. Der Mittagshitze streß

wurde höchstwahrscheinlich durch die vorhergehende und bei der ungewässerten Variante noch herrschende geringe Wasserverfügbarkeit noch verschärft und zeigte sich in den geringeren Werten der Photosyntheserate über den Tag. Interessant war auch das Phänomen, daß die Photosyntheseleistung der angegossenen Variante im Laufe dieses Tages abnahm, im Gegensatz zur ungewässerten Variante, die mit fortschreitender Tageszeit immer mehr CO₂ als die angegossene Variante assimilierte.

Am zweiten Meßtag, als sich bereits die ersten Folgesymptome einer höheren Wasserverfügbarkeit in Form von z.B. eines höheren Chlorophyllgehalts bei der angegossenen Variante zu zeigen begannen, hatte die angegossene Variante tagsüber immer noch die höheren PHS-Werte. Interessant wäre noch zu wissen, wann und auf welche Weise das Verhältnis während des Übergangs von Primär- (niedrige PHS bei der zuerst leicht „chlorophyllreicheren“ Wassermangelvariante) zu Sekundärsymptomen (hohe PHS bei der dann chlorophyllärmeren Wassermangelvariante) von Wassermangel, auch bezüglich z.B. der CF usw., kippt, was der Klärung in weiterführenden Versuchsreihen bedarf. An diesem zweiten Meßtag, an dem sich bereits der angegossene Bestand gegenüber der nicht bewässerten „erholte“, fuhr die angegossene Variante bei höheren Einstrahlungsstärken eine deutlich höhere PHS als die ungewässerte Variante. Wohl litt die ungewässerte Variante im Gegensatz zur angegossenen Variante am zweiten Meßtag auch unter Mittagshitze, da bei ihr PHS und PE gedrosselt waren. Dies war auch der einzige Versuch, bei dem die Relativierung der PHS auf den Gehalt an Chlorophyll a eine Annäherung der Kurven auf niedrigerem Niveau bewirkte.

Auch in den Versuchen zu den Sekundärfolgen von Wassermangel waren die Symptome des geringeren Chlorophyllgehalts und der geringeren Wüchsigkeit in Wuchshöhe, Blattmasse und -farbe mit denen des N-Mangels vergleichbar. Hier trat bei höheren Einstrahlungsstärken ebenso eine erhöhte PHS bei der chlorophyllärmeren Wassermangelvariante auf. Dieses Phänomen konnte überdies im Freifeldversuch in der WW-Variante 'Ludwig', wenn auch in abgeschwächter Form, realisiert werden.

Das Niveau der Tagesgänge der PHS nahm über die Meßperiode hinweg vegetationsbedingt, v.a. dem Chlorophyllgehalt geschuldet und dem Reifestadium des Pflanzenbestandes entsprechend zu bzw. ab: Sehr schön war diese Abreife

z.B. im Fungizidvergleichsversuch in der Braugerstensorte 'Duet' (2003) vor allem an den letzten drei Meßtagen zu beobachten, ablesbar auch am Verlauf der Photosyntheseeffizienz bzw. an der Photosyntheserate relativiert auf den Chlorophyllgehalt.

In den Versuchen zur Krankheitsfrüherkennung in der Wintergerste 'Duet' (2003) zeigten sich nur zu Versuchsende geringe Unterschiede in den Chlorophyllgehalten und daher eine entsprechend geringfügigere Erhöhung der PHS, auch bezogen auf den Chlorophyllgehalt bei der erkrankten bzw. unbehandelten und daher chlorophyllärmeren Variante.

Mit dem LI-COR 6400 wurde meistens das oberste voll ausgebildete Blatt gemessen, die verfügbare Blattfläche wurde dabei in den Meßkopf eingespannt und die PHS von diesem Blattausschnitt als Referenzgröße für die PHS der Pflanze bzw. des Bestandes genutzt. Die Frage war hierbei, inwieweit das auf eine bestimmte Blattfläche beschränkte Messen mit dem über dem Bestand geführten Spektrometer die Reflexion aller, in mehreren Etagen angeordnete sitzenden Blätter erfaßte oder nur die von oben sichtbaren Etagen, die nicht von den über ihnen sitzenden Blättern verdeckt wurden. In den Versuchen zu den Primärfolgen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit konnte bei *Rheum rhabarbarum* L. dieser Faktor durch die Möglichkeit des Messens von einzelnen Blattausschnitten mit Spektrometer und Photosynthesemeßgerät ausgeschlossen werden – hier gab es keine weiteren Blattetagen zu berücksichtigen. Auf Basis dieser Überlegungen wäre es sinnvoller, das direkt gemessene Photosyntheseprodukt des Gesamtbestandes anstatt das aus wenigen definierten Blattsektoren errechnete Photosyntheseprodukt eines Pflanzenbestandes zur Verfügung zu haben, bei dem viele Faktoren geschätzt werden müßten. Abhilfe könnten dabei zukünftig Gaswechsellmessungen mit einem von z.B. BURKART *et al.* (2000) entwickeltem Kammersystem (offene Gaswechselkammern mit ca. 1 m² Grundfläche) schaffen: Die Größe des Photosyntheseprodukts einer Pflanze oder bei geringem Wuchs eines Bestandes könnte dann durch einfache Berechnungen auf den vom Spektrometer erfaßten kreisrunden Sektor angeglichen werden. Noch sinnvoller wäre es, ganze Pflanzen zu bemessen, um das Photosyntheseprodukt dieser einen Pflanze zu erhalten und auf den ganzen Bestand hochzurechnen. Die Thematik gestaltet sich beliebig schwierig, angefangen bei der Größe der Meßkammer oder Glocke bis hin zur Möglichkeit der Meßsensorik, dieses Photosyntheseprodukt auch wirklich effizient und ganzheitlich

einzufragen. Würden Einzelpflanzen bemessen und würde das PHS-Produkt auf den Bestand hochgerechnet werden, müßten Algorithmen eingebaut werden, die z.B. das spezielle Microklima eines Bestandes und auch die Bestandesdynamik usw. berücksichtigen. Diese Aufgabe konnte mit dem damaligen Versuchsaufbau nicht zufriedenstellend gelöst werden, auch unter dem Aspekt, daß auch das gemessene Photosyntheseprodukt einer Pflanze mit mehreren Etagen, von denen vielleicht nur die obersten beiden vom Spektrometer erfaßt werden, auch nicht wirklich vergleichbar ist mit den spektrometrischen Messungen, denn normalerweise fahren nur die von einer hohen Einstrahlung betroffenen Blattetagen eine entsprechend hohe PHS, die darunter liegenden, von den oberen Etagen beschatteten Blätter fahren eine entsprechend niedrigere PHS. Noch komplizierter könnte dieses „Angleichen“ der Ergebnisse von verschiedenen Meßgeräten bei Messungen unter Mittagshitze- bzw. nahezu Mittageshitzebedingungen werden, wenn z.B. die PHS der oberen Blattetagen gedrosselt wäre, die der unteren aber aufgrund von geringeren Temperaturen infolge der Beschattung durch die oberen Blattetagen aber nicht.

Blatttemperatur

Neben den begleitenden Messungen der stomatären Leitfähigkeit und der Transpirationsrate wurden auch die Temperaturverläufe von Luft und Blättern vom Photosynthesemeßgerät aufgenommen. Die Blatttemperaturen der Varianten waren mit der Lufttemperatur hoch korreliert. Obwohl zuerst kein erwähnenswerter Faktor, entpuppte sich die Blatttemperatur als wichtiges Merkmal zur Interpretation der Ergebnisse.

In den Abdunklungsversuchen nahm die Blatttemperatur bei konstant verlaufender Lufttemperatur mit Abdunklungsbeginn innerhalb von Sekunden um zumeist mehr als 1 °C ab, und mit Wiederbelichtung wiederum genauso schnell zu, auch hier zumeist um mehr als 1 °C, und das alles bei unverändertem Verlauf der Lufttemperatur. Auch in den Versuchen bei sich ändernden Lichtverhältnissen unter den Wolkendurchzugsfeldern konnten ähnlich frappante Veränderungen der Blatttemperatur um zumeist mehr als 1 °C bei unverändertem Verlauf der Lufttemperatur beobachtet werden. Bemerkenswert war auch hier die reaktionsschnelle Änderung der Blatttemperatur innerhalb weniger Sekunden, wäre doch eher eine kontinuierlichere, schwerfälligere Reaktion in Form einer

„Aufwärmung“ des Blattes zu erwarten gewesen, ähnlich der Aufwärmungsgeschwindigkeit von Wasser, bezugnehmend darauf, daß Wasser der Hauptbestandteil der Pflanzen ist. Was aber umso mehr überrascht hat, war die ebenso schnelle „Abkühlung“ des Blattes innerhalb von Sekunden um mehr als 1 °C, denn Wasser braucht erfahrungsgemäß mehr als ein paar Sekunden, um z.B. bei Zimmertemperatur um 1 °C abzukühlen. Diese sekundenschnellen Reaktionen der Anpassung der Blatttemperatur ließen nicht nur auf eine Erwärmung bzw. Abkühlung des Blattwassers, die sicherlich auch geschah und einen gewissen Anteil an den Veränderungen der Blatttemperatur hatte, rückschließen, sondern daß hier auch andere Prozesse wie die Wärmeableitung überschüssiger Energie passierten, also die Wärmeabgabe von überschüssiger aPAR durch das PSII, den Xanthophyllzyklus und andere energieableitende Prozesse. Leider wurde bis dato keine Literatur gefunden, die genau definierte, wie groß der Anteil der einzelnen wärmeableitenden Prozesse an der Blatttemperatur ist. So schnell wie sich die Blatttemperatur änderte, konnten stomatäre Leitfähigkeit und Transpirationsrate in diesen Versuchen nicht reagieren, da die Öffnung der Stomata bzw. auch deren Schließung mehrere Minuten in Anspruch nehmen konnte (WOODS und TURNER, 1971).

Die Ausprägung der Unterschiede in der Blatttemperatur war bei den Varianten in den verschiedenen Versuchen je nach Streßfaktor variabel. Diese Unterschiede traten auch nur zu Zeiten zutage, an denen eine hohe Einstrahlung kombiniert mit einer hohen Temperatur herrschte, denn nur unter solchen Bedingungen ist eine Pflanze gezwungen, die aPAR im PSII anders zu verteilen als zu Zeiten, an denen keine exzessive Einstrahlung und Temperatur herrschen. Meistens war bei einer hohen Einstrahlung und hohen Temperaturen die Blatttemperatur bei der Variante mit der höheren PHS geringer im Vergleich zur Variante mit der verminderten PHS. Sicherlich hat auch deswegen die Wärmeabgabe einen nicht zu geringen Anteil an der Blatttemperatur, wie sich vor allem an Tagen zeigte, bei denen die Varianten auch bezüglich der PHS und der CF differenzierten. Grundsätzlich galt für solche strahlungsreichen und warmen Zeiten folgende Faustregel:

Eine Variante, die eine höhere PHS fuhr, hatte eine höhere stomatäre Leitfähigkeit, Transpirationsrate und einen höheren PRI bei einer geringeren Blatttemperatur sowie CF. Genauso hatte die andere Variante, die eine geringere PHS fuhr, eine niedrigere stomatäre Leitfähigkeit, Transpirationsrate und einen geringeren PRI bei einer höheren Blatttemperatur sowie einer höheren CF.

Ausgenommen waren hierbei die Versuche zu den Sekundärfolgen von Wassermangel: Offenbar verursachte ein unterschiedlicher N- und damit auch Chlorophyllgehalt eine unterschiedliche PHS und CF, PRI, REIP usw., aber nur geringe Veränderungen in der Blatttemperatur, und zwar unabhängig davon, ob gerade Mittagshitze herrschte oder nicht, s. *Solanum tuberosum* L. cv. 'Selma'. Hier fanden wohl andere Umverteilungsprozesse statt.

Auch wenn, wie schon eingangs erwähnt, die Wärmeabgabe des PSII explizit nicht bestimmbar ist, spiegelte sie sich doch in einer veränderten Blatttemperatur wider, denn zu einstrahlungsschwachen und entsprechend kühleren Tageszeiten waren die Unterschiede zwischen den Varianten weitaus geringer, vor allem bezüglich Blatttemperatur und CF, PHS, stomatärer Leitfähigkeit, Transpirationsrate. In den Versuchen zur Krankheitsfrüherkennung in der Braugerstensorte 'Duet' (2003) waren die Unterschiede zwischen den Varianten weitaus geringer ausgeprägt als bei den Versuchen zur Stickstoffdüngung und zum Wassermangel. An den beiden letzten Meßtagen hatte auch die unbehandelte Variante von *Hordeum vulgare* L. 'Duet' (2003) eine um durchschnittlich 1,8 °C geringere Blatttemperatur als die Variante Opera, was auf eine erhöhte Energieabgabe in Form von Wärme bei der Variante Opera schließen ließ, was sich wiederum in einer tendenziell geringeren PHS und Transpirationsrate zeigte als bei der unbehandelten Variante. Auch hatten beide Varianten bei höheren Einstrahlungsstärken höhere Blatttemperaturen als die Lufttemperatur.

Auch in den Versuchen zu den Primärfolgen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit traten Unterschiede in den Blatttemperaturen und auch Abweichungen der Blatttemperatur zur Lufttemperatur zutage. Hier hatte die angegossene Variante mit dem höheren Turgor bei höheren Einstrahlungsstärken eine niedrigere Blatttemperatur als die ungewässerte Variante mit dem geringeren Turgor. Hier konnte der Kühleffekt des vermehrt vorhandenen Zellwassers bei der angegossenen Variante zwar nicht ausgeschlossen werden, zusätzlich zu den Umverteilungsprozessen. Am deutlichsten traten diese Unterschiede am zweiten Meßtag in der *Triticale* 'Modus' zutage. Bei den Sekundärfolgen von Wassermangel, die ja in der Symptomausprägung denen der Stickstoffmangelvarianten glichen, waren die Blatttemperaturunterschiede zwischen den Varianten und zur Lufttemperatur verschwindend gering.

Die meisten Wärmebildkameras reagieren auf den IR-Bereich im Spektrum, von denen sich nur die Siliciumsensoren im kürzerwelligen Bereich (> 800 nm) bewegen. Die Blatttemperatur war mit den verwendeten Methoden nicht aus der NIR-Schulter bei Wellenlängen > 800 nm der Reflexionssignatur ableitbar, denn diese zeigte z.B. große Unterschiede zwischen den N-Düngevarianten. Es bestanden hier (z.B. in den Versuchen zu den Primärfolgen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit) aber, wenn überhaupt, nur sehr geringe Unterschiede bezüglich der Blatttemperatur zwischen den Varianten und zur Lufttemperatur. Die NIR-Bereiche der Reflexionssignaturen repräsentierten also nicht die Blatttemperatur: Hier trat eine hohe NIR-Schulter mit einer zumeist geringeren Blatttemperatur bei der angegossenen Variante auf. Die Höhe der NIR-Schulter zeigte über die Versuchsreihen hinweg eher ein Mehr an Zellgröße, Turgor, Chlorophyll, usw., nicht aber primär die Blatttemperatur an.

Die Blatttemperatur wurde also neben einem regelrechten Kombinat an biotischen und abiotischen externen Faktoren wie z.B. Einstrahlungsstärke, Lufttemperatur, Bestandesstruktur und das damit verbundene spezifische Mikroklima in Pflanzennähe, Luftfeuchtigkeit, Wasserverfügbarkeit usw. sowie von internen und damit v.a. physiologischen Faktoren beeinflusst, als da seien der Turgor, die Photosyntheserate die Wärmeabgabe, diverse Photoprotektionsmechanismen wie die CF und weitere Fluoreszenzen, Phosphoreszenz, Xanthophyllzyklus usw., und auch der Chlorophyllgehalt. Bei den Ergebnissen einiger Versuche konnte also davon ausgegangen werden, daß die Blatttemperatur von einigen internen, physiologischen Faktoren verändert wurde, allen voran die Wärmeabgabe des PSII in Verbindung mit Umverteilungsprozessen in PHS, CF und Xanthophyllzyklus.

Sonnenlicht-induzierte Chlorophyll-Fluoreszenz (CF)

Mit dem eingangs beschriebenen passiven Meßverfahren mittels eines Spektrometers war es möglich, die sonnenlicht-induzierte Chlorophyll-Fluoreszenz (CF) erfolgreich im Freiland zu erfassen. Der praktische Nachweis für das Entstehen der CF im PS II erfolgte in den Abdunklungsversuchen analog denen von MAIER *et al.* (1999) mit einem neuartigen Versuchsaufbau im Freiland. Dabei konnte der induktionskinetische Verlauf von CF und Photosyntheserate als Folge der veränderten Umverteilung der aPAR als Fluoreszenz bzw. chemische Arbeit durch Wiederbelichtung eines dunkeladaptierten Bestandes nachgewiesen werden.

Zusätzlich änderte sich die Blatttemperatur in Sekundenschnelle um mehr als 1 °C. Mit diesem Beweis der Kautsky-Kinetik konnte bestätigt werden, daß die CF wie die Photosynthese aus dem PS II und nicht aus anderen Prozessen herkommt. Die grundsätzliche Eignung der CF zur Erfassung eines Effizienz-Parameters (in dem Falle der PHS) konnte in diesem Versuch unter Freilandbedingungen bewiesen werden. Der Versuch ließ sich an unterschiedlichen Pflanzenarten, wie von MAIER *et al.* (2003) vermutet, stets reproduzieren. Dem Gedanken des gleichen Informationsgehalts der sonnenlicht-induzierten Chlorophyll-Fluoreszenz (CF) und anderen Chlorophyll-Fluoreszenzen hatten MAIER *et al.* (2003) entgegengearbeitet, indem sie die CF und den GNDVI von verschiedenen Schlägen gegenüberstellten und so den unterschiedlichen Informationsgehalt der beiden Vegetationsindizes herausarbeiteten.

In den Versuchen unter durchziehenden Wolkenfeldern konnte bei variierender Einstrahlung und ansonsten konstanten Bedingungen die enge Korrelation von Photosyntheserate und CF zur PAR mit kontinuierlichen Messungen nachgewiesen werden. Außerdem konnte im Vergleich zu den in diesem Versuch konstant verlaufenden Vegetationsindizes (z.B. GNDVI) der physiologische Informationsgehalt der CF unterstrichen werden. Dieses Ergebnis bestätigte MAIER *et al.* (2003) in ihrer Aussage, den unterschiedlichen Informationsgehalt der CF aus der Gegenüberstellung von CF und GNDVI auf verschiedenen Schlägen zur gleichen Tageszeit ableiten zu können. Die kleinen Unregelmäßigkeiten im Verlauf der Vegetationsindizes in diesem Versuch ließen sich mit der die Blätter bewegenden und damit die Bestandesrückstrahlung beeinflussenden leichten Brise erklären.

Während der Messung der Tagesgänge war die CF zu durchschnittlich 79 % mit der photosynthetisch aktiven Strahlung ($PAR_{\text{außen}}$) korreliert. Der allgemein auftretende, tendenziell hügelartige Verlauf der Tagesgänge der CF war durchweg als typisch zu bezeichnen: Morgens bei geringer Einstrahlung war die CF niedrig, sie stieg mit zunehmender Einstrahlung zuerst stärker, später weniger stark zu einem mittäglichen konstanten Niveau an und fiel dann zum Abend hin wieder ab, zuerst als flache Kurve, später immer steiler abfallend. Auch konnten HANSEN und SCHJOERRING (2003) sowie PEÑUELAS und FILELLA (1998) in ihrer Aussage bestätigt werden, nach der die Höhe der Reflexionssignatur im Nahinfrarotbereich vom Meßtermin bzw. von der Tageszeit beeinflußt wird.

Die normalerweise tendenziell hügelartigen, nicht vom Mittagshitzestress geprägten Tagesgänge waren durch eine Gleichläufigkeit von Photosyntheserate und CF in Abhängigkeit von der PAR sowie sehr hohen Korrelationen zwischen Photosynthese, PAR und CF geprägt. Während der Messung des repräsentativen Tagesgangs in der Zuckerrübe 'Tatjana' konnte kein hochgradiger Einfluss der Chloroplastenbewegung auf die CF wie bei BRUGNOLI und BJÖRKMANN (1992) festgestellt werden, denn die CF nahm noch zu, während sich die Chloroplasten bereits an den Zellwänden untereinander angeordnet anzulagern begannen. Zusätzlich nahm die CF nachmittags bereits wieder ab, als die meisten Chloroplasten noch übereinandergeschoben an den Zellwänden anlagerten. Wohl konnte aber ein Zusammenhang zwischen Chloroplastenbewegung und Photosyntheseeffizienz gefunden werden.

Die nichtrepräsentativen Tagesgänge zeigten nur sehr geringe Korrelationen, z.B. lag die Korrelation in der Kartoffelsorte 'Selma' zwischen PHS und PAR_{innen} bei 15 %). Diese Tage waren von Mittagshitzestress geprägt, wobei sich die Photosyntheserate zur einstrahlungsstarken und damit sehr heißen Mittagszeit bei gleichzeitig unverändertem Verlauf der CF (Korrelation zwischen CF und PAR_{außen}: 58,5 %) stark minimierte. Hier fand eine Entkopplung der Mechanismen von Photosynthese und CF statt, obwohl beide nachweislich aus dem Photosystem II stammen. Die Blatttemperatur lag im Mittagshitzestress sogar teilweise leicht über der Lufttemperatur. Die Drosselung der Photosynthese war während der Mittagshitzeperiode eindeutig temperaturabhängig. Das Phänomen des Mittagshitzestresses trat in den Versuchsreihen bei Temperaturen über ca. 27 °C bis 35 °C (je nach Pflanzenart und -zustand) auf.

Die physiologischen Veränderungen während dieser Mittagshitzedepression ließen sich nicht wirklich mit spektrometrischen Methoden nachvollziehen, sondern nur mit dem LI-COR 6400 in Form von einer gedrosselten Transpirationsrate, stomatären Leitfähigkeit, Photosyntheserate und einer erhöhten Blatttemperatur erfassen. Die Aussage von FRYER (1998) wurde bestätigt, nach der die Korrelationen zwischen dem Elektronentransport des Photosystem II und der CO₂-Fixierung, welche unter Laborbedingungen sehr gut miteinander korrelieren (GENTY *et al.*, 1989), im Freiland zusammenbrechen können.

Bei den Tagesgängen erwies sich das Niveau des Tagesgangs der CF als primär vom Chlorophyllgehalt abhängig, wie von MAIER *et al.* (2003) bereits festgestellt: Mit einem höheren Chlorophyllgehalt war auch das Niveau des Tagesgangs der CF angehoben. Bei den teilweise über mehrere Wochen gehenden Versuchen wurde bei einer reifebedingten Abnahme des Chlorophyllgehalts auch eine Verringerung des Tagesgangniveaus der CF verzeichnet: Die Höhe des Tagesgangs der CF ist also auch vom EC-Stadium abhängig.

In den Stickstoffsteigerungsversuchen und in den Versuchen zu den Sekundärfolgen von Wassermangel traten die Unterschiede im Chlorophyllgehalt und somit auch die Differenzierungen in der Intensität der CF und der anderen Vegetationsindizes (z.B. GNDVI) am deutlichsten zutage; am wenigsten war das in den Fungizidvergleichsversuchen der Fall. Die Versuche zu den Primärfolgen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit waren hier eine Ausnahme, denn die Unterschiede in den Chlorophyllgehalten zwischen den Varianten waren vergleichsweise gering. Trotzdem fuhr die angegossene, durch den höheren Turgor ganz leicht „chlorophyllärmere“ Variante z.B. in *Rheum rhabarbarum* L. bei höheren Einstrahlungsstärken eine weitaus höhere PHS und dabei eine geringere CF und Blatttemperatur als die ungewässerte Variante. In diesem Versuch und auch in *Triticale* 'Modus' waren ganz klar verschiedene Umverteilungsprozesse in den Varianten, durch den unterschiedlichen Turgor ausgelöst, im Gange: Im PSII der angegossenen Variante floß mehr aPAR in die PHS, und somit weniger in die CF (und auch Wärmeabgabe, aufgrund mangels anderer meßbarer Faktoren durch die zumeist geringere Blatttemperatur repräsentiert). Bei der ungewässerten Variante aber floß die aPAR im PSII verstärkt in die PHS und in die Wärmeabgabe (höhere Blatttemperatur) und weniger in die CF. Dieses Phänomen trat in dieser Form nur bei höheren Einstrahlungsstärken auf.

Bei geringeren Einstrahlungsstärken, s. wiederum *Rheum rhabarbarum* L. (Versuch zu den Primärfolgen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit, nachmittags bei bewölktem Himmel, also niedrigeren Einstrahlungsstärken) war es für die Varianten offenbar unnötig, die aPAR in großen Mengen umzuverteilen: Die Verläufe von PHS und CF der Varianten unterschieden sich nur geringfügig. Diese Erscheinung der geringen Unterschiede zwischen den Varianten trat übrigens generell zumeist bei geringeren Einstrahlungsstärken, also früh morgens, abends und bei einem höheren Bewölkungsgrad auf. Tagsüber, also mittags ergaben sich

meistens die größten Unterschiede zwischen den Varianten, sowohl bezüglich der CF als auch der PHS, einfach aus dem Grunde, da hier große oder überschüssige Mengen aPAR umverteilt werden mußten. Bei geringeren Einstrahlungsstärken aber traten keine meßbaren Unterschiede in der Kautsky-Kinetik zutage.

In den Fungizidvergleichsversuchen in der Braugerstensorte 'Duet' traten die Differenzen in der CF zwischen den Varianten vor allem entsprechend dem Chlorophyllgehalt nach dem Erkrankungsereignis auf: Diese Unterschiede zwischen den Varianten wurden noch geringer durch die Angleichung der CF auf den GNDVI und waren im Verhältnis zur Amplitude des Tagesgangs der CF noch insignifikanter, wobei CF und $PAR_{\text{außen}}$ zu 87,2 % korreliert waren. Hier herrschte ebenso an vier Meßtagen Mittagshitze, wovon im Verlauf der CF wiederum nichts zu erkennen war. Auch dieser Tatbestand bestätigte den Rückschluß, daß die Prozesse PHS und CF bei zu hohen Temperaturen und Einstrahlungsstärken entkoppelten. Im Timingversuch (2004) dagegen differenzierten die Varianten zwar lange nach dem Nachweis des Erregers durch PCR, aber vor dem Auftreten erster Symptome.

Generell waren die Unterschiede zwischen den Varianten (beispielsweise in den Fungizidvergleichsversuchen) sehr gering im Vergleich zur hohen Amplitude des Tagesgangs der CF, z.B. im Verhältnis 1:11 (aufgetreten am 3. Juni 2003 um 12:09 Uhr). Das Verhältnis konnte sich aber auch zu 1:100 (5. Juni 2003, 13:41 Uhr) verschieben. Aufgrund dieser sehr feinen Unterschiede wäre ein Einsatz der CF in Fungizidvergleichsversuchen eher fragwürdig, denn es spielen immer zu viele andere Faktoren wie Chlorophyllgehalt, EC-Stadium, PAR usw. in diese ohnehin schon feinen Unterschiede hinein, um anhand der CF vernünftige Diagnosen für einen möglicherweise erkrankten Bestand zu erhalten.

Die CF bewegte sich zwischen Werten größer als 0 und 2,17 (aufgetreten in den Abdunklungsversuchen). Jede Pflanzenart hatte bei einer spezifischen Einstrahlungsstärke und in ihrem derzeitigen Status/Habitus, ihre spezifische CF, z.B. hatte die hochgedüngte Variante des WW 'Pegassos' einen Mittagswert von 0,552 bei einer Sonneneinstrahlung von $1.970 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Bei der ungewässerten Variante *Rheum rhabarbarum* L. hatte die CF einen Wert von fast 1,2 bei einer PAR von $1.577 \mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Aus diesem Grunde werden im Nachfolgenden die Vor- und Nachteile des Herausrechnens solcher Faktoren wie z.B. PAR und Chlorophyllgehalt diskutiert.

Photosyntheseeffizienz und Fluoreszenzquantenausbeute

Die Tagesgänge der Photosyntheseeffizienz (PE) zeichneten sich meist durch große Amplituden bei geringeren Einstrahlungsstärken (morgens und abends) aus. Tagsüber bei höheren Einstrahlungsstärken waren die Tagesgänge durch ein mehr oder weniger konstantes Plateau gekennzeichnet. In Fällen des Mittagshitzeanstieges ging die PE entsprechend dem Verlauf der PHS nach einem morgendlichen Anstieg für den Rest des Tages fast gegen Null, so geschehen z.B. im Stickstoffsteigerungsversuch in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Selma'.

Es trat aber auch das Phänomen auf, daß z.B. die PHS nicht aufgrund von Mittagshitze gestreßt wurde, aber aus dem verminderten Verlauf der PE hervorging, daß zumindest eine leichte Mittagshitzedepression herrschte, so z.B. geschehen in den Versuchen zu den Primärfolgen von Wassermangel in *Rheum rhabarbarum* L. bei höheren Einstrahlungsstärken, denn die PE hätte zu diesem Zeitpunkt höhere Werte haben können, war aber vermindert.

Die Fluoreszenzquantenausbeute (FQA) zeigte keine gleichförmigen Tagesgänge in Hügelform wie die CF. Die Werte lagen zwischen 0,0001 und 0,003, wobei der gleiche Differenzierungsgrad zwischen den Varianten wie bei der CF erreicht wurde, da die CF beider Varianten durch den gleichen Faktor geteilt wurden. Auch lagen die Korrelationen in vergleichbarer Höhe wie die Werte der CF, z.T. auch niedriger. Die Tagesgänge der FQA zeichneten sich meist durch Plateaubildung tagsüber (also bei höheren Einstrahlungsstärken) aus, ähnlich wie das auch bei den Tagesgängen der Photosyntheseeffizienz beobachtet worden ist.

Auch fanden sich bei der FQA bei geringeren Einstrahlungsstärken, also morgens und abends, große Amplituden, die u.a. aus dem Grunde entstanden sein könnten, daß die Daten von CF und $PAR_{\text{außen}}$ zu unterschiedlichen Zeitpunkten akquiriert wurden, da sie von unterschiedlichen Geräten stammten. Als Datenmaterial waren die großen Amplituden morgens und abends erfahrungsgemäß nicht aussagekräftig. Es wäre zu erwarten gewesen, daß ähnlich dem Modell der Umverteilung von CF und PHS im PSII eine Umverteilung auch bei FQA und PE passiert, vor allem bei den großen Amplituden morgens und abends, wenn die PAR gering ist. Die hohen bzw. geringen Werte dieser Amplituden traten aber nach keinem nachvollziehbaren Schema auf, so z.B. im Versuch zu den Sekundärfolgen von Wassermangel in der SW-Sorte 'Triso' geschehen.

PE und FQA verhielten sich in den Abdunklungsversuchen induktionskinetisch. Im Versuch unter durchziehenden Wolkenfeldern zeigten sich die verschiedenen Umverteilungsprozesse im PSII auch in den Verläufen von PE und FQA: Während bei geringeren Einstrahlungsstärken das teilweise höhere Level der FQA und das entsprechend niedrigere Level der PE mit einer geringeren Blatttemperatur und von größeren Amplituden – hier waren einige Ausschläge der PHS definitiv gerätebedingt – begleitet einhergingen, waren die Amplituden bei höheren Einstrahlungsstärken weitaus geringer. Auch dann wurde die aPAR im PSII umverteilt: PE und Blatttemperatur verliefen auf einem höheren Niveau und die FQA auf einem geringeren Niveau.

Trotzdem war bei höheren Einstrahlungsstärken die veränderte Umverteilung auch an dem Verhältnis von PE und FQA sowohl der Varianten untereinander abzulesen, sehr schön zu sehen im o.g. Versuch in der SW-Sorte 'Triso'. In den Fungizidvergleichsversuchen anno 2003 hatte die mit Opera behandelte Variante bei höheren Einstrahlungsstärken eine tendenziell höhere FQA und Blatttemperatur als die unbehandelte Variante, wobei die Photosyntheseeffizienz zwischen den Varianten keine Unterschiede zeigte.

Kombinierte Vegetationsindizes

Durch der Kombination der CF mit einzelnen Vegetationsindizes wurde versucht, die hohe Tagesvariabilität der CF gegenüber Faktoren wie Chlorophyllgehalt, Photosyntheserate und der Aktivität des Xanthophyllzyklus herauszurechnen:

CF/GNDVI

Die Werte von CF/GNDVI variierten zwischen 0,02 und 2,3. Tatsächlich ließ dieser Quotient Rückschlüsse auf die Menge von abgestrahlter CF bezogen auf den Gehalt an Chlorophyll a zu. Mit dem Vergleich von CF/GNDVI und PHS/Chl a wurden zwar keine reellen Werte erreicht, da hier für die Quotientenbildung unterschiedliche Größen aus verschiedenen Quellen herangezogen wurden. Tatsächlich verliefen die Tagesgänge von CF/GNDVI wie die der CF, nur auf einem anderen Niveau. Ausschließlich im multivariaten Versuch in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Edelstein' glichen sich die Kurven der CF der Varianten Unbewässert und Ungedüngt am letzten Meßtag durch die Quotientenbildung derart an, daß davon ausgegangen werden konnte, daß die unbewässerte, chlorophyllreichere Variante genauso stark fluoreszierte, bezogen auf den Chlorophyllgehalt, wie die ungedüngte,

chlorophyllärmere Variante, und damit auch in ähnlichem Umfang Photosynthese betrieb, unter der Voraussetzung einer gleichen Blattemperatur bei beiden Varianten.

Primär- und Sekundärfolgen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit hatten einen unterschiedlichen Einfluß auf das Niveau der Tagesgänge von CF/GNDVI: Während die Werte von CF/GNDVI in den Versuchen zu den Primärfolgen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit bei der ungewässerten Variante gleichermaßen über denen der bewässerten Variante lagen, waren die Verhältnisse bei den Versuchen zu den Sekundärfolgen von Wassermangel bei CF/GNDVI verschoben und glichen denen der Stickstoffsteigerungsversuche: Hier hatte dann die gewässerte Variante höhere CF/GNDVI-Werte als die ungewässerte. Da sich die Varianten in den Fungizidvergleichsversuchen bezüglich des Chlorophyllgehalts kaum unterschieden, näherten sich die Tagesgänge der geringfügig chlorophyllreicheren Varianten und den geringfügig chlorophyllärmeren Varianten in der zweiten Hälfte der Meßperiode an, d.h. erste fluoreszierten nur wenig stärker, bezogen auf den Chlorophyllgehalt, als letztere.

Die Normierung der PHS auf den Gehalt an Chlorophyll a ließ das Niveau der Tagesgänge der PHS der Varianten noch weiter auseinanderklaffen. So betrieb in allen Versuchen außer in den Versuchen zu den Primärfolgen von Wassermangel die chlorophyllreichere Variante eine noch geringere PHS, bezogen auf den Chlorophyllgehalt, als die chlorophyllärmere Variante und fluoreszierte dabei aber durch die Relativierung der CF auf den GNDVI nur noch geringfügig stärker als diese. In der SW-Sorte 'Triso' fluoreszierte die ungewässerte Variante durch die Angleichung auf den Chlorophyllgehalt gar dann sogar stärker als die gewässerte Variante. Die restliche aPAR floß dann bei den chlorophyllärmeren Varianten in den Xanthophyllzyklus (höherer PRI), weniger in die Wärmeabgabe (tendenziell geringere Blattemperatur) und in andere nicht erfaßbare Prozesse. Bei den chlorophyllreicheren Varianten floß dann die Restenergie der aPAR weniger in den Xanthophyllzyklus und mehr in die Wärmeabgabe (geringfügig höhere Blattemperatur).

Die Versuche zu den Primärfolgen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit waren in *Rheum rhabarbarum* L. ein Spezialfall: Hier entfernten sich zwar die auf den Chlorophyllgehalt angeglichenen Photosyntheseraten voneinander, aber gleichzeitig

drifteten auch die Tagesgänge von CF/GNDVI auseinander. Bei höheren Einstrahlungsstärken fuhr die angegossene Variante eine noch höhere PHS/Chl a und noch ein wenig geringere CF/GNDVI als die ungewässerte Variante, bei einem weiterhin höheren PRI und tendenziell geringerer Blatttemperatur als diese.

CF/RVI

Die Werte des Quotienten CF/RVI bewegten sich zwischen 0,0006 und 0,23. Dieser Ansatz ließ folgende Schlußfolgerungen zu: Ein z.B. hochgedüngter, chlorophyllreicher Pflanzenbestand wies durch die Relativierung auf den RVI eine weitaus geringere CF bei einer niedrigen Photosyntheserate auf. Umgekehrt hatte ein niedriggedüngter, chlorophyllarmer Pflanzenbestand eine weitaus höhere CF/RVI bei einer höheren Photosyntheserate, so auch geschehen in den Versuchen zu den Primärfolgen von sekundärem Wassermangel. Theoretisch müßte dann bei der chlorophyllreichen Variante auf der Basis des Modells der Verteilung der aPAR im Photosystem II eine vermehrte Verschiebung der überschüssigen Energie zugunsten der Wärmeabgabe erfolgen, welche aber – wie eingangs erwähnt – nicht direkt meßbar war, hierfür stand dann die Erhöhung der Blatttemperatur. Das würde einen entsprechend hohen Energieabfluß in die Wärmeabgabe bei einer Biomasseeinheit eines hochgedüngten Pflanzenbestandes bei gleichzeitiger geringer Photosynthese und CF bedeuten, sowie einen geringen Energieabfluß in die Wärmeabgabe bei einem niedriggedüngten Pflanzenbestand bei einer hohen PHS und CF/RVI.

In den Fungizidvergleichsversuchen ('Duet', 2003) verschob sich das Verhältnis der Varianten an den letzten drei Meßtagen durch die Beziehung der CF auf den RVI v.a. dadurch, daß der RVI der unbehandelten Variante zum Meßperiodenende mehr als der RVI der mit Opera behandelten Variante absank, so daß der CF/RVI der unbehandelten Variante über den CF/RVI der Variante Opera bei höheren Einstrahlungsstärken anwuchs.

Im Versuch zu den Primärfolgen von Wassermangel fluoreszierte die angegossene Variante von *Rheum rhabarbarum* L. durch die Relativierung auf den RVI noch schwächer als die ungewässerte Variante. Im zweiten Versuch zu den Primärfolgen von Wassermangel im *Triticale* 'Modus' aber zeigten die Tagesgänge von CF/GNDVI keine Verschiebungen zu CF, wohl aber hatte die ungewässerte Variante einen geringeren CF/RVI als die angegossene Variante. Das Phänomen der Zunahme von CF/RVI bei gleichzeitiger Abnahme der CF und anderen

Vegetationsindizes während der Meßperiode konnte genauso ein Zeichnen der Abreife eines Pflanzenbestandes sein, sehr gut nachvollziehbar z.B. in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Edelstein'.

CF/PRI

CF/PRI war der inspirierte Versuch, zwei Vegetationsindizes, die beide v.a. einen physiologischen Hintergrund haben, miteinander zu kombinieren, um deren Gegen- oder Gleichläufigkeit tiefgreifender zu verstehen: Die Intensität der CF wurde gegen die Aktivität des Xanthophyllzyklus gesetzt, frei nach dem Motto, welcher von beiden Prozessen zu einem bestimmten Zeitpunkt mehr Energie ableitet, um weitere Rückschlüsse auf die Photosyntheseaktivität eines Pflanzenbestandes ziehen zu können.

CF/PRI hatte einen induktionskinetischen Verlauf in den Abdunklungsversuchen. Der zuerst hohe Wert von CF/PRI kurz nach Abdunklungsende zeigte, daß der Bestand in Relation zu einem geringen Aktivitätsniveau des Xanthophyllzyklus (geringer PRI) zuerst sehr stark fluoreszierte, später aber die CF im Vergleich zu einem immer aktiver werdenden Xanthophyllzyklus (hoher PRI) schwächer wurde, während auch PHS und Blatttemperatur anwuchsen. Im Versuch unter durchziehenden Wolkenfeldern war CF/PRI hoch korreliert mit $PAR_{\text{außen}}$ und hatte einen ähnlichen, wenn auch abgeschwächten Tagesgang als die CF, d.h. bei höheren Einstrahlungsstärken wurde verhältnismäßig mehr aPAR durch die CF als durch den Xanthophyllzyklus gequencht, bei geringeren Einstrahlungsstärken morgens und abends war die Menge an abgegebener CF geringer, bezogen auf die Aktivität des Xanthophyllzyklus, gilt die CF ja als ein lichtabhängiger Prozeß.

Die Werte von CF/PRI bewegten sich zwischen 0,4 und 24, eine viel größere Bandbreite als bei CF oder PRI alleine. Beide Vegetationsindizes, CF und PRI besaßen neben ihrem physiologischen Informationsgehalt einen – wenn auch unterschiedlich – verlaufenden Tagesgang. Deswegen wirkte sich dieser Quotient qualitätssteigernd auf die Ergebnisse aus, denn er drückte sich die verhältnismäßige Menge an abgegebener Energie durch die CF zur Menge an abgeführter Energie durch den Xanthophyllzyklus aus. Zusätzlich zu den Informationen, die CF und PRI alleine lieferten, ließ sich von CF/PRI ableiten, wie diese Prozesse miteinander korreliert waren.

In den Stickstoffsteigerungsversuchen hatte die ungedüngte, also gestreßte Variante bei einer höheren Photosyntheserate signifikant geringere CF/PRI-Werte (bei einer schwächeren CF und einem höheren PRI) als die gedüngte, ungestreßte Variante (bei einer stärkeren CF und einem geringeren PRI). N-Mangel ließ die Photosyntheserate sowie den PRI bei gleichzeitiger Verringerung der CF, der Blatttemperatur und von CF/PRI ansteigen.

In den Fungizidvergleichsversuchen in *Hordeum vulgare* L. 'Duet' (2003) fielen vor allem die Mittagswerte von CF/PRI der unbehandelten Variante an den letzten vier Meßtagen geringer aus als die Werte der Variante Opera. Die unbehandelte Variante fluoreszierte pro Aktivitätseinheit des Xanthophyllzyklus weniger als die Variante Opera, obwohl der PRI bei der unbehandelten Variante tendenziell höher lag als bei der Variante Opera, also demnach einen aktiveren Xanthophyllzyklus hatte als diese. Durch die Relativierung der CF auf den PRI differenzierten die Varianten mehr als bezüglich der CF alleine.

Primärer Wassermangel verringerte Photosyntheserate und PRI, während CF, Blatttemperatur und CF/PRI anstiegen: Die ungewässerte Variante fluoreszierte in den Versuchen zu den Primärfolgen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit, bezogen auf die Aktivität des Xanthophyllzyklus, bei hohen Einstrahlungsstärken deutlich mehr als die angegossene Variante. In den Versuchen zu den Sekundärfolgen von Wassermangel war es genau umgekehrt und es zeigte sich das gleiche Bild wie in den Stickstoffsteigerungsversuchen.

An den letzten beiden Meßtagen in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Edelstein' aber zeigte die ungewässerte Variante mit den Primärsymptomen von Wassermangel bei einer stärkeren CF und einem geringeren PRI durchweg höhere CF/PRI-Werte als die Kontrolle (schwächere CF und höherer PRI), was bereits bei den Versuchen zu den Primärsymptomen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit der Fall war und demnach – auf Basis dieser vorhergehenden Versuchsergebnisse – auf eine geringere Photosyntheserate bei der ungewässerten Variante schließen ließ. Aufgrund der Mittagswerte von CF/PRI war eine ganz klare Unterscheidung von den Primärsymptomen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit und den chlorophyllärmeren Varianten Ungebeizt und N₅₀ möglich. Die Verrechnung der CF mit dem PRI ließ die Variante noch mehr auseinanderdriften: Die N₅₀-Variante fluoreszierte im Gegensatz zur ungebeizten Variante weitaus stärker pro PRI-Einheit,

was auf eine eventuelle spektrometrische Unterscheidungsmöglichkeit zwischen nekrotischem und gelblichem Gewebe auch in anderen Kulturführungen hinweisen könnte.

Die Kautsky-Kinetik und die Möglichkeiten der Streßunterscheidung anhand spektrometrischer Daten

Von dem am Beginn der Arbeit vorgestellten Modell der Verteilung der aPAR in den Photosynthesezentren I und II mit den drei Endpools (Chemische Arbeit, Fluoreszenz und Wärmeabgabe) waren die Photosynthese (PHS) und die sonnenlicht-induzierte Chlorophyll-Fluoreszenz (CF) die einzigen meß- und erfaßbaren Größen. Allein die Größe der Wärmeabgabe des Photosystems II aber war zu diesem Zeitpunkt nicht meßbar und deswegen tatsächlich unbekannt.

Die Wärmeabgabe eines Bestandes kann zwar mit speziellen Infrarotkameras gemessen werden. Diese relativ unspezifische Wärme hat aber ihren Ursprung in allen möglichen Prozessen und könnte deswegen nur unter Umständen eine gewisse Aussagekraft haben. Bei der Wärmeabgabe des Photosystems II soll es sich um eine Größenordnung von 7 % der gesamten aPAR handeln, während in die Photosynthese bis zu 90 % und in die Fluoreszenz ca. 3 % fließen (BJÖRKMANN und DEMMIG, 1987). Daraus ergibt sich folgendes: Wenn also z.B. im Mittagshitze-streß die Photosyntheserate bei unverändertem Verlauf der CF stark gedrosselt wird, müßte die nicht meßbare Wärmeabgabe des PS II als dritter Outputweg um einen entsprechenden Differenzbetrag ansteigen.

In den Abdunklungsversuchen und im Versuch unter durchziehenden Wolkenfeldern war immer wieder die abrupte Änderung der Blatttemperatur durch die Veränderung der PAR bei einer kontinuierlich verlaufenden Lufttemperatur eminent. Obwohl nicht sicher war, in welchem Maß die Blatttemperatur von der Wärmeabgabe des PSII und anderen Prozessen wie z.B. der Wärmeabgabe durch den Xanthophyllzyklus beeinflußt wurde, waren diese innerhalb von einigen Sekunden in den Versuchen unter Wolkendurchzugsfeldern bzw. in den Abdunklungsversuchen stattfindenden Änderungen der Blatttemperatur mehr als frappant. Es hätte sich ja auch die Lufttemperatur entsprechend der sich ändernden Einstrahlungsstärke anpassen können, was sie aber nicht tat. Dieser reproduzierbare Tatbestand einer sich verändernden Blatttemperatur durch unterschiedliche Einstrahlungsverhältnisse bei gleichzeitig konstant verlaufender Lufttemperatur ließ vermuten, daß die

Blatttemperatur von einigen anderen abiotischen und biotischen Faktoren und auch von der Wärmeabgabe des PSII beeinflusst wurde und zwar in nicht geringem Maße. Immerhin betragen die Änderungen stets je ca. 1 °C. Aus diesem Grund wurde die Blatttemperatur, quasi für die Wärmeabgabe stehend, bei der Evaluierung der Daten stark miteinbezogen.

Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse fanden tatsächlich ständig mehr oder weniger gewichtige Umverteilungsprozesse im PSII statt. Auch vor dem Auftreffen auf das PSII fanden bereits Ableitungsprozesse der überschüssigen aPAR (z.B. durch den Xanthophyllzyklus repräsentiert durch den PRI) statt. Vor allem in den Abdunklungsversuchen aber trat die Kautsky-Kinetik in reinster Form zutage und war auch immer wieder zuverlässig reproduzierbar.

In dem Versuch unter durchziehenden Wolkenfeldern war der Lichtsättigungspunkt unter der prallen Sonne fast erreicht, obwohl CF, PHS und Blatttemperatur parallel verliefen. Auch hier fanden Umverteilungsprozesse im PSII statt, denn PAR und Lufttemperatur waren relativ hoch, aber offenbar noch nicht hoch genug, als daß die PHS gedrosselt worden wäre. Auch wenn hier also kein eminenter Mittagshitze stress herrschte, konnte bei gleichzeitiger Betrachtung von FQA und PE das Vorhandensein von induktionskinetischen Umverteilungsprozessen, also eine leichte Form des Mittagshitze stress, abgeleitet werden, obwohl FQA und PE nur zu 47,6 % miteinander invers korreliert waren: Die PE war bei höheren Einstrahlungsstärken gedrosselt, während die FQA und die Blatttemperatur dann auf höherem Level verliefen. Hier fand also, wenn auch „versteckt“, eine Umverteilung der aPAR im PSII zugunsten der FQA und auch der Wärmeabgabe (höhere Blatttemperatur) statt, und das, obwohl CF und PHS weitestgehend parallelläufig waren. Es war aber nur möglich, diese Umverteilung im Vergleich zu den Zuständen bei geringeren Einstrahlungsstärken in den Verläufen von FQA und PE abzulesen, als die PE auf einem geringfügig höheren und die FQA sowie die Blatttemperatur auf einem leicht geringeren Level verliefen. In ebendiesem Rapsbestand wurde am selben Meßtag neben dem Versuch unter durchziehenden Wolkenfeldern ein Abdunklungsversuch durchgeführt, in dem die induktionskinetische Beziehung von PHS und CF (unter Einbeziehung der Blatttemperatur) und der Quelle beider Prozesse aus dem PSII nachgewiesen werden konnte (s. Anhang). Das Phänomen eines schwach ausgeprägten Mittagshitze stress mit einer geringfügig gedrosselten

PE und einer leicht erhöhten FQA trat im Laufe der Versuche immer wieder bei hohen Einstrahlungsstärken (im Vergleich zu geringen Einstrahlungsstärken) auf.

Starker Mittagshitze stress trat vermehrt vor allem während des Jahrhundertssommers 2003 auf, so geschehen z.B. an allen Meßtagen im Stickstoffsteigerungsversuch in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Selma'. Im Mittagshitze stress wurde bei hohen Einstrahlungsstärken und Temperaturen die Transpirationsrate durch Stomataschluß minimiert und die PHS gedrosselt. Im Verlauf der CF schlug sich diese Drosselung aber nicht nieder, denn diese stieg nicht, wie vermutet, durch eine Umverteilung im PSII zugunsten der CF, an. Hier fand also eine Entkoppelung der Prozesse PHS und CF statt. Die Blatttemperaturen lagen dann zumeist über der Lufttemperatur. In den N-Steigerungsversuchen waren u.a. Differenzierungen von PHS, PRI, CF, usw. zwischen den Varianten zu beobachten, aber bei höheren Einstrahlungsstärken temporär auftretende Unterschiede in der Blatttemperatur. Die N- und damit Chlorophyllmangelvariante fuhr dann eine höhere PHS, einen höheren PRI und eine geringere CF und geringere Blatttemperatur als die ungestreßte chlorophyllreiche Kontrolle. Somit wurde zwar überschüssige aPAR u.a. vor dem Auftreffen auf das PSII durch den Xanthophyllzyklus „abgefischt“, es fand aber keine Verschiebung der aPAR im PSII in Richtung CF statt und es wurde ja die PHS gedrosselt, wobei die PHS der N-Mangelvariante immer noch über der der Kontrolle lag. Hier fanden also die für die Stickstoffsteigerungsversuche typischen Umverteilungsprozesse im PSII mit größeren Unterschieden zwischen den Varianten statt.

Allein in den Fungizidvergleichsversuchen traten die geringsten Unterschiede zwischen den Varianten auf. Es konnte – wenn überhaupt - nur am Ende der Meßperiode ein „Greening“-Effekt in der mit Opera behandelten Variante realisiert werden, also ein höherer Chlorophyllgehalt, der zusammen mit einem erhöhten Stickstoffgehalt auftrat. Dies wirkte sich erhöhend auf Blatttemperatur, CF, REIP sowie GNDVI und minimierend auf die stomatäre Leitfähigkeit, Photosyntheserate und PRI sowie CF/PRI aus. In der Braugerstensorte 'Duet' (2003) fand eine zeitweise Differenzierung der Blatttemperatur (unter der Prämisse von deren Repräsentabilität) und der CF zwischen den Varianten statt, wobei sich die Varianten bezüglich der PHS geringfügig unterschieden. Hier passierte die Verschiebung in der Umverteilung der aPAR im PSII zwischen Blatttemperatur und CF, weniger in Richtung PHS, je nach Variante: Bei der unbehandelten, also leicht chlorophyllärmeren Variante

prägten sich an den letzten beiden Meßtagen neben einer geringeren CF und Blatttemperatur eine meist erhöhte PHS/Chl a, eine erhöhte CF/GNDVI und ein erhöhter PRI aus, d.h. es herrschte eine erhöhte Fluoreszenz und Photosyntheserate, bezogen auf den Chlorophyllgehalt, bei einer verminderten Blatttemperatur, also eine Umverteilung im PSII weniger in Richtung Wärmeabgabe mehr in Richtung CF/GNDVI und PHS/Chl a. D.h. hier war es möglich, ähnlich wie bei einem veränderten Verhältnis von PE und FQA bei scheinbar fast nicht vorhandenen Unterschieden von PHS und CF zwischen den Varianten, durch die zusätzliche Betrachtung der Quotienten PHS/Chl a und CF/GNDVI sonst unscheinbare Unterschiede herauszuarbeiten. Grundsätzlich waren der Interpretation der Ergebnisse in den Fungizidvergleichsversuchen aufgrund der sehr geringen Unterschiede zwischen den Varianten klare Grenzen gesetzt. Auch ließ sich nur an den beiden letzten Meßtagen die veränderte Umverteilung der PAR im PSII feststellen.

Es zeigte sich also in den Fungizidvergleichsversuchen zwischen den Varianten, die sich hier im Endeffekt v.a. in der N-Aufnahme und Chlorophyllaufbau als Folge des Erkrankungsgrades unterschieden, ein „kleines“ Bild der Umverteilung der aPAR im PSII, während in den N-Steigerungsversuchen ein „großes“ Bild mit größeren Unterschieden auftrat, da hier die Unterschiede zwischen den Varianten größer waren. So wäre es auch schwierig, allein mit spektrometrischen Methoden zwischen Krankheitsdruck und beginnendem N-Mangel (also mit geringeren Unterschieden zwischen den Varianten) zu unterscheiden. Auch konnte mit spektrometrischen Methoden keine Früherkennung erfolgen, da die Unterschiede zwischen den Varianten im Gegensatz zur Gesamtamplitude des Tagesgangs der CF zu gering ausfielen, und es nicht sichergestellt werden konnte, daß sich eine Erkrankung vor oder nach dem Auftreten der Symptome in den spektrometrischen Daten niederschlug: In den spektrometrischen Daten wurden die Unterschiede zwischen den Varianten in 'Duet' anno 2003 erst nach dem Auftreten der ersten Symptome und anno 2004 lange vor dem Auftreten der ersten Symptome apparent.

In den Versuchen zu den Primärsymptomen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit hatte die leicht chlorophyllreichere Wassermangelvariante bei höheren Einstrahlungsstärken eine geringere Photosyntheserate und einen geringeren PRI bei einer überwiegend höheren Blatttemperatur und einer höheren CF als die Kontrolle. Bei geringeren Einstrahlungsstärken waren die Unterschiede

zwischen den Varianten weitaus geringer ausgeprägt, bis auf den PRI, dessen Differenz zwischen den Varianten, v.a. in *Rheum rhabarbarum* L., stets vergleichbar groß war. Hier konnten die Primärsymptome bei ihrem Erscheinen mit spektrometrischen Methoden erfaßt und von anderen Streßarten aufgrund der verschobenen Umverteilung der aPAR von den Varianten in den N-Steigerungs- und den Fungizidvergleichsversuchen unterschieden werden. Bei ihnen verschob sich die Umverteilung der aPAR im Photosynthesezentrum II unter verstärkter Sonneneinstrahlung so, so daß die aPAR im PSII weniger in die Photosynthese und vermehrt in die Fluoreszenz und auch in die Wärmeabgabe floß. Hier lag ein eindeutiger Beweis zu einer Umverteilung der aPAR im PSII allein durch den unterschiedlichen Turgor vor. Außerdem wurde hier mit Spektrometer und Photosynthesegerät jeweils ein für beide Geräte (Spektrometer und Photosynthesemeßgerät) vergleichbarer Ausschnitt an den großflächigen Blättern von *Rheum rhabarbarum* L. erfaßt, so daß eine Beeinflussung der Meßergebnisse durch ein Bodensignal oder einen variablen BFI ausgeschlossen werden konnte. Dieses typische Bild einer Kautsky-Kinetik für die Primärfolgen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit konnte auch im *Triticale* 'Modus' v.a. am zweiten Meßtag reproduziert werden.

Es ist davon auszugehen, daß die Primärsymptome von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit, wie sie hier in „reiner“ Form künstlich durch Angießen induziert wurden, in der freien Natur in diesen Extremen eher selten vorkommen, außer z.B. bei einem nach längerer Trockenperiode plötzlich beregneten Areal neben einem durch z.B. einen Dachvorsprung nicht beregneten Areal. Beginnender Wassermangel durch Trockenheit zieht neben einem geringeren Turgor ziemlich schnell einen gedrosselten Stoffwechsel nach sich, was wiederum einen geringeren Aufbau an organischen Substanzen und auch Chlorophyll sowie einen verminderten Wuchs usw. innerhalb weniger Tage bewirkt, was wiederum den Effekt einer veränderten Bestandesrückstrahlung hat, und so innerhalb von Tagen das Bild der Sekundärfolgen von Wassermangel erzeugt wird.

Im Versuch zu den Sekundärfolgen von Wassermangel in der Winterweizensorte 'Ludwig' hatte die chlorophyllärmere Wassermangelvariante eine hohe PHS und einen hohen PRI und eine geringere CF bei gleicher Blattemperatur als die ungestreßte Variante. Auch hier fand wieder eine verschobene Umverteilung der aPAR bei der Wassermangelvariante statt: Aufgrund der höheren Photosynthese-

bzw. Photosyntheseeffizienzwerte bei höheren Einstrahlungsstärken bei der Wassermangelvariante wurde die aPAR im Photosystem II zugunsten der Photosynthese und zu Ungunsten der Fluoreszenz verteilt. Dieses typische Bild der Sekundärfolgen von Wassermangel unterschied sich in seiner Ausprägung bis auf die fast gleiche Blatttemperatur von gestreßter und ungestreßter Variante nicht sehr von dem der N-Steigerungsversuche, was ein Problem dahingehend darstellte, da dann allein anhand von spektrometrischen Daten nicht zwischen N-Mangel und Sekundärfolgen von Wassermangel unterschieden werden konnte.

Im multivariaten Versuch in *Solanum tuberosum L. cv. 'Edelstein'* konnte anhand der CF und den anderen Vegetationsindizes nicht nur Streß als solches detektiert werden, sondern auch teilweise zwischen den Streßarten unterschieden werden: Die Primärsymptome von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit zeichneten sich bei der durch den geringeren Wassergehalt „chlorophyllreicheren“ Wassermangelvariante durch eine hohe CF bei geringem PRI aus. Dagegen sank bei Stickstoffmangel die CF bei hohem PRI. Der Stickstoffmangel war in diesem Falle mit spektrometrischen Methoden (geringere RVI- und GNDVI-Werte) frühzeitiger diagnostizierbar als mit anderen Methoden. Die Symptombildung der Erkrankung bei der ungebeizten Variante schlug sich zwar in den spektrometrischen Daten (sinkende RVI- und GNDVI-Werte) nieder, es war aber weder eine Früherkennung noch eine wirkliche, also wiederholbare Unterscheidung von den anderen Streßarten möglich. Zusätzlich zu den bereits diskutierten Unterscheidungsmöglichkeiten zwischen den Streßarten N-Mangel, Krankheitsdruck, Primär- und Sekundärfolgen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit, trat nur in diesem Versuch eine erhöhte RG-Ratio in der N-Mangelvariante in Erscheinung:

Die RG-Ratio war in *Solanum tuberosum L. cv. 'Edelstein'* bei der N-Mangelvariante sehr hoch gegenüber den anderen Varianten ausgeprägt. Offenbar trug die für *Alternaria* typische Symptomatik, v.a. die Nekrotisierung, zu diesem Signal bei. Dieses andere Verhalten der RG-Ratio könnte hier in Verbindung mit der Verteilung von CF, PRI, REIP, RVI und GNDVI die Möglichkeit von Rückschlüssen auf die Streßart bedingt zulassen: Eine geringe RG-Ratio bei niedrigem REIP, RVI und GNDVI bei der ungebeizten Variante hätte hier als Hinweis auf einen Krankheitsdruck gelten können, eine hohe RG-Ratio mit niedrigem REIP, RVI und GNDVI zeigte so einen Stickstoffmangel bei der N₅₀-Variante auf. Kontrolle und ungewässerte Variante lagen mit ihrer RG-Ratio bei gleichbleibend höheren Werten

von REIP, RVI und GNDVI, gelagert zwischen denen von ungebeizter und N₅₀-Variante. Leider trat die Verteilung der RG-Ratio in dieser Form nur in diesem multivariaten Versuch bei den einzelnen Streßarten auf, was weder in anderen Versuchen noch in *Solanum tuberosum* speziell reproduzierbar war.

Die Ergebnisse dieses multivariaten Versuches gaben weiteren Aufschluß über die Möglichkeit, mit spektrometrischen Methoden allein den physiologischen Status eines Pflanzenbestandes zu erfassen. Aus den früheren Ergebnissen hergeleitet, konnte teilweise auf den Photosynthesestatus in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Edelstein' auf der Basis der Verteilung der aPAR im Photosystem II geschlossen werden, trotz fehlender Meßgrößen des LI-COR 6400: Bei höheren Einstrahlungsstärken (hier bei einer PAR von umgerechnet ca. 2.000 $\mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$) und einer Lufttemperatur von ca. 30 °C wurde hier, unabhängig vom Verlauf von CF und PRI, von zumindest leichtem Mittagshitzestreß, also einer leichten Drosselung der Photosyntheserate ausgegangen, basierend v.a. auf den Ergebnissen des Stickstoffsteigerungsversuchs in *Solanum tuberosum* L. cv. 'Selma' und dem Verlauf von FQA. So war hier vermutlich die PHS der N-Mangelvariante erhöht, sowie die PHS/Chl a bei der ungebeizten Variante leicht erhöht, welche Annahmen auf Basis der vorhergehenden Versuchsergebnisse beruhen und sich teilweise in den Verläufen von CF und PRI wiederfanden.

Generell fanden in allen Tagesgängen bei höheren Einstrahlungsstärken dramatischere Umverteilungsprozesse statt als bei geringeren Einstrahlungsstärken. Je nach Streßart und Einstrahlungsstärke passierten also anders gewichtete Umverteilungsströme der aPAR vor und nach dem Eintreffen im PSII. Nur der Mittagshitzestreß, bei dem die PHS gedrosselt wurde, konnte in den spektrometrischen Daten, vorzugsweise in einer Änderung von CF und PRI, nicht wiedergefunden werden. Der Mittagshitzestreß bzw. eine durch zu hohe Temperaturen bzw. überschüssige aPAR ausgelöste Streßsituation konnte also allein anhand der zur Verfügung stehenden spektrometrischen Daten nicht detektiert werden. Der Einfluß von Streß auf die CF konnte deswegen in den meisten Versuchen zwar nachgewiesen werden, außer im Falle von Mittagshitzestreß, wenn die Prozesse PHS und CF entkoppelten.

Bei all diesen Betrachtungen stellte sich immer wieder die Frage, wann und warum der Bestand wieviel der aPAR vor und nach dem Auftreffen im PSII selber in

die Prozesse Xanthophyllzyklus, CF, PHS und Wärmeabgabe umverteilt. Dies war zumeist nachvollziehbar, schlug sich aber nicht immer ausreichend in den spektrometrischen Daten, respektive den Vegetationsindizes und speziell der CF nieder, z.B. im Mittagshitzeß. Es gab also insgesamt mehr Ports, in welche die aPAR hinfließen konnte, die mehr oder weniger mit dem vorhandenen Versuchsaufbau erfaßt werden konnten. Bei Stickstoffmangel und den Sekundärsymptomen von Wassermangel fanden bei höheren Einstrahlungsstärken anders gewichtete Umverteilungsprozesse (Verschiebung der aPAR in chemische Arbeit) als bei den Primärsymptomen von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit (Verschiebung der aPAR in Wärmeabgabe) und darüber bei der ungestreßten Kontrolle statt.

Die CF ist nichtsdestotrotz eine von vielen Fluoreszenzen, die im NIR-Bereich auftreten. Nicht erfaßbar war auch die mögliche Umverteilung zwischen den verschiedenen Fluoreszenzarten bzw. Singulettts und auch den Eingangs erwähnten Tripletts mit eigenen Ausgangsports, z.B. Phosphoreszenz und Carotinoide. Auch dies ist ein Grund, warum die CF alleine kein aussagekräftiger Parameter für den Photosynthesestatus eines Pflanzenbestandes sein kann. Eines der größten Mankos bei der Zuführung der CF zu ihren Informationsgehalten war vor allem die große Tagesgangamplitude der CF im Verhältnis zu den dazu geradezu geringfügig erscheinenden Veränderungen, die eine veränderte Umverteilung der aPAR im PSII bzw. ein Stressor hervorriefen. Deswegen war die CF als Parameter alleine, um die PHS eines Bestandes erfolgreich bestimmen zu können, ungenügend. Gerade diese große Tagesgangamplitude der CF würde es unter anderem so schwierig machen, aus im Rahmen des Precision Farming durchgeführten punktuellen Messungen der CF Informationen über den Photosynthesestatus eines Pflanzenbestandes schlußzufolgern, da bisher immer ein Tagesgang mit Vergleichsmessungen von einer Kontrolle vorhanden war, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen.

Fazit

Die meisten Meßergebnisse waren sowohl in den angelegten Versuchen wie z.B. den Wasserstreßversuchen als auch bei spontan aufgetretenen Symptomen in inhomogenen Beständen auf „normal“ landwirtschaftlich genutzten Ackerflächen reproduzierbar. Die Wahrscheinlichkeit, unter freiem Himmel den idealen, in allen Merkmalen idealen Tagesgang messen zu können, ist eher gering, da es nur an

wenigen Tagen eine sich mit dem Sonnenstand hochkorrelierte Einstrahlung (also ohne Störfaktoren wie z.B. Wolken) und der damit zu nahezu 100 % korrelierten Temperatur gibt. Es konnte also immer Abweichungen von der Norm geben. Deswegen traten auch bei den Verläufen der physiologischen Parameter (z.B. Transpirationsrate und Photosyntheserate) sowie tagesveränderlichen Vegetationsindizes diverse Amplituden im Tagesverlauf auf.

Ziemlich schnell kristallisierte sich im Laufe der Messungen heraus, daß es bei der CF um mehr ging, als die eingangs besprochene Kautsky-Kinetik im PSII, bei der eine hohe CF mit einer geringen PHS und eine geringe CF mit einer hohen PHS auftreten würde. Denn mit Eintreten des Mittagshitzestresses und der damit verbundenen Drosselung der PHS hätten die CF und/oder die Blatttemperatur sowie auch der PRI theoretisch ansteigen müssen, was sie aber *in praxi* nicht taten. In einigen Fällen, v.a. im Mittagshitzestreß, blieb es daher ungeklärt, in welche möglichen Ports die überschüssige aPAR geflossen ist, weshalb hier wiederum die im Jabłoński-Diagramm für das Chlorophyll a aufgezeigten weiteren Ports ins Spiel kommen.

Die wesentlichen Modellvorstellungen von MAIER (1999) und MAIER *et al.* (2003) waren, daß die CF den Status des PSII angeben würde: Der Elektronenfluß durch das Photosystem II würde unter vielen Bedingungen die grundsätzliche Photosyntheserate anzeigen. Anhand der CF könnte die Photosynthese ohne irgendeinen Zeitverlust geschätzt werden, unter Bedingungen, wo andere Methoden versagen würden. Diese Aussagen konnten im Zuge dieser Arbeit nur teilweise bestätigt werden, womit die Möglichkeiten zur Anwendung der im angewandten Pflanzenbau, in der Umweltforschung, Pflanzenphysiologie und Pflanzenschutzversuchen eingeschränkt sind.

Die CF ist aufgrund der vorliegenden Ergebnislage ein Vegetationsindex mit starkem abiotischem Hintergrund und zusätzlichem physiologischen Informationsgehalt: Der Stressor, z.B. Stickstoff- bzw. Wasserverfügbarkeit, beeinflusste den Chlorophyllgehalt, der wiederum das Niveau des Tagesgangs der CF bestimmte. Hinzu kam die physiologische Komponente: Da die CF wie die Photosyntheseleistung aus dem Photosystem II stammt, ist sie somit auch eine Größe für Photosynthesestatus und damit könnte sie – in Verbindung mit anderen Vegetationsindizes – zur Bestimmung der Streßsituation eines Pflanzenbestandes

herangezogen werden. Auch MAXWELL und JOHNSON (2000) waren sich einig, daß, obwohl die CF eine bedeutungsvolle Methode ist, sie doch begrenzt ist.

Es konnten vor allem Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten und auch Tendenzen herausgearbeitet werden, aber aufgrund ihrer hohen Tagesvolatilität kann die CF nicht alleine als Grundlage zur Beurteilung des Photosynthesestatus eines Pflanzenbestandes herangezogen werden. Auch die Einbeziehung weiterer Vegetationsindizes, wie hier in der Arbeit geschehen, war nur teilweise erfolgreich. Neben der Messung der Größen der CF und der Photosyntheseleistung fehlte die dritte variable Outputgröße aus dem PSII, nämlich die Wärmeabgabe des PSII, die zwar für diese Arbeit anhand der Blatttemperatur mehr oder weniger abgeleitet werden, aber mit der vorhandenen Gerätschaft nicht wirklich erfaßt werden konnte. Deswegen konnte auch keine klare Aussage darüber gemacht werden, wie das Zusammenspiel dieser drei Größen im Einzelnen stattfand, sondern es konnten nur Rückschlüsse anhand der Datenlage für Einzelfälle gemacht werden. Auch ließen sich teilweise die Reaktionen auf physiologischer Ebene, z.B. die Symptomatik des Mittagshitzezustresses, nicht in der CF und nur teilweise in den Spektraldaten wiederfinden und umgekehrt. Auf dieser Basis ließ sich keine eindeutige Schlußfolgerung ableiten, sondern es ließen sich nur Teilaspekte beschreiben. Dies war leider nicht genug, um zu einer eindeutigen Aussage über die optimale Bestandesevaluierung mit den hier angewandten Methoden zu kommen. Vielmehr wird die Empfehlung ausgesprochen, bei weiterführenden Untersuchungen die Blatttemperatur als Repräsentativum für die Wärmeabgabe des PSII als mehr oder weniger brauchbare Größe heranzuziehen, gemessen z.B. mit Wärmebildkameras, die den Infrarotbereich abdecken. Denn daß sich Änderungen in der Umverteilung der aPAR im PSII auch in der Blatttemperatur widerspiegeln, konnte in den verschiedenen Versuchen (v.a. Abdunklungsversuchen und Versuch unter durchziehenden Wolkenfeldern) eindeutig gezeigt werden. Es wäre empfehlenswert, zusätzlich einen Lichtquantensensor einzusetzen, denn die Daten der Einstrahlungsintensität waren von unschätzbarem Wert für die Zuordnung der einzelnen Größen, v.a. von PHS und CF. Die Mittagswerte bei höheren Einstrahlungsstärken differenzierten am meisten und erwiesen sich grundsätzlich so am nützlichsten. Bei Mittagshitzezustreß aber entkoppelten ja die Prozesse PHS und CF, und bei geringen Einstrahlungsstärken fanden keine Differenzierungen zwischen

den Varianten statt, so daß beide Situationen keine aussagekräftigen Daten zuließen.

Die Meßmethodik zur Bestimmung der CF wurde für diese Arbeit bodennah mit einem handgehaltenen Spektrometer angewandt. Mit einigen Veränderungen den Verrechnungsalgorithmus betreffend kann die CF sogar vom Flugzeug aus gemessen werden, solange nichtfluoreszierende Objekte im Bild identifiziert werden können (MAIER *et al.*, 2003). Prinzipiell ist diese Methodik sogar auf Satellitendaten anwendbar. MAIER und GÜNTHER (2001, nicht rezensierte Literatur) haben einen aufwendigen Algorithmus erwähnt, der sowohl die Übertragung durch die Atmosphäre als auch die Strahlungspfade berücksichtigt. Die einzige Voraussetzung ist eine hohe spektrale Auflösung, um die nötigen Werte zur Berechnung der CF nahe der Sauerstoffabsorptionsbande erfassen zu können.

Das einzigartige an der CF im Gegensatz zu anderen, bisherigen aktiven Meßmethoden für Chlorophyllfluoreszenz ist, daß sie durch ein berührungsloses und passives Meßverfahren innerhalb kürzester Zeit *in vivo* erfaßt werden kann. Bei den in der Einleitung erwähnten Meßverfahren wie z.B. der PAM-Fluorometrie muß immer ein Impuls an den Pflanzenbestand abgegeben werden, um ein Gegensignal zu erhalten. Außerdem können von demselben Spektrometer, aus dessen Daten die CF errechnet wird, auch noch die übrigen Meßdaten zur Berechnung einer Vielzahl weiterer Vegetationsindizes genutzt und für eine extensive und umfassende Diagnostik verwendet werden.

Fakt war, daß zwar eine Verteilung der aPAR im PSII bei einer vorhandenen Sonneneinstrahlung ständig stattfand, nur wäre eine veränderte Umverteilung v.a. in die PHS in diesen Versuchen mit spektrometrischen Methoden, respektive der CF allein, nicht nachvollziehbar gewesen. Die CF ist deswegen als eine weitere Größe in diesem Spiel der vielen Faktoren anzusehen, um den Photosynthesestatus eines Pflanzenbestandes mit Fernerkundungsmethoden zu bestimmen. Sicherlich ist der Einsatz von Spektrometer und Wärmebildkameras zusammen ein Schritt in die richtige Richtung.

Bei der Erhebung der „Ground truth data“ wirkten sich der jeweilige Aufbau bzw. die Software der verschiedenen Geräte entscheidend auf die Meßmethodik aus. Das für diese Arbeit verwendete Spektrometer hatte mit 0,8 nm eine Auflösung, die fein genug war, um die Intensität der CF den Anforderungen dieser Arbeit gemäß

differenziert genug darstellen zu können. Für zukünftige Messungen aber würde ein Spektrometer mit einer größeren Bandbreite sinnvoll sein, um auch noch andere Vegetationsindizes wie z.B. den SRWI (Simple Ratio Water Index = R_{858} / R_{1240} ; ZARCO-TEJADA *et al.*, 2003) oder den NDWI (Normalized Difference Water Index = $(R_{860} - R_{1240}) / (R_{860} + R_{1240})$; GAO, 1996) mit einzubeziehen.

Diese Arbeit schließt sich den eingangs aufgeführten Aussagen von PEÑUELAS und FILELLA (1998) an, daß spektrometrische Messungen viele Möglichkeiten zur Einschätzung der chemischen Zusammensetzung und der Biomasse von Pflanzen zulassen, und auf dieser Basis des physiologischen Status und der Phänologie eines Pflanzenbestandes. Die bodennahe Messung der spektralen Reflexion mit einfachen, computerisierten bildgebenden Systemen wird so nicht nur eine örtliche, sondern auch eine zeitlich verteilte Informationen für die Forschung der Pflanzenphysiologie, des Bestandes und für das Pflanzenmanagement zur Verfügung stellen. Somit ist auch diese Arbeit ein weiterer Schritt auf dem Weg zu Erfassung und Erhalt von in komplexen regionalen Schichten funktionierenden Ökosystemen.

Die CF ist nicht nur für landwirtschaftliche Zwecke zur Erzeugung von homogenen Beständen und zeit- und bedarfsgerechten Kulturmaßnahmen, sondern auch zur Kontrolle von natürlichen Beständen wie z.B. Regenwäldern ein zusätzlicher, ausbaufähiger Vegetationsindex. Der eingangs aufgestellten Vision, daß der Einsatz der CF nicht nur den gezielten Düngemiteleinsatz, sondern auch andere Kulturmaßnahmen wie Wasser- oder Fungizidmitteleinsatz zu minimieren, sind die Ergebnisse dieser Arbeit sicherlich näher gekommen. Nur ging es bei der CF zu Anfang um eine Allround-Lösung (umgangssprachlich: „Eierlegende Wollmilchsau“) für das Precision Farming. Am Ende dieser Arbeit stehen einige Theoreme mit v.a. pflanzenphysiologischem Hintergrund, die sicherlich der Bestätigung in weiteren Versuchen bedürfen. Diese Arbeit über die sonnenlicht-induzierte Chlorophyll-Fluoreszenz hat jedenfalls ihren eigenen wertvollen Beitrag dazu geleistet, Licht ins Dunkel über das Wann, Warum, Wie, Wieviel und Wohin der Umverteilungsprozesse der aPAR im PSII unter Berücksichtigung der jeweiligen Stressoren zu bringen.

5 Zusammenfassung

Precision Farming soll auf kleinräumige Variationen bei der Ertragsbildung reagieren, um die bestmögliche Ausschöpfung des Ertragspotentials bei gleichzeitiger Minimierung negativer Auswirkungen auf die Umwelt zu sichern. Voraussetzung für ein derart gezieltes Vorgehen ist die spezifische Kenntnis des Bedarfs eines Pflanzenbestandes an dessen Bedürfnissen, z.B. Nährstoffe. Idealerweise würde ein Schlepper bei der Feldbearbeitung über einen Sensor den Düngereinsatz teilflächenspezifisch steuern, um eine termingerechte und effiziente Ausbringung nach möglichst ökologischen Gesichtspunkten zu gewährleisten.

In den hier vorliegenden Untersuchungen konnte mit der einfachen und passiven Meßmethodik der sonnenlicht-induzierten Chlorophyll-Fluoreszenz (CF) in Verbindung mit anderen Vegetationsindizes und auf Basis der Meßdaten des Photosynthesemeßgeräts auf aktuelle Vorgänge im Photosyntheseapparat geschlossen werden. Somit steht zwar eine Technik zur Verfügung, die u.U. eine quantitative Bestimmung der Photosyntheseeffizienz erlaubt, ohne daß dabei das Meßobjekt zerstört oder in anderer Weise beeinflusst wird. In mehrfaktoriellen Feldversuchen wurde der Zusammenhang zwischen den Stressoren Krankheitsdruck, Stickstoffmangel, Wassermangel und der Fluoreszenzemission bei Kartoffel, Getreide und einigen Modellpflanzen funktional erfaßt.

Zunächst konnte ein induktionskinetischer Zusammenhang zwischen CF, photosynthetisch aktiver Strahlung und Photosyntheserate in den Abdunklungsversuchen nachgewiesen werden. Der als Referenz genutzte photochemische Reflektionsindex (PRI) verhielt sich gleichläufig zur Photosyntheserate, während die CF gegenläufig war. Auch die Blatttemperatur (entfernt die Wärmeabgabe des PSII repräsentierend) zeigte entsprechende Veränderungen.

Daneben hatten Faktoren wie Bestandesstruktur, Anteil des Bodensignals, Sortencharakteristika usw. nicht nur auf die CF, sondern auch auf die gesamte Reflexionssignatur einen Einfluß. Der Tagesgang der CF zeigte bei den untersuchten Pflanzenarten stets einen charakteristischen Verlauf und war eng mit der photosynthetisch aktiven Einstrahlung korreliert. Das Niveau des Tagesgangs der CF war bei einem Pflanzenbestand mit einem geringen Chlorophyllgehalt bei gleichzeitig erhöhter Photosyntheserate geringer als bei einem Pflanzenbestand mit einem

hohen Chlorophyllgehalt und geringer Photosyntheserate. Dies könnte darin begründet liegen, daß eine ungedüngte, gestreßte Pflanze unter zusätzlicher Streßeinwirkung mehr Energie in die Streßabwehr umleiten mußte als eine gedüngte, ungestreßte Pflanze, und deswegen zwar eine höhere Photosyntheserate pro Blattfläche aufwies, aber insgesamt nicht so stark wuchs. Offenbar fand hier eine Rückkopplung statt, indem eine erhöhte Streßeinwirkung eine Pflanze veranlaßte, verstärkt Photosynthese zur Streßabwehr zu betreiben.

Weiterhin konnte anhand der CF zwischen optimal wachsenden und gestreßten Pflanzen und indirekt sogar unter Einbeziehung von anderen Vegetationsindizes zwischen den einzelnen Stressoren unterschieden werden. Dazu wurde unter anderem der Quotient CF/PRI gebildet, der die Menge an abgestrahlter CF bezogen auf die Menge an im Xanthophyllzyklus entstandenem energiereichen Zeaxanthin angab.

Trotzdem ist es in den Versuchsreihen nicht wirklich gelungen, die CF als alleinigen Vegetationsindex zur Bestimmung des Photosynthesestatus eines Pflanzenbestandes zu etablieren. Hindernisse waren hierbei die große Tagesgangamplitude der CF und den im Vergleich dazu teilweise geringen Unterschiede zwischen gestreßten Varianten und ungestreßter Kontrolle, d.h. für die bei höherem Sonnenstand empfohlenen Messungen müßte immer eine ungestreßte Kontrolle zur Verfügung stehen. Im Mittagshitzestreß entkoppelten CF, Photosyntheserate und auch Blatttemperatur zuverlässig, d.h. die Drosselung der Photosynthese im Zuge des Mittagshitzestreßes spiegelte sich nicht im Verlauf der CF wieder.

In den verschiedenen Versuchen konnte mit unterschiedlichen Stressoren die jeweilige Umverteilungssituation (Kautsky-Kinetik) der Faktoren CF, Photosyntheserate und Wärmeabgabe (repräsentiert durch die Blatttemperatur) sowie dem PRI herausgearbeitet werden. Die Vielzahl der Ergebnisse erlaubte es zwar, gewisse Allgemeingültigkeiten abzuleiten, denen auch in Verbindung mit anderen Vegetationsindizes klare Grenzen gesetzt waren. Diese Grundlagendaten könnten in entsprechende Empfehlungen so einfließen, daß ein präziser, gezielter Einsatz von Kulturmaßnahmen möglich wird und sich so ökonomische und ökologische Vorteile ergeben.

6 Summary

Precision Farming should be reactive to the minute spatial variations in the yield production thus ensuring the best possible exhaustion of the yield potential while simultaneously minimizing the negative effects on the environment. A precondition for such a targeted approach is the specific knowledge of the need of the crop, i.e. fertilizers. Ideally a tractor would steer the application of fertilizers specifically to individual areas via a sensor during field processing, so guaranteeing an efficient and timely application in an ecologically responsible manner.

Within the current research it was possible to determine the actual status of the photosynthetic apparatus, from the Sunlight-Induced Chlorophyll-Fluorescence (CF) using both the simple and passive measurement method, associated with other vegetation indices. As a result in fact a technique is available, which allows for the possibility of a quantitative determination of photosynthetic efficiency without the need to destroy or otherwise influence the subject being measured. In multifactorial field trials with potato, wheat and some model plants, the direct relationship between the stress factors of disease impact, nitrogen deficiency, water stress and fluorescence emission has been shown.

Initially through the use of dimout experiments induction kinetic relationship between CF, photosynthetically active radiation and photosynthetic rate could be proven. The Photochemical Reflectance Index (PRI), used as reference, behaved in a parallel manner to the photosynthetic rate, however in contrast to this the CF counteracted. Even the leaf temperature (vaguely representing the heat dissipation of photosystem II) showed corresponding changes.

Beside this, other factors like crop structure, the portion of the soil signal, characteristics of the variety etc. had an influence not only on the CF, but also on the whole reflexion signature. The diurnal course of the CF always showed a characteristic development in the plant varieties examined, and was highly correlated with the photosynthetically active radiation. The level of the diurnal course of the CF was lower in crops with a low chlorophyll content and with a simultaneously higher photosynthetic rate, than in crops with a high chlorophyll content and low photosynthetic rate. An explanation for this could be that an unfertilized, stressed plant under additional stress exposure had to dissipate more energy into stress

defence than a fertilized and unstressed plant. As a result the plant showed a higher photosynthetic rate per leaf area, but does not grow as powerfully overall. Obviously with a stronger stress impact a back-coupling took place causing the plant to drive a higher photosynthesis for the stress defence.

Furthermore it was possible to distinguish between optimally growing and stressed plants with the aid of the CF and even indirectly between the stressors, including other vegetation indices. For this purpose the quotient CF/PRI has been invented inter alia, which represents the amount of emitted CF per amount of highly energetic zeaxanthin originating from the xanthophyll cycle.

Nonetheless it was not really possible within the research series to establish the CF as a sole vegetation index to determine the photosynthetic status of a crop. Impediments hereby were the large amplitude of the diurnal course of the CF and the comparatively tiny differences between stressed variants and unstressed control, requiring the availability of an unstressed control for the at higher solar altitudes recommended measurements available. During midday heat stress CF, photosynthetic rate and even leaf temperature decoupled reliably, that meaning that the reduction of the photosynthetic rate in the course of the midday heat stress did not mirror in the development of the CF.

In the different experiments the respective redistribution situation (Kautsky-kinetics) of the factors CF, photosynthetic rate and heat dissipation (represented through the leaf temperature) as well as the PRI could be carved out with the aid of the different stressors. The plurality of the results allowed the conclusion on a certain universal validity, which were clearly limited even in connection with other vegetation indices. These ground truth data could flow into appropriate recommendations in a way that makes it possible for a precise and well directed application of crop cultivation methods, and so that economic and ecological advantages arise.

7 Literaturverzeichnis

- ARNON, D. I., ALLEN, M. B. und WHATLEY, F. R. (1954). Photosynthesis by Isolated Chloroplasts. *Nature* **174** (4426), 394-396.
- BARET, F. und GUYOT, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment* **35**, 161-173.
- BASSHAM, J. A., BENSON, A. A. und CALVIN, M. (1950). The Path of Carbon in Photosynthesis. *Journal of Biological Chemistry* **185**(2), 781-787.
- BASSHAM, J. A. (1977). Increasing crop production through more controlled photosynthesis. *Science* **197**, 630-638.
- BBCH-Monograph (2001). Growth stages of mono- and dicotyledonous plants. U. Meier (Hrsg.), Wien, Berlin. Federal Biological Centre of Agriculture and Forstry. *Blackwell Wissenschafts-Verlag*.
- BERRY, J. und BJÖRKMAN, O. (1980). Photosynthetic Response and Adaptation to Temperature in Higher Plants. *Plant Physiology* **31**, 491-543.
- BILGER, W. und BJÖRKMAN, O. (1990). Role of the xanthophyll cycle in photoprotection elucidated by measurements of light-induced absorbance changes, fluorescence and photosynthesis in leaves of *Hedera canariensis*. *Photosynthesis Research* **25**, 173-185.
- BJÖRKMAN, O. und DEMMIG, B. (1987). Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins. *Planta* **170**, 489-504.
- BLACKMAN, F. F. (1905). Optima and limiting factors. *Annals of Botany* **19**, 281-295.
- BLACKMAN, F. F. und MATTHAEI, G. L. C. (1905). Experimental Researches on Vegetable Assimilation and Respiration. IV. --A Quantitative Study of Carbon Dioxide Assimilation and Leaf Temperature in Natural Illumination. *Proceedings of the Royal Society in London* **76**, 402-460.
- BLACKMER, T. M., SCHEPERS, J. S. und VARVEL, G. E. (1994). Light Reflectance Compared with Other Nitrogen Stress Measurements in Corn Leaves. *Agronomy Journal* **86**, 934-938.

- BLACKMER, A. M. und WHITE, S. E. (1998). Using precision farming technologies to improve management of soil and fertiliser nitrogen. *Australian Journal of Agricultural Research* **49**(3), 555-564.
- BOOCHS, F., KUPFER, G., DOCKTER, K. und KÜHBAUCH, W. (1990). Shape of the red edge as vitality indicator for plants. *International Journal of Remote Sensing* **11**(10), 1741-1753.
- BOYER, J. S. (1982). Plant Productivity and Environment. *Science* **218**, 443-448.
- BREDEMEIER, C. und SCHMIDHALTER, U. (2001). Laser-induced chlorophyll fluorescence as a tool to determine the nitrogen status of wheat. In: G. Grenier & S. Blackmore (Hrsg.) *3rd European Conference on Precision Agriculture (ECPA)* **2**, 899-904, Montpellier.
- BREDEMEIER, C. und SCHMIDHALTER, U. (2003). Non-contacting chlorophyll fluorescence sensing for site-specific nitrogen fertilization in wheat and maize. In: J. Stafford und A. Werner (Hrsg.) *4th European Conference on Precision Agriculture (ECPA)* **4**, 103-108, Berlin.
- BROGE, N. H. und MORTENSEN, J. V. (2002). Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data. *Remote Sensing of Environment* **81**, 45-57.
- BRUGNOLI, E. und BJÖRKMAN, O. (1992). Chloroplast movements in leaves: Influence on chlorophyll fluorescence and measurements of light-induced absorbance changes related to ΔpH and zeaxanthin formation. *Photosynthesis Research* **32**, 23-35.
- BURKHART, S., MANDERSCHIED, R. und WEIGEL, H.J. (2000). Interaction of photosynthetic flux density and temperature on canopy photosynthesis of spring wheat under different CO₂ concentrations. *Journal of Plant Physiology*. **157**, 31-39.
- BUSCHMANN, C., NAGEL, E., SZABÓ, K. und KOCSÁNYI, L. (1994). Spectrometer for Fast Measurements of *In Vivo* Reflectance, Absorptance, and Fluorescence in the Visible and Near-Infrared. *Remote Sensing of Environment* **48**, 18-24.
- BUSCHMANN, C. und LICHTENTHALER, H. K. (1998). Principles and Characteristics of Multi-Colour Fluorescence Imaging of Plants. *Journal of Plant Physiology* **152**, 297-314.
- BUSCHMANN, C. und LICHTENTHALER, H. K. (1999). Contribution of Chlorophyll Fluorescence to the Reflectance of Leaves in Stressed Plants as Determined with the VIRAF-Spectrometer. *Zeitschrift für Naturforschung* **54c**, 849-855.

- BUSCHMANN, C., LANGSDORF, G. und LICHTENTHALER, H. K. (2000). Imaging of the blue, green and red fluorescence emission of plants: An overview. *Photosynthetica* **38**(4), 483-491.
- BUTTERFASS, T. (1967). Endopolyloidie und Chloroplastenzahlen in verschiedenen Zellen trisomer Zuckerrübern. *Planta* **76**, 75-84.
- CALVIN, M. und BENSON, A. A. (1948). The Path of Carbon in Photosynthesis. *Science*, New Series, **107**(2784), 476-480.
- CEROVIC, Z. G., GOULAS, Y., GORBUNOV, M., BRIANTAIS, J.-M., CAMENEN, L. und MOYA, I. (1996). Fluorosensing of Water Stress in Plants: Diurnal Changes of the Mean Lifetime and Yield of Chlorophyll Fluorescence, Measured Simultaneously and at Distance With a τ -LIDAR and a Modified PAM-Fluorimeter, in Maize, Sugar Beet, and Kalanchoë. *Remote Sensing of Environment* **58**, 311-321.
- CHAVES, M. M. (1991). Effects of Water Deficits on Carbon Assimilation. *Journal of Experimental Botany* **42**(1), 1-16.
- CHENG, L., FUCHIGAMI, L. H. und BREEN, P. J. (2001). The relationship between photosystem II efficiency and quantum yield for CO₂ assimilation is not affected by nitrogen content in apple leaves. *Journal of Experimental Botany* **52**(362), 1865-1872.
- COLLINS, W. (1978). Remote Sensing of Crop Type and Maturity. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **44**(1), 43-55.
- DASH, J. und CURRAN, P. J. (2004). MTCI: The MERIS terrestrial chlorophyll index. *International Journal Remote of Sensing* **25**(23), 5403-5413.
- DEMMIG-ADAMS, B. und ADAMS, W. W. III (1996). The role of xanthophyll cycle carotenoids in the protection of photosynthesis. *Trends in Plant Science* **1**(1), 21-26.
- EGLE, K und SCHENK, W. (1953). Der Einfluss der Temperatur auf die Lage des CO₂-Kompensationspunktes. *Planta* **43**(2), 83-97.
- EMERSON, R. (1929). Chlorophyll content and rate of photosynthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **15**(3), 281-284.
- EMERSON, R. und ARNOLD, W. (1932). The photochemical reaction in photosynthesis. *Journal of General Physiology* **16**(2), 191-205.

- EMERSON, R., CHALMERS, R. V. und CEDERSTRAND, C. (1957). Some factors influencing the long-wave limit of photosynthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **43**(1), 133-143.
- ENGELMANN, T. W. (1883). *Bacterium photometricum*. Ein Beitrag zur vergleichenden Physiologie des Licht- und Farbensinnes. *Pflügers Archiv European Journal of Physiology* **30**(1), 95-124.
- EWART, A. J. (1896). On Assimilatory Inhibition in Plants. *Botanical Journal of the Linnean Society of London* **31**(1), 95-124.
- FAROOQ, M., WAHID, A., KOBAYASHI, D., FUJITA, D. und BASRA, S. M. A. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development* **29**, 185-212.
- FILELLA, I. und PEÑUELAS, J. (1994). The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. *International Journal of Remote Sensing* **15**(7), 1459-1470.
- FILELLA, I., AMARO, T., ARAUS, J. L. und PEÑUELAS, J. (1996). Relationship between photosynthetic radiation-use efficiency of barley canopies and the photochemical reflectance index (PRI). *Physiologia Plantarum* **96**, 211-216.
- FILELLA, I., LLUSIÀ, J., PIÑOL, J. und PEÑUELAS, J. (1998). Leaf gas exchange and fluorescence of *Phillyrea latifolia*, *Pistacia lentiscus* and *Quercus ilex* saplings in severe drought and high temperature conditions. *Environmental and Experimental Botany* **39**, 213-220.
- FILELLA, I., PEÑUELAS, J., LLORENS, L. und ESTIARTE, M. (2004). Reflectance assessment of seasonal and annual changes in biomass and CO₂ uptake of a Mediterranean shrubland submitted to experimental warming and drought. *Remote Sensing of Environment* **90**, 308-318.
- FLEXAS, J., ESCALONA, J. M. und MEDRANO, H. R. (1999). Water stress induces different levels of photosynthesis and electron transport rate regulation in grapevines. *Plant, Cell and Environment* **22**, 39-48.
- FLEXAS, J., BRIANTAIS, J.-M., CEROVIC, Z. G., MEDRANO, H. und MOYA, I. (2000). Steady-State and Maximum Chlorophyll Fluorescence Responses to Water Stress in Grapevine Leaves: A New Remote Sensing System. *Remote Sensing of Environment* **73**, 283-297.

- FLEXAS, J., ESCALONA, J. M., EVAÏN, S., GULÍAS, J., MOYA, I., OSMOND, C. B. und MEDRANO, H. (2002). Steady-state chlorophyll fluorescence (Fs) measurements as a tool to follow variations of net CO₂ assimilation and stomatal conductance during water-stress in C₃ plants. *Physiologia Plantarum* **114**, 231-240.
- FRYER, M. J., ANDREWS, J. R., OXBOROUGH, K., BLOWERS, D. A. und BAKER, N. R. (1998). Relationship between CO₂ Assimilation, Photosynthetic Electron Transport, and Active O₂ Metabolism in Leaves of Maize in the Field during Periods of Low Temperature. *Plant Physiology* **116**, 571-580.
- GAASTRA, P. (1963). Climatic Control of Photosynthesis and Respiration. In: "Environmental control of plant growth" (L. T. Evans, Herausgeber), Academic press, New York, 113-140.
- GAMON, J. A., PEÑUELAS, J. und FIELD, C. B. (1992). A Narrow-Waveband Spectral Index That Tracks Diurnal Changes in Photosynthetic Efficiency. *Remote Sensing of Environment* **41**, 35-44.
- GAMON, J. A., ROBERTS, D. A. und GREEN, R. O. (1994). Evaluation of the photochemical reflectance index in AVIRIS imagery. *Summeries of the 5th JPL Airborne Earth Science Workshop in AVIRIS Workshop* **95**(1), 55-58.
- GAMON, J. A., SERRANO, L. und SURFUS, J. S. (1997). The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia* **112**, 492-501.
- GAMON, J. A. und SURFUS, J. S. (1999). Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. *New Phytologist* **143**, 105-117.
- GAO, B. und GOETZT, A. F. H. (1995). Retrieval of equivalent water thickness and information related to biochemical components of vegetation canopies from AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment* **52**, 155-162.
- GENTY, B., BRIANTAIS, J.-M. und BAKER, N. R. (1989). The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochimica et Biophysica Acta* **990**, 87-92.
- GITELSON, A. A. und MERZLYAK, M. N. (1995). Signature Analysis of Leaf Reflectance Spectra: Algorithm Development for Remote Sensing of Chlorophyll. *Journal of Plant Physiology* **148**, 494-500.

- GITELSON, A. A., KAUFMANN, Y. J. und MERZLYAK, M. N. (1996). Use of a Green Channel in Remote Sensing of Global Vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment* **58**, 289-298.
- GITELSON, A. A. und MERZLYAK, M. N. (1997). Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *International Journal of Remote Sensing* **18**(12), 2691-2697.
- GITELSON, A. A. und MERZLYAK, M. N. (1998). Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves. *Advances in Space Research* **22**(5), 689-692.
- GITELSON, A. A., CHIVKUNOVA, O. B. und MERZLYAK, M. N. (2009). Nondestructive estimation of anthocyanins and chlorophylls in anthocyanic leaves. *American Journal of Botany* **96**(10), 1861-1868.
- GOVINDJEE. (1995). Sixty-three Years Since Kautsky: Chlorophyll *a* Fluorescence. *Australian Journal Plant Physiology* **22**, 131-160.
- GÜNTHER, K. P., DAHN, H. G. und LÜDEKER, W. (1994). Remote Sensing Vegetation Status by Laser-Induced Fluorescence. *Remote Sensing of Environment* **47**, 10-17.
- GÜNTHER, K. P., DAHN, H. G. und LÜDEKER, W. (1999). Laser-induced-fluorescence, a new method for "precision farming". *Sensorsysteme im Precision Farming, Rostock*.
- GUYOT, G. und BARET, F. (1988). Utilisation de la haute résolution spectrale pour suivre l'état des couverts végétaux. *Proceedings of the 4th International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, Aussois, France* **287**, 279-286.
- HAKEN, H. und WOLF, H. C. (1988). "Atom- und Quantenphysik." Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- HANSEN, P. M. und SCHJOERRING, J. K. (2003). Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. *Remote Sensing of Environment* **86**, 542-553.
- HARDER, R. (1921). Kritische Versuche zu Blackmans Theorie der "begrenzenden Faktoren" bei der Kohlensäureassimilation. *Jahrbücher für wissenschaftliche Botanik* **60**, 531-571.
- HASHIMOTO, M., NEGI, J., YOUNG, J., ISRAELSSON, M, SCHROEDER, J. I. und IBA, K. (2006). *Arabidopsis* HT1 kinase controls stomatal movements in response to CO₂. *Nature Cell Biology* **8**, 391-397.

- HAUPT, W. und SCHEUERLEIN, R. (1990). Chloroplast movement. *Plant, Cell and Environment* **13**, 595-614.
- HEATH, O. V. S. und ORCHARD B. (1957). Midday Closure of Stomata: Temperature Effects on the Minimum Intercellular Space Carbon Dioxide Concentration "Γ". *Nature* **180**, 180-181.
- HECKATHORN, S. A. und DELUCIA, E. H. (1995). Ammonia volatilization during drought in perennial C₄ grasses of tallgrass prairie. *Oecologia* **101**, 361-365.
- HECKATHORN, S. A., DELUCIA, E. H. und ZIELINSKI, R. E. (1997). The contribution of drought-related decreases in foliar nitrogen concentration to decreases in photosynthetic capacity during and after drought in prairie grasses. *Physiologia Plantarum* **101**, 173-182.
- HELDT, H. W. (1996). 2 Die Photosynthese ist die Grundlage für das Leben auf der Erde. In "Pflanzenbiochemie", 583 S., Spektrum Akademischer Verlag, Hirschberg Verlag, Heidelberg - Berlin - Oxford.
- HESS, M. (2005). Bedeutung des Blattfleckenkomplexes der Gerste und Konsequenzen für den gezielten Einsatz von Fungiziden. *GetreideMagazin* **10**(1), 1-5.
- HILL, R. (1937). Oxygen Evolved by Isolated Chloroplasts. *Nature* **139**(1), 881-882.
- HORLER, D. N. H., DOCKRAY, M. und BARBER, J. (1983). The red edge of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing* **4**(2), 273-288.
- HOUGH, R. A. und WETZEL, R. G. (1978). Photorespiration and CO₂ compensation point in *Naja flexilis*. *Limnology and Oceanography* **23**(4), 719-724.
- HUETE, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* **25**(3), 295-309.
- IDSO, S. B., IDSO, K. E., GARCIA, R. L., KIMBALL, B. A. und HOOBER, J. K. (1995). Effects of atmospheric CO₂ enrichment and foliar methanol application on net photosynthesis of sour orange tree (*Citrus aurantium*; Rutaceae) leaves. *American Journal of Botany* **82**, 26-30.
- INOUE, T., INANAGA, S., SUGIMOTO, Y., AN, P. und ENEJI, A. E. (2004). Effect of drought on ear and flag leaf photosynthesis of two wheat cultivars differing in drought resistance. *Photosynthetica* **42**(4), 559-565.
- JALEEL, C. A., MANIVANNAN, P., WAHID, A., FAROOQ, M., AL-JUBURI, H. J., SOMASUNDARAM, R. und PANNEERSELVAM, R. (2009). Drought Stress in Plants: A

- Review on Morphological Characteristics and Pigments Composition. *International Journal of Agriculture & Biology* **11**, 100-105.
- JEFFERIES, R. A. (1994). Drought and chlorophyll fluorescence in field-grown potato (*Solanum tuberosum*). *Physiologia Plantarum* **90**, 93-97.
- JOHNSON, R. C., MORNHINWEG, D. W., FERRIS, D. M. und HEITHOLD, J. J. (1987). Leaf Photosynthesis and Conductance of Selected *Triticum* Species at Different Water Potentials. *Plant Physiology* **83**(4), 1014-1017.
- KAUTSKY, H. und HIRSCH, A. (1931). Neue Versuche zur Kohlenstoffassimilation. *Naturwissenschaften* **19**, 964.
- KEBABIAN, P. L., THEISEN, A. F. und KALLELIS, S. (1999). A passive two-band sensor of sunlight-excited plant fluorescence. *Review of Scientific Instruments* **70**(11), 4386-4392.
- KRAUS, K. und SCHNEIDER, W. (1988). „Band 1 – Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken“ Fernerkundung. 2 Bände. Dümmler Verlag, Bonn.
- KRAUSE, G. H. (1988). Photoinhibition of photosynthesis. An evaluation of damaging and protective mechanisms. *Physiologia Plantarum* **74**(3), 566-574.
- KRAUSE, G. H. und WEIS, E. (1991). Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basics. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* **42**, 313-349.
- LARCHER, W. (1980). "Ökophysiologie der Pflanzen." UTB für Wissenschaft, 3. Aufl., Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- LICHTENTHALER, H. K. (1992). The Kautsky effect: 60 years of chlorophyll fluorescence induction kinetics. *Photosynthetica* **27**(1-2), 45-55.
- LICHTENTHALER, H. K. und RINDERLE, U. (1988). The Role of Chlorophyll Fluorescence in the Detection of Stress Conditions in Plants. *CRC Critical Reviews in Analytical Chemistry* **19**(1), 29-89.
- LICHTENTHALER, H. K., WENZEL, O., BUSCHMANN, C. und GITELSON, A. A. (1998). Plant Stress Detection by Reflectance and Fluorescence. *Annals of New York Academy of Sciences* **851**, 455-469.
- LIEBIG, J. v. (1855): Die Grundsätze der Agricultur-Chemie, mit Rücksicht auf die in England angestellten Untersuchungen. Verlag Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig.

- LIEBLER J. (2003): Feldspektroskopische Messungen zur Ermittlung des Stickstoffstatus von Winterweizen und Mais auf heterogenen Schlägen. Dissertation, Lehrstuhl für Pflanzenbau, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, TUM.
- LIETH, H. H. (1960). Über den Lichtkompensationspunkt der Landpflanzen. *Planta* **54**(5), 530-554.
- LOUIS, L., OUNIS, A., DUCRUET, J.-M., EVAIN, S., LAURILA, T., THUM, T., AURELA, M. WINGSLE, G., ALONSO, L., PEDROS, R. und MOYA, I. (2005). Remote sensing of sunlight-induced chlorophyll fluorescence and reflectance of Scots pine in the boreal forest during spring recovery. *Remote Sensing of Environment* **96**, 37-48.
- LU, C., LU, Q., ZHANG, J. und KUANG, T. (2001). Characterization of photosynthetic pigment composition, photosystem II photochemistry and thermal energy dissipation during leaf senescence of wheat plants grown in the field. *Journal of Experimental Botany* **52**(362), 1805-1810.
- LÜDEKER, W., GÜNTHER, K. P. und DAHN, H. G. (1995). Laser induced leaf fluorescence. *Proceedings of SPIE* **3059**, 63-75.
- LÜTTGE, U., KLUGE, M. und BAUER, G. (1994). "Botanik". VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim.
- MAIER, S. W., GÜNTHER, K. P., LÜDEKER, W. und DAHN, H. G. (1999). A New Method for Remote Sensing of Vegetation Status. *Proceedings ALPS, Meribel, France*.
- MAIER, S. W., GÜNTHER, K. P. und STELLMES, M. (2003). Sun-induced fluorescence, - a new tool for precision farming. In "Digital Imaging und Spectral Techniques: Applications to Precision Agriculture und Crop Physiology" (M. McDonald, J. Schepers, L. Tartly, T. VanToai und D. Major, Herausgeber), Vol. ASA Special Publication Nr. 66, S. 209-222. German remote sensing data center (DFD), German aerospace center (DLR).
- MAYER, J. R. (1845). Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhange mit dem Stoffwechsel: Ein Beitrag zur Naturkunde. Verlag der C. Drechsler'schen Buchhandlung, Heilbronn.
- MAXWELL, K. und JOHNSON, G. N. (2000). Chlorophyll-fluorescence - a practical guide. *Journal of Experimental Botany* **51**(345), 659-668.
- MÉTHY, M. (2000a). A Two-channel Hyperspectral Radiometer for the Assessment of Photosynthetic Radiation-use Efficiency. *Journal of Agricultural Engineering Research* **75**, 107-110.

- MÉTHY, M. (2000b). Analysis of photosynthetic activity at the leaf and canopy levels from reflectance measurements: a case study. *Photosynthetica* **38**(4), 505-512.
- MITSCHERLICH, E. A. (1909). Das Gesetz des Minimums und das Gesetz des abnehmenden Bodenertrages. *Landwirtschaftliche Jahrbücher* **38**, 537-552.
- MOHOTTI, A. J. und LAWLOR, D. W. (2002). Diurnal variation of photosynthesis and photoinhibition in tea: effects of irradiance and nitrogen supply during growth in the field. *Journal of Experimental Botany* **53**(367), 313-322.
- MOYA, I., CAMENEN, L., EVAÏN, S., GOULAS, Y., CEROVIC, Z. G., LATOUCHE, G., FLEXAS, J. und OUNIS, A. (2004). A new instrument for passive remote sensing 1. Measurements of sunlight-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing of Environment* **91**, 186-197.
- MUNNÉ-BOSCH, S. und ALEGRE, L. (2000). The xanthophyll cycle is induced by light irrespective of water status in field-grown lavender (*Lavandula stoechas*) plants. *Physiologia Plantarum* **108**, 147-151.
- NIU, S. L., LI, L. H., JIANG, G. M., GAO, L. M., LI, Y. G., PENG, Y. und LIU, M. Z. (2004). Gas exchange and chlorophyll fluorescence response to simulated rainfall in *Hedysarum fruticosum* var. *mongolicum*. *Photosynthetica* **42**(1), 1-6.
- NIYOGI, K. K. (1999). PHOTOPROTECTION REVISITED: Genetic and Molecular Approaches. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* **50**, 333-359.
- OGAYA, R. und PEÑUELAS, J. (2003). Comparative seasonal gas exchange and chlorophyll fluorescence of two dominant woody species in a Holm Oak Forest. *Flora* **198**, 132-141.
- PEARSON, R. L. und MILLER, J. R. (1972). Remote Mapping of Standing Crop Biomass for Estimation of Productivity of the Shortgrass Prairie. *Proceedings of the 8th International Symposium on Remote Sensing of the Environment*, 1355-1379.
- PELTONEN, J., VIRTANEN, A. und HAGGREN, E. (1995). Using Chlorophyll Meter to Optimize Nitrogen Fertilizer Application for Intensively-Managed Small-Grain Cereals. *Journal of Agronomy and Crop Science* **174**, 309-318.
- PEÑUELAS, J., GAMON, J. A., FREDEEN, A. L., MERINO, J. und FIELD, C. B. (1994). Reflectance Indices Associated with Physiological Changes in Nitrogen- and Water-Limited Sunflower Leaves. *Remote Sensing of Environment* **48**, 135-146.

- PEÑUELAS, J., FILELLA, I. und GAMON, J. A. (1995a). Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance. *New Phytologist* **131**, 291-296.
- PEÑUELAS, J., FILELLA, I., LLORET, P., MUNOZ, F. und VILAHÉLIU, M. (1995b). Reflectance assessment of mite effects on apple trees. *International Journal of Remote Sensing* **16**(14), 2727-2733.
- PEÑUELAS, J., LLUSIA, J., PIÑOL, J. und FILELLA, I. (1997). Photochemical reflectance index and leaf photosynthetic radiation-use-efficiency assessment in Mediterranean trees. *International Journal of Remote Sensing* **18**(13), 2863-2868.
- PEÑUELAS, J. und FILELLA, I. (1998). Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends in Plant Science* **3**(4), 151-156.
- PEÑUELAS, J., FILELLA, I., LLUSIA, J., SISCART, D. und PIÑOL, J. (1998). Comparative field study of spring and summer leaf gas exchange and photobiology of the mediterranean trees *Quercus ilex* and *Phillyrea latifolia*. *Journal of Experimental Botany* **49**(319), 229-238.
- PEÑUELAS, J. und INOUE, Y. (2000). Reflectance assessment of canopy CO₂ uptake. *International Journal of Remote Sensing* **21**(17), 3353-3356.
- PINTER Jr., P. J., JACKSON, R. D., EZRA, C. E. und GAUSMANN, H. W. (1985). Sun-angle and canopy-architecture effects on the spectral reflectance of six wheat cultivars. *International Journal of Remote Sensing* **6**(12), 1813-1825.
- PLAETZER, H. (1917). Untersuchungen über die Assimilation und Atmung von Wasserpflanzen. *Verhandlungen der physikalisch-medizinischen Gesellschaft Würzburg* **45**(2).
- POWLES, S. B. (1984): Photoinhibition of photosynthesis induced by visible light. *Annual Review of Plant Physiology* **35**, 15-44.
- PUTZ, B. (1989). "Kartoffeln – Züchtung Anbau Verwertung." Behr's Verlag, Hamburg.
- QI, J., CHEHBOUNI, A., HUETE, A. R., KERR, Y. H. und SOROOSHIAN, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment* **48**, 119-126
- RABINOWITCH, E. I. (1956): Photosynthesis and related processes. Wiley-Interscience New (York) **2**(2), 1211-2088
- REINKE, J. (1883). Untersuchungen über die Einwirkung des Lichtes auf die Sauerstoffausscheidung der Pflanzen. Erste Mitteilung, *Botanische Zeitung* **42** (41. Jahrgang), 697-712.

- ROUSE, J. W., HAAS, R. H., SCHELL, J. A., DEERING, D. W. und HARLAN, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. *Final Report Type III, Greenbelt, NASA/GSCF, MD, USA* 1(13).
- RUBEN, S., RANDALL, M., KAMEN, M. D. und HYDE, J. L. (1941). Heavy Oxygen (O^{18}) as a Tracer in the Study of Photosynthesis. *Journal of the American Chemical Society* **63**(3), 877-879.
- SACHS, J. von (1865). Handbuch der Experimentalphysiologie der Pflanzen, IV. Band des *Handbuchs der physiologischen Botanik*, W. Hofmeister, A. de Bary, T. Irmisch, N. Pringsheim. und J. Sachs, Herausgeber (Leipzig).
- SCARTH, G. W. (1932). Mechanism of the action of light and other factors on stomatal movement. *Plant Physiology*, **7**, 481-504
- SCHEPERS, J. S., FRANCIS, D. D., VIGIL, M. und BELOW, F. E. (1992). Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **23**(17-20), 2173-2187.
- SCHOPFER, P. (1986). "Experimentelle Pflanzenphysiologie - Einführung in die Anwendungen." Band 2, Springer Verlag, Heidelberg.
- SHARKEY, T. D. und SEEMANN, J. R. (1989). Mild water stress effects on carbon-reduction-cycle intermediates, ribulose biphosphate carboxylase activity, and spatial homogeneity of photosynthesis in intact leaves. *Plant Physiology* **89**(4), 1060-1065.
- SMIRNOFF, N. (1993). The role of active oxygen in the response of plants of water deficit and desiccation. *New Phytologist* **125**(1), 27-58.
- SPRENGEL, C. (1828). Von den Substanzen der Ackerkrume und des Untergrundes. *Journal für technische und ökonomische Chemie* **3**, 42-99.
- STICKSEL, E., SCHÄCHTL, J., HUBER, G., LIEBLER, J. und MAIDL, F.-X. (2004). Diurnal Variation in Hyperspectral Vegetation Indices Related to Winter Wheat Biomass Formation. *Precision Agriculture* **5**, 509-520.
- STRASBURGER, E., NOLL, F., SCHENCK, H. und SCHIMPER, A. F. W. (1992). "Lehrbuch der Botanik." Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena, New York.
- TENHUNEN, J. D., LANGE, O. L., GEBEL, J., BEYSCHLAG, W. und WEBER, J. A. (1984). Changes in photosynthetic capacity, carboxylation efficiency, and CO_2 compensation

- point associated with midday stomatal closure and midday depression of net CO₂ exchange of leaves of *Quercus suber*. *Planta* **162**(3), 193-203.
- TENHUNEN, J. D., LANGE, O. L., HARLEY, P. C., BEYSCHLAG, W. und MEYER, A. (1985). Limitations due to water stress on leaf net photosynthesis of *Quercus coccifera* in the Portuguese evergreen scrub. *Oecologia* **67**, 23-30.
- TENHUNEN, J. D., SALA SERRA, A., HARLEY, P. C., DOUGHERTY, R. L. und REYNOLDS, J. F. (1990). Factors influencing carbon fixation and water use by mediterranean sclerophyll scrubs during summer drought. *Oecologia* **82**, 381-393.
- TEZARA, W., MITCHELL, V. J., DRISCOLL, S. D. und LAWLOR, D. W. (1999). Water stress inhibits plant photosynthesis by decreasing coupling factor and ATP. *Nature* **401**, 914-917.
- THOMAS, J. R. und GAUSMANN, H. W. (1977). Leaf Reflectance vs. Leaf Chlorophyll and Carotenoid Concentrations for Eight Crops. *Agronomy Journal* **69**(5), 799-802.
- WARBURG, O. (1920). Über die Geschwindigkeit der photochemischen Kohlensäurezerersetzung in lebenden Zellen. II. *Biochemische Zeitung* **103**, 188-217.
- WIEGAND, C. L. und NAMKEN, L. N. (1966). Influences of Plant Moisture Stress, Solar Radiation, and Air Temperature on Cotton Leaf Temperature. *Agronomy Journal* **58**(6), 582-586.
- WILLSTÄTTER, R. und STOLL, A. (1913). Untersuchungen über Chlorophyll. Methoden und Ergebnisse. Aus dem Kaiser Wilhelm Institut für Chemie, Berlin.
- WILSON, C. C. (1947). The effect of some environmental factors on the movements of guard cells. *Plant Physiology* **23**, 5-37.
- WOLLRING, J., REUSCH, S. und KARLSSON, C. (1988). Variable nitrogen application based on crop sensing. *Proceedings of the International Fertilizer Society* **423**, 3-27.
- WOODS, D. B. und TURNER, N. C. (1971). Stomatal response to changing light by four tree species of varying shade tolerance. *New Phytologist* **70**(1), 77-84.
- YODER, B. J., und WARING, R. H. (1994). The normalized difference vegetation index of small Douglas-fir canopies with varying chlorophyll concentrations. *Remote Sensing of Environment* **49**, 81-91.

ZARCO-TEJADA, P. J., RUEDA, C. A. und USTIN, S. L. (2003). Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. *Remote Sensing of Environment* **85**, 109-124.

ZELITCH, I. (1982). The Close Relationship between Net Photosynthesis and Crop Yield. *Bioscience* **32**(10), 796-802.

Weiterführende bzw. nicht rezensierte Literatur und Mitteilungen (z.T. zitiert)

GERHARD, M. (2001). Der Einfluß strobilurinhaltiger Fungizide auf physiologische Abläufe der Ertragsbildung an Winterweizensorten. Dissertation, Lehrstuhl für Phytopathologie, Technische Universität München.

GERHARD, M. (2002). Mündliche Mitteilung über die kurzfristig gesteigerte Photosyntheserate in kranken Nutzpflanzenbeständen zum Zweck der vermehrten Bereitstellung von Energie für die Streßabwehr. *DLG-Feldtage*, Gut Hellkofen bei Regensburg.

IDELBERGER, C. (1999). Untersuchungen an variegaten Formen von *Ficus pumila* L. und *Soleirolia soleirolii* (Req.) Dandy. Diplomarbeit, Fachgebiet Pflanzenzüchtung, Institut für Gartenbauwissenschaften, Humboldt-Universität zu Berlin.

IDELBERGER, C. und STICKSEL, E. (2003a). Measurement of sunlight-induced chlorophyll-fluorescence in the daily course under ambient conditions. *Proceedings of the 4th European Conference on Precision Agriculture (ECPA)*, Wageningen Academic Publishers, **4**, 445-456, Berlin.

IDELBERGER, C. und STICKSEL, E. (2003b). Sonnenlicht-induzierte Chlorophyll-Fluoreszenz im Tagesgang im gesunden und kranken Kartoffelbestand. *Mitteilungen der 46. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e.V.* **15**, 274-275

IDELBERGER, C. und STICKSEL, E. (2004a). Fluoreszenzmessungen an Sommergerste im Fungizidvergleich im Tagesgang. *Workshop Precision Farming - IKB (Informationssystem Kleinräumige Bestandesführung)*, Dürnast (Germany). 41-42

IDELBERGER, C. und STICKSEL, E. (2004b). Spectral measurements of sunlight-induced chlorophyll-fluorescence with potatoes regarding N-fertilization. *Proceedings of the 7th International Conference on Precision Agriculture (ICPA)*, Minneapolis.

- IDELBERGER, C. und STICKSEL, E. (2004c). Zusammenhang zwischen sonnenlicht-induzierter Chlorophyll-Fluoreszenz und der Effizienz der CO₂-Fixierung in Nutzpflanzenbeständen. *Mitteilungen der 47. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e.V.* **16**, 259-260, Braunschweig.
- LIEBLER, J. (2003): Feldspekrometrische Messungen zur Ermittlung des Stickstoffstatus von Winterweizen und Mais auf heterogenen Schlägen. Dissertation, Technische Universität München.
- MAIER, S. W. (2000). Modellierung des Strahlungstransports in Blättern im Spektralbereich von 300nm bis 2.5µm unter Berücksichtigung der Chlorophyllfluoreszenz. Dissertation, Fakultät für Brauwesen, Lebensmitteltechnologie und Milchwissenschaft, Technische Universität München.
- MAIER, S. W. und GÜNTHER, K. P. (2001). Sun-induced fluorescence, - a new tool for precision farming -. *International Workshop on Spectroscopy Application in Precision Farming, IKB-Dürnast, Freising-Weißenstephan*, 90-93.
- SCHÄCHTL, J., MAIDL, F.-X., HUBER, G. und STICKSEL, E. (2003). The potential of LASER-induced chlorophyll fluorescence measurements in wheat. *Precision Agriculture, Proceedings of the 4th European Conference on Precision Agriculture (ECPA)*, Wageningen Academic Publishers, **4**, 609-614, Berlin.
- STELLMES, M. (2002). Ableitung sonneninduzierter Chlorophyll-Fluoreszenz zur Detektion von Pflanzenstress. Diplomarbeit, Angewandte Umweltwissenschaften, Universität Trier.

Patente für die sonnenlicht-induzierte Chlorophyll-Fluoreszenz

- MAIER, S. W. (2001). Method of deriving sunlight induced fluorescence from radiance measurements and devices for executing the method. United States Patent US 6,329,660 (Anmeldung: 20.04.1999, Erteilung: 11.12.2001)
- MAIER, S. W. (2002). Verfahren zum Ableiten sonnenangeregten Fluoreszenzlichtes aus Strahldichtemessungen. Method for measuring sunlight induced fluorescence. Procédé pour déterminer la fluorescence induite par le soleil. European Patent EP 0 952 441 (Anmeldung: 19.04.1999, Erteilung: 03.07.2002).
- MAIER, S. W. (2006). Verfahren zum Ableiten sonnenangeregten Fluoreszenzlichtes aus Strahldichtemessungen und Einrichtung zum Durchführen des Verfahrens. German Patent DE 198 17 843 (Anmeldung: 22.04.1998, Erteilung: 08.06.2006).

8. Anhang

Tabelle 28. Relevante Tagesdaten der Wetterstation Nr. 8 in Freising (2003)

	Durchschnittliche Lufttemperatur in 20 cm Höhe (°C)	Durchschnittliche Bodentemperatur in 5 cm Tiefe (°C)	Durchschnittliche relative Luftfeuchte (%)	Niederschlag (mm)	Summe der Globalstrahlung ($\text{W m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
01. Jul 03	15,4	20,6	93,6	11,7	759
02. Jul 03	16,7	19,0	71,7	0,5	6436
03. Jul 03	14,1	18,1	91,3	7,8	3306
04. Jul 03	14,6	17,8	80,3	5,6	5497
05. Jul 03	15,0	17,7	87,6	1,4	3819
06. Jul 03	15,8	18,7	75,8	0,0	6699
07. Jul 03	17,1	20,6	68,7	0,0	7486
08. Jul 03	18,2	22,5	66,6	0,0	7210
09. Jul 03	18,4	22,2	66,7	0,0	5843
10. Jul 03	18,4	22,6	67,0	0,0	6584
11. Jul 03	18,7	22,7	61,6	0,0	6982
12. Jul 03	18,9	22,4	68,3	0,0	5147
13. Jul 03	18,0	23,0	57,2	0,0	8122
14. Jul 03	19,2	23,5	51,7	0,0	8705
15. Jul 03	20,4	24,3	55,9	0,0	8507
16. Jul 03	22,3	24,7	62,9	2,0	7337
17. Jul 03	17,7	21,7	92,0	6,6	3052
18. Jul 03	18,0	20,8	71,8	0,0	6331
19. Jul 03	19,7	22,7	58,7	0,0	8321
20. Jul 03	22,1	24,6	55,3	0,0	8162
21. Jul 03	21,7	24,0	70,3	1,1	4772
22. Jul 03	22,7	24,4	62,6	0,0	7482
23. Jul 03	20,7	23,4	72,7	9,3	6329
24. Jul 03	18,7	21,8	79,2	17,3	4468
25. Jul 03	19,2	21,8	74,0	0,0	7097
26. Jul 03	21,1	22,4	70,4	0,0	5093
27. Jul 03	22,1	23,6	75,1	13,3	4970
28. Jul 03	18,7	21,8	77,3	2,8	5254
29. Jul 03	17,8	20,8	67,4	0,0	6344
30. Jul 03	17,8	22,1	67,2	0,0	7271
31. Jul 03	17,6	21,4	81,3	2,0	4568

Fortsetzung von Tabelle 28.

	Durchschnittliche Lufttemperatur in 20 cm Höhe (°C)	Durchschnittliche Bodentemperatur in 5 cm Tiefe (°C)	Durchschnittliche relative Luftfeuchte (%)	Niederschlag (mm)	Summe der Globalstrahlung ($W m^{-2}s^{-1}$)
01. Aug 03	19,5	22,0	80,0	0,0	5285
02. Aug 03	21,8	24,6	68,9	0,0	7120
03. Aug 03	23,5	25,9	65,3	0,0	7334
04. Aug 03	24,5	26,6	64,0	0,0	7095
05. Aug 03	24,4	26,6	64,5	0,0	5892
06. Aug 03	23,4	26,3	67,8	0,0	6072
07. Aug 03	22,3	25,9	56,5	0,0	7178
08. Aug 03	24,1	25,8	54,4	0,0	6479
09. Aug 03	23,4	25,8	61,4	0,0	6233
10. Aug 03	24,3	25,8	55,8	0,0	6152
11. Aug 03	22,8	25,5	59,3	0,0	6609
12. Aug 03	23,4	25,5	60,8	0,0	6080
13. Aug 03	26,5	26,0	49,3	0,1	6382
14. Aug 03	22,8	24,5	64,1	0,0	4285
15. Aug 03	19,1	22,6	84,8	9,5	4238
16. Aug 03	19,3	22,6	76,7	0,0	5846
17. Aug 03	21,0	23,0	72,6	0,0	4640
18. Aug 03	20,8	22,7	78,5	1,0	4266
19. Aug 03	19,4	22,1	72,6	0,0	4970
20. Aug 03	21,4	23,2	64,7	0,1	5709
21. Aug 03	21,2	24,1	69,4	2,2	5940
22. Aug 03	20,7	23,7	62,7	0,0	6207
23. Aug 03	19,5	23,0	56,8	0,0	6603
24. Aug 03	19,2	23,0	65,4	0,0	6166
25. Aug 03	18,0	22,6	58,8	0,0	6469
26. Aug 03	18,5	21,7	53,3	0,0	5934
27. Aug 03	18,6	21,5	56,4	0,0	5560
28. Aug 03	20,6	22,5	60,5	0,0	5538
29. Aug 03	17,7	20,5	88,3	11,4	1901
30. Aug 03	15,2	17,7	88,3	0,6	2815
31. Aug 03	12,1	16,2	93,2	7,4	2736

Tabelle 29. Relevante Tagesdaten der Wetterstation Nr. 76 in Straß (2003)

	Durchschnittliche Lufttemperatur in 20 cm Höhe (°C)	Durchschnittliche Bodentemperatur in 5 cm Tiefe (°C)	Durchschnittliche relative Luftfeuchte (%)	Niederschlag (mm)	Summe der Globalstrahlung ($W\ m^{-2}s^{-1}$)
01. Mai 03	14,1	14,1	67,3	0,0	6067
02. Mai 03	14,1	13,8	70,1	0,0	4840
03. Mai 03	11,7	12,7	68,9	3,1	4754
04. Mai 03	13,2	12,8	59,3	0,0	7012
05. Mai 03	18,1	14,3	60,7	0,0	6664
06. Mai 03	19,3	15,8	55,7	0,0	6346
07. Mai 03	17,8	16,2	75,4	0,0	6490
08. Mai 03	19,4	16,8	72,3	8,1	6071
09. Mai 03	15,1	16,3	89,2	7,0	3740
10. Mai 03	15,2	15,9	84,9	7,1	4824
11. Mai 03	15,4	16,0	89,3	0,9	3766
12. Mai 03	14,7	15,7	83,8	0,3	3942
13. Mai 03	10,3	14,0	93,2	5,3	1332
14. Mai 03	9,1	13,3	79,3	1,8	5562
15. Mai 03	8,7	12,8	82,0	0,2	5578
16. Mai 03	9,4	12,4	70,7	0,0	7318
17. Mai 03	13,1	13,4	78,1	10,4	4983
18. Mai 03	14,4	14,6	83,1	0,2	4322
19. Mai 03	18,9	16,4	71,5	6,3	6565
20. Mai 03	11,1	14,8	87,9	13,3	2456
21. Mai 03	10,9	14,1	85,7	2,0	4146
22. Mai 03	14,2	15,1	80,1	0,1	5916
23. Mai 03	16,5	16,0	80,0	0,0	5145
24. Mai 03	17,7	16,7	72,1	0,0	7327
25. Mai 03	15,9	16,2	85,9	0,0	2848
26. Mai 03	15,1	15,9	95,4	0,5	2420
27. Mai 03	16,8	16,3	91,4	2,5	3135
28. Mai 03	17,5	17,0	85,8	0,0	4187
29. Mai 03	19,5	18,2	79,1	0,0	6406
30. Mai 03	19,9	18,6	70,7	0,0	7515
31. Mai 03	19,0	18,7	82,7	9,8	5606
01. Jun 03	20,2	19,3	74,3	0,0	7466
02. Jun 03	19,8	19,8	67,8	0,0	7671
03. Jun 03	20,6	20,5	70,7	0,0	7535
04. Jun 03	22,3	21,6	69,6	0,0	7289
05. Jun 03	23,0	22,4	72,5	17,1	6601
06. Jun 03	21,1	22,1	87,2	0,0	4782
07. Jun 03	21,8	22,9	79,2	0,0	7019
08. Jun 03	22,7	23,5	77,8	6,4	6930
09. Jun 03	21,3	23,1	80,6	0,0	5719
10. Jun 03	23,5	24,0	69,5	0,0	7398
11. Jun 03	24,2	24,2	73,1	0,0	6662

Tabelle 30. Relevante Tagesdaten der Wetterstation Nr. 8 in Freising (2004)

	Durchschnittliche Lufttemperatur in 20 cm Höhe (°C)	Durchschnittliche Bodentemperatur in 5 cm Tiefe (°C)	Durchschnittliche relative Luftfeuchte (%)	Niederschlag (mm)	Summe der Globalstrahlung ($W\ m^{-2}s^{-1}$)
01. Mai 04	11,8	13,8	90,5	2,4	2463
02. Mai 04	11,8	13,2	77,6	0,4	4671
03. Mai 04	12,9	14,8	70,2	0,0	6768
04. Mai 04	13,4	14,8	74,6	0,0	3632
05. Mai 04	9,5	12,8	93,0	1,1	1505
06. Mai 04	6,2	10,0	98,6	7,4	1431
07. Mai 04	7,0	9,7	85,3	6,6	3727
08. Mai 04	7,9	10,0	63,8	0,0	6650
09. Mai 04	7,2	9,8	85,7	3,7	2709
10. Mai 04	7,7	9,7	89,9	0,4	2603
11. Mai 04	10,4	11,7	73,0	0,0	6767
12. Mai 04	12,3	13,5	73,9	12,3	6446
13. Mai 04	9,7	11,9	85,9	0,1	2389
14. Mai 04	10,7	12,2	77,0	0,0	4550
15. Mai 04	12,7	13,4	64,2	0,2	5582
16. Mai 04	11,4	13,9	78,5	5,2	5576
17. Mai 04	11,8	14,1	67,8	0,0	7463
18. Mai 04	14,4	15,7	69,1	0,0	6514
19. Mai 04	15,6	17,2	66,1	0,0	6604
20. Mai 04	16,5	18,4	62,2	0,0	7848
21. Mai 04	14,3	17,0	82,7	9,2	4575
22. Mai 04	8,4	13,3	76,3	2,9	3491
23. Mai 04	6,5	11,3	64,1	0,0	6545
24. Mai 04	7,9	12,6	64,4	0,0	7560
26. Mai 04	13,0	16,3	58,9	0,0	7525
27. Mai 04	11,7	15,1	77,8	0,4	3005
28. Mai 04	10,2	13,8	80,6	12,9	3280
29. Mai 04	10,5	13,9	71,7	0,0	6813
30. Mai 04	12,4	15,3	60,0	0,0	8670
31. Mai 04	10,8	14,1	88,5	4,5	3525
01. Jun 04	13,3	15,7	77,0	4,2	6619
02. Jun 04	12,2	15,0	90,9	5,0	3706
03. Jun 04	11,9	13,4	99,3	12,0	1112
04. Jun 04	14,6	16,0	80,3	2,6	5749
05. Jun 04	12,0	15,1	92,1	12,2	3286
06. Jun 04	12,7	15,6	78,6	5,6	5433
07. Jun 04	14,7	17,3	68,4	0,0	8758
08. Jun 04	18,0	19,8	67,9	0,0	8560
09. Jun 04	20,4	21,9	65,5	0,0	8003
10. Jun 04	21,6	22,6	66,8	0,0	6359
11. Jun 04	16,6	19,4	96,0	18,5	2372
12. Jun 04	14,6	17,4	85,8	13,6	3594

Fortsetzung von Tabelle 30.

	Durchschnittliche Lufttemperatur in 20 cm Höhe (°C)	Durchschnittliche Bodentemperatur in 5 cm Tiefe (°C)	Durchschnittliche relative Luftfeuchte (%)	Niederschlag (mm)	Summe der Globalstrahlung ($W\ m^{-2}s^{-1}$)
13. Jun 04	12,2	16,0	84,1	0,0	4529
13. Jun 04	12,2	16,0	84,1	0,0	4529
14. Jun 04	14,0	17,7	75,0	0,0	7296
15. Jun 04	16,3	18,1	68,7	0,0	5518
16. Jun 04	14,4	18,6	68,9	0,6	6080
17. Jun 04	16,2	19,5	60,9	0,0	8488
18. Jun 04	16,5	19,3	67,4	2,4	5048
19. Jun 04	13,9	17,9	84,8	1,9	3978
20. Jun 04	10,7	15,4	94,3	5,4	1989
21. Jun 04	12,2	15,5	79,2	0,4	5526
22. Jun 04	15,3	17,2	77,6	0,0	4830
23. Jun 04	15,9	17,2	81,4	4,6	3998
24. Jun 04	17,2	18,3	60,2	0,1	8643
25. Jun 04	14,1	17,7	74,4	2,4	4902
26. Jun 04	15,1	19,5	66,6	0,0	8411
27. Jun 04	19,0	20,5	73,3	0,7	5148
28. Jun 04	18,9	22,0	66,6	0,2	7909
29. Jun 04	15,8	21,1	63,6	0,0	6955
30. Jun 04	16,3	21,8	62,2	0,0	7949
01. Jul 04	15,3	19,2	83,5	2,6	2735
02. Jul 04	13,7	17,4	87,3	2,9	4223
03. Jul 04	14,7	18,1	68,0	0,2	6453
04. Jul 04	16,3	20,7	63,6	0,0	8611
05. Jul 04	18,1	20,7	73,6	1,3	5206
06. Jul 04	16,3	19,7	87,0	9,4	4848
07. Jul 04	18,0	19,6	80,9	0,4	5918
08. Jul 04	19,8	21,0	80,6	16,4	5659
09. Jul 04	14,9	18,8	73,6	18,1	5890
10. Jul 04	11,8	16,3	85,5	2,0	3639
11. Jul 04	11,9	15,9	84,3	6,2	4907
12. Jul 04	12,6	16,4	88,5	4,5	5033
13. Jul 04	12,8	16,2	89,2	3,1	3850
14. Jul 04	15,0	17,4	76,6	0,4	5354
15. Jul 04	15,5	17,2	89,6	4,6	2309
16. Jul 04	18,6	19,7	78,1	0,0	5919
17. Jul 04	19,2	21,2	79,6	0,9	7194
18. Jul 04	21,8	23,4	69,4	0,5	7779
19. Jul 04	20,9	24,0	75,6	0,0	6470
20. Jul 04	21,1	24,2	77,2	0,4	6690
21. Jul 04	21,1	24,3	74,9	0,0	7180
22. Jul 04	20,6	24,0	78,0	6,0	7264
23. Jul 04	20,2	22,6	81,2	0,1	4729

Fortsetzung von Tabelle 30.

	Durchschnittliche Lufttemperatur in 20 cm Höhe (°C)	Durchschnittliche Bodentemperatur in 5 cm Tiefe (°C)	Durchschnittliche relative Luftfeuchte (%)	Niederschlag (mm)	Summe der Globalstrahlung ($W\ m^{-2}s^{-1}$)
24. Jul 04	18,0	20,7	93,7	9,4	2401
25. Jul 04	18,3	21,0	77,4	0,1	6656
26. Jul 04	15,4	18,9	82,0	4,9	3124
27. Jul 04	14,8	18,9	75,3	0,0	7079
28. Jul 04	14,7	19,0	68,7	0,0	5923
29. Jul 04	15,8	20,2	65,5	0,0	7996
30. Jul 04	18,0	22,2	67,3	0,0	7746
31. Jul 04	19,9	23,3	70,4	0,0	6243
01. Aug 04	21,4	24,2	66,6	0,0	6512
02. Aug 04	19,7	24,3	70,8	0,0	6602
03. Aug 04	18,9	23,5	68,2	0,0	6457
04. Aug 04	19,5	23,6	61,4	0,0	7047
05. Aug 04	21,2	24,0	59,8	0,0	7370
06. Aug 04	21,1	24,5	66,6	0,0	6715
07. Aug 04	20,3	24,5	74,1	0,0	5422
08. Aug 04	19,3	23,9	66,9	0,0	7295
09. Aug 04	20,2	24,0	62,6	0,0	7252
10. Aug 04	21,1	23,4	60,5	0,0	6644
11. Aug 04	20,6	23,1	73,8	0,0	4413
12. Aug 04	22,2	24,6	70,7	45,5	6461
13. Aug 04	17,8	20,3	68,5	0,3	5237
14. Aug 04	14,6	17,3	93,3	16,9	1642
15. Aug 04	16,6	19,0	84,3	0,5	4835
16. Aug 04	17,3	19,2	77,6	0,9	5525
17. Aug 04	18,5	20,3	80,1	0,0	5002
18. Aug 04	20,2	21,2	70,4	0,0	5972
19. Aug 04	19,9	21,4	74,5	3,1	4499
20. Aug 04	16,3	19,3	93,6	6,1	1842
21. Aug 04	14,4	17,5	90,6	10,7	2519
22. Aug 04	13,4	17,3	78,3	0,0	4382
23. Aug 04	15,4	17,6	77,2	0,2	5297
24. Aug 04	15,9	17,5	87,1	2,9	2206
25. Aug 04	16,1	17,7	71,1	0,2	5155
26. Aug 04	14,2	17,1	87,3	4,6	3626
27. Aug 04	14,7	17,3	78,9	0,5	4726
28. Aug 04	16,3	18,0	74,0	0,0	6318
29. Aug 04	15,8	18,0	85,8	0,1	3723
30. Aug 04	15,3	17,6	83,5	0,3	3501
31. Aug 04	14,6	17,6	74,9	0,0	4378

Tabelle 31a. Verlauf von PAR_{außen}, Photosyntheserate, Luft- und Blatttemperatur und stomatärer Leitfähigkeit kurz vor und während der Abdunklung bei *Galinsoga* ssp. am 18. August 2002. Meßbeginn: 13:14 Uhr, Abdunklung in 154. Sekunde ab Meßbeginn (Fettdruck).

Zeit (s)	PAR _{außen} ($\mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Blatttemperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Photosyntheserate ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Stomatäre Leitfähigkeit ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
0	1700	30,92	29,98	17,1	1,35
14	1700	30,95	30,01	21,1	1,36
25	1701	30,97	30,01	22,7	1,37
35	1702	30,98	30,04	23,7	1,39
48	1695	31,01	30,05	21,7	1,39
60	1694	31,02	30,08	22,0	1,39
72	1692	31,04	30,07	22,0	1,38
84	1692	31,07	30,10	23,0	1,40
95	1689	31,09	30,11	22,5	1,38
107	1688	31,11	30,14	22,3	1,39
119	1688	31,13	30,15	22,2	1,39
130	1689	31,16	30,18	21,4	1,40
142	1692	31,19	30,23	21,0	1,39
154	4	31,22	30,03	21,1	1,40
164	0	31,22	29,14	4,6	1,40
176	0	31,22	28,99	-0,2	1,39
188	0	31,22	28,93	-8,3	1,58
201	1	31,23	28,95	-12,1	1,39
215	1	31,24	28,94	-2,4	1,28
227	0	31,24	28,92	-1,7	1,23
237	0	31,25	28,94	1,8	1,21
251	1	31,25	28,96	1,7	1,19
262	0	31,25	28,94	-1,1	1,20
272	1	31,25	28,97	-3,7	1,19
285	1	31,25	28,97	-4,5	1,19
296	0	31,25	29,01	-3,0	1,18
308	1	31,25	29,01	-2,5	1,17
319	0	31,25	29,04	-1,2	1,16
331	0	31,25	29,04	-0,9	1,15
341	0	31,25	29,03	-1,5	1,15
353	0	31,26	29,05	-1,2	1,14
364	0	31,26	29,09	-1,5	1,13
374	0	31,26	29,09	-1,8	1,12
386	0	31,26	29,13	-2,0	1,11
398	0	31,26	29,12	-1,3	1,11
410	0	31,26	29,17	-0,8	1,09
420	0	31,27	29,19	-1,3	1,09
432	0	31,26	29,21	-1,5	1,07
443	1	31,26	29,22	-1,7	1,07
455	0	31,26	29,23	-2,3	1,05
468	1	31,27	29,29	-2,2	1,03
479	0	31,27	29,30	-1,6	1,01
491	0	31,27	29,31	-1,3	1,01

Tabelle 31b. Verlauf von PAR_{außen}, Luft- und Blatttemperatur, Photosyntheserate, stomatärer Leitfähigkeit, CF, REIP, PRI, GNDVI, RVI und GR-Ratio während und nach der Abdunklung bei *Galinsoga* ssp. am 18. August 2002. Meßbeginn: 13:29 Uhr, Wegnahme der Abdunklung ab der 107. Sekunde ab Meßbeginn (Fettdruck).

Zeit (s)	PAR _{außen} (µmol Quanten m ⁻² s ⁻¹)	Lufttemperatur (°C)	Blatttemperatur (°C)	Photosyntheserate (µmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	Stomatäre Leitfähigkeit (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)	CF	REIP	PRI	GNDVI	RVI	GR-Ratio
0	1	31,37	30,03	-1,4	0,37						
11	0	31,38	30,05	-1,2	0,37						
22	0	31,38	30,09	-1,2	0,36						
34	0	31,39	30,10	-0,6	0,35						
47	1	31,39	30,12	-0,9	0,34						
59	1	31,40	30,15	-1,3	0,34						
71	0	31,40	30,15	-1,1	0,33						
83	1	31,41	30,19	-0,8	0,33						
95	0	31,42	30,22	-0,1	0,32						
107	1625	31,44	31,53	2,5	0,30	2,17	718,7	0,078	0,71	21,9	3,70
119	1631	31,47	31,78	6,4	0,31	1,55	719,6	0,087	0,70	24,8	4,22
130	1644	31,48	31,90	9,0	0,31	1,53	719,8	0,094	0,70	24,4	4,13
141	1651	31,50	31,94	9,4	0,31	1,30	719,8	0,097	0,70	23,9	4,07
153	1648	31,52	31,99	8,0	0,31	1,18	719,8	0,098	0,70	23,7	4,06
164	1646	31,54	32,01	9,1	0,32	1,16	719,6	0,102	0,69	22,1	3,95
176	1645	31,56	32,03	10,1	0,31	1,21	719,9	0,097	0,70	23,6	4,04
186	1647	31,59	32,08	10,9	0,31	1,18	719,7	0,100	0,69	22,4	3,94
198	1643	31,61	32,11	11,8	0,31	1,19	719,7	0,101	0,68	21,4	3,87
210	1654	31,64	32,14	12,0	0,30	1,20	719,9	0,100	0,68	21,5	3,84
222	1660	31,66	32,19	12,2	0,30	1,01	720,0	0,097	0,69	21,4	3,80
233	1661	31,69	32,22	12,8	0,30	1,25	719,1	0,110	0,67	20,4	3,91
245	1656	31,70	32,25	12,4	0,30	1,18	719,1	0,109	0,67	20,2	3,89
257	1649	31,74	32,29	12,7	0,30	1,19	719,3	0,106	0,67	20,0	3,82
268	1649	31,77	32,33	12,6	0,29	1,27	719,5	0,103	0,68	21,7	3,96
278	1655	31,79	32,36	13,1	0,29	1,23	719,1	0,110	0,67	20,4	3,91
290	1659	31,83	32,42	13,4	0,29	1,26	719,1	0,109	0,67	20,2	3,89
300	1658	31,85	32,47	13,4	0,28	1,25	719,3	0,106	0,67	20,0	3,82
311	1667	31,87	32,47	14,0	0,28	1,25	719,5	0,103	0,68	21,7	3,96
323	1668	31,90	32,52	13,5	0,28	1,33	719,6	0,102	0,68	21,3	3,87

Tabelle 32a. Verlauf von PAR_{außen}, Photosyntheserate, Luft- und Blatttemperatur und stomatärer Leitfähigkeit kurz vor und während der Abdunklung bei *Galinsoga* ssp. am 18. August 2002. Meßbeginn: 13:39 Uhr, Abdunklung in 69. Sekunde ab Meßbeginn (Fettdruck).

Zeit (s)	PAR _{außen} ($\mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Blatttemperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Photosyntheserate ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Stomatäre Leitfähigkeit ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
0	1671	32,21	30,77	22,2	1,69
12	1658	32,22	30,77	22,3	1,70
23	1655	32,23	30,78	21,8	1,69
35	1653	32,26	30,82	21,7	1,67
47	1660	32,26	30,82	21,1	1,67
57	1669	32,28	30,83	21,4	1,67
69	1	32,28	30,19	19,1	2,05
80	0	32,28	29,62	0,3	1,70
92	0	32,29	29,60	-2,5	1,55
104	0	32,29	29,57	-13,1	1,49
115	0	32,30	29,58	-4,8	1,46
126	0	32,30	29,58	-3,0	1,45
138	0	32,31	29,60	-3,7	1,43
150	0	32,32	29,61	-5,9	1,40
162	1	32,32	29,66	-5,2	1,40
173	0	32,33	29,66	-3,2	1,37
185	0	32,33	29,65	-1,2	1,36
197	1	32,34	29,65	-1,2	1,35
208	0	32,34	29,67	-2,5	1,33
219	0	32,35	29,70	-3,2	1,30
231	1	32,35	29,69	-2,5	1,28
242	0	32,36	29,69	-2,2	1,27
253	0	32,36	29,74	-2,6	1,24
264	0	32,36	29,75	-3,4	1,21
276	1	32,36	29,73	-2,1	1,21
287	0	32,36	29,75	-2,4	1,19
299	0	32,37	29,78	-2,1	1,17
310	0	32,37	29,78	-2,1	1,16
320	0	32,38	29,79	-1,9	1,13
332	0	32,38	29,79	-2,1	1,12
343	0	32,38	29,83	-2,8	1,10
354	0	32,38	29,83	-1,6	1,08
365	1	32,39	29,87	-1,7	1,06
377	0	32,39	29,86	-2,5	1,02

Tabelle 32b. Verlauf von PAR_{außen}, Luft- und Blatttemperatur, Photosyntheserate, stomatärer Leitfähigkeit, CF, REIP, PRI, GNDVI, RVI und GR-Ratio während und nach der Abdunklung bei *Galinsoga* ssp. am 18. August 2002. Meßbeginn: 13:54 Uhr, Entfernung der Abdunklung ab der 71. Sekunde ab Meßbeginn (Fettdruck).

Zeit (s)	PAR _{außen} (µmol Quanten m ⁻² s ⁻¹)	Lufttemperatur (°C)	Blatttemperatur (°C)	Photosyntheserate (µmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	Stomatäre Leitfähigkeit (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)	CF	REIP	PRI	GNDVI	RVI	GR-Ratio
0	0	32,59	30,82	-0,4	0,50						
11	0	32,60	30,85	0,9	0,50						
22	0	32,61	30,88	0,1	0,49						
34	1	32,61	30,89	0,4	0,49						
47	0	32,61	30,88	-0,3	0,48						
59	0	32,62	30,90	0,2	0,48						
71	1669	32,61	31,73	1,7	0,45	2,33	718,3	0,085	0,69	20,4	3,78
83	1668	32,61	31,94	5,4	0,49	1,55	719,9	0,094	0,7	25,4	4,26
95	1662	32,61	31,97	9,2	0,51	1,58	720,2	0,101	0,71	26,7	4,34
107	1661	32,60	31,98	11,2	0,52	1,47	719,9	0,104	0,70	26,2	4,34
119	1658	32,60	31,99	10,6	0,52	1,44	719,5	0,110	0,69	24,3	4,27
130	1658	32,58	31,95	9,6	0,52	1,44	719,5	0,110	0,69	24,2	4,26
141	1651	32,58	31,95	10,6	0,52	1,50	719,5	0,111	0,69	24,1	4,24
153	1648	32,56	31,92	11,1	0,52	1,41	719,9	0,110	0,70	24,7	4,21
164	1645	32,55	31,91	12,6	0,52	1,35	719,5	0,112	0,68	23,3	4,18
176	1649	32,54	31,91	13,6	0,53	1,31	719,5	0,113	0,68	23,0	4,16
186	1649	32,54	31,91	13,5	0,53	1,34	719,2	0,114	0,67	21,8	4,11
198	1651	32,55	31,93	12,7	0,52	1,31	719,5	0,111	0,68	22,6	4,12
210	1653	32,56	31,93	13,6	0,53	1,44	719,4	0,112	0,68	22,5	4,11
222	1652	32,57	31,95	13,2	0,53	1,38	719,3	0,114	0,68	22,2	4,10
233	1653	32,58	31,95	13,2	0,53	1,30	719,6	0,112	0,69	23,2	4,12

Tabelle 33a. Verlauf von PAR_{außen}, Photosyntheserate, Luft- und Blatttemperatur und stomatärer Leitfähigkeit kurz vor und während der Abdunklung bei *Galinsoga* ssp. am 19. August 2002. Meßbeginn: 12:56 Uhr, Abdunklung in der 59. Sekunde ab Meßbeginn (Fettdruck).

Zeit (s)	PAR _{außen} ($\mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Blatttemperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Photosyntheserate ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Stomatäre Leitfähigkeit ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
0	1570	30,83	27,36	17,1	1,76
12	1556	30,88	27,34	17,9	1,77
23	1566	30,94	27,41	18,0	1,75
35	1562	30,99	27,44	18,0	1,74
47	1575	31,05	27,47	17,4	1,73
59	460	31,11	27,49	17,3	1,74
71	2	31,14	26,32	4,2	1,86
81	0	31,16	26,21	-2,0	1,75
95	0	31,18	26,20	-8,3	1,69
107	0	31,21	26,21	-10,1	1,66
119	0	31,23	26,17	-4,1	1,66
130	0	31,25	26,17	-3,0	1,64
142	0	31,27	26,19	-0,5	1,62
154	1	31,29	26,24	-1,0	1,59
166	0	31,31	26,23	-2,4	1,58
177	0	31,31	26,28	-4,0	1,56
189	1	31,34	26,27	-3,5	1,54
200	1	31,35	26,28	-2,7	1,53
212	0	31,37	26,28	-2,2	1,52
223	0	31,38	26,32	-2,9	1,49
234	1	31,40	26,40	-2,7	1,47
245	0	31,41	26,36	-2,8	1,46
256	0	31,43	26,37	-2,6	1,45
267	0	31,44	26,40	-3,1	1,43
279	0	31,45	26,42	-2,9	1,41
290	0	31,47	26,44	-2,6	1,40
302	0	31,48	26,45	-3,2	1,39
313	0	31,50	26,53	-3,0	1,36
324	0	31,51	26,54	-2,6	1,36
335	0	31,52	26,59	-2,6	1,34
347	0	31,54	26,56	-2,3	1,34
358	1	31,55	26,64	-3,4	1,31
370	0	31,57	26,63	-2,2	1,30
381	1	31,58	26,64	-2,7	1,29
393	0	31,59	26,67	-2,4	1,28
405	1	31,61	26,72	-3,1	1,25

Tabelle 33b. Verlauf von PAR_{außen}, Luft- und Blatttemperatur, Photosyntheserate, stomatärer Leitfähigkeit, CF, REIP, PRI, GNDVI, RVI und GR-Ratio während und nach der Abdunklung bei *Galinsoga* ssp. am 19. August 2002. Meßbeginn: 13:29 Uhr, Entfernung der Abdunklung ab der 107. Sekunde ab Meßbeginn (Fettdruck).

Zeit (s)	PAR _{außen} (µmol Quanten m ⁻² s ⁻¹)	Lufttemperatur (°C)	Blatttemperatur (°C)	Photosyntheserate (µmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	Stomatäre Leitfähigkeit (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)	CF	REIP	PRI	GNDVI	RVI	GR-Ratio
0	0	30,83	27,36	-2,4	1,76						
12	0	30,88	27,34	-1,9	1,77						
23	0	30,94	27,41	-1,7	1,75						
35	0	30,99	27,44	-2,4	1,74						
48	0	31,05	27,47	-2,5	1,73						
59	0	31,11	27,49	-2,4	1,74						
71	0	31,14	26,32	-2,6	1,86						
83	0	31,16	26,21	-2,1	1,75						
95	0	31,18	26,20	-1,3	1,69						
106	0	31,21	26,21	-1,5	1,66						
118	0	31,23	26,17	-1,3	1,66						
129	1	31,25	26,17	-1,6	1,64						
140	1	31,27	26,19	-2,0	1,62						
152	1618	31,29	26,24	-0,3	1,59	2,17	718,3	0,083	0,70	21,9	3,82
163	1621	31,31	26,23	3,8	1,58	1,26	719,2	0,099	0,68	23,2	4,21
174	1622	31,31	26,28	4,5	1,56	1,22	719,1	0,099	0,68	22,0	4,07
184	1618	31,34	26,27	7,5	1,54	1,25	719,1	0,102	0,68	22,3	4,13
197	1622	31,35	26,28	8,8	1,53	1,15	719,1	0,104	0,68	21,7	4,03
209	1619	31,37	26,28	7,4	1,52	0,99	719,0	0,106	0,67	21,2	3,98
221	1617	31,38	26,32	6,3	1,49	1,14	718,8	0,105	0,66	19,9	3,87
234	1613	31,40	26,40	7,5	1,47	1,01	719,0	0,106	0,67	20,4	3,89
245	1609	31,41	26,36	9,5	1,46	1,03	718,9	0,108	0,67	20,0	3,86
257	1606	31,43	26,37	11,2	1,45	1,08	718,8	0,106	0,67	19,9	3,83
269	1608	31,44	26,40	10,8	1,43	1,15	718,9	0,107	0,66	19,6	3,80
280	1608	31,45	26,42	9,3	1,41	1,02	718,9	0,107	0,66	19,6	3,81
292	1609	31,47	26,44	8,6	1,40	1,07	718,9	0,105	0,66	19,5	3,80
303	1607	31,48	26,45	9,5	1,39	1,06	718,9	0,107	0,66	19,5	3,80
315	1606	31,50	26,53	10,2	1,36	1,11	718,9	0,106	0,66	19,5	3,79
327	1605	31,51	26,54	11,0	1,36	1,02	719,0	0,106	0,66	19,5	3,80
338	1606	31,52	26,59	9,8	1,34	0,96	718,9	0,106	0,67	19,7	3,79
350	1609	31,54	26,56	9,7	1,34	0,98	719,1	0,106	0,67	20,4	3,88
361	1610	31,55	26,64	10,2	1,31	0,97	719,0	0,105	0,67	20,4	3,88
372	1625	31,57	26,63	10,6	1,30	0,93	718,9	0,105	0,67	19,7	3,80

Tabelle 34a. Verlauf von PAR_{außen}, Photosyntheserate, Luft- und Blatttemperatur und stomatärer Leitfähigkeit kurz vor und während der Abdunklung bei *Brassica napus* var. *napus*. am 23. August 2002. Meßbeginn: 13:45 Uhr, Abdunklung in der 174. Sekunde ab Meßbeginn (Fettdruck).

Zeit (s)	PAR _{außen} (μmol Quanten m ⁻² s ⁻¹)	Lufttemperatur (°C)	Blatttemperatur (°C)	Photosyntheserate (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	Stomatäre Leitfähigkeit (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)
0	1711	29,48	27,84	20,8	1,43
11	1705	29,53	27,91	20,8	1,41
23	1696	29,58	27,93	20,8	1,40
35	1704	29,64	28,02	20,1	1,36
47	1703	29,69	28,06	20,9	1,36
59	1706	29,74	28,13	20,8	1,34
70	1711	29,79	28,17	20,4	1,33
81	1708	29,84	28,26	20,9	1,31
92	1697	29,89	28,27	20,8	1,29
103	1693	29,94	28,29	20,0	1,28
116	1701	30,00	28,38	19,5	1,26
128	1708	30,05	28,42	20,3	1,24
139	1708	30,10	28,46	20,2	1,24
151	287	30,14	27,16	14,5	1,51
163	1596	30,16	26,74	4,7	1,33
174	1	30,19	26,67	2,4	1,26
186	0	30,22	26,71	-7,7	1,21
197	0	30,25	26,70	-8,7	1,19
209	1	30,27	26,74	-3,5	1,16
221	0	30,29	26,73	-1,4	1,15
233	1	30,31	26,75	2,5	1,13
246	0	30,33	26,83	-0,2	1,10
257	0	30,35	26,84	-1,8	1,09
269	0	30,37	26,95	-4,1	1,06
281	0	30,39	26,99	-3,9	1,04
293	0	30,40	26,99	-2,3	1,04
303	0	30,42	27,03	-0,4	1,02
316	0	30,43	27,03	-1,5	1,02
326	0	30,45	27,10	-1,8	1,00
338	0	30,46	27,20	-3,3	0,98
350	1	30,48	27,15	-2,5	0,98
362	0	30,49	27,20	-1,9	0,97
372	0	30,50	27,21	-1,4	0,96
385	0	30,51	27,20	-2,6	0,96
397	0	30,52	27,33	-2,1	0,93
407	0	30,54	27,33	-2,0	0,93
419	0	30,54	27,32	-2,0	0,92
431	0	30,55	27,32	-2,1	0,92
440	0	30,56	27,33	-1,3	0,91
451	0	30,57	27,40	-2,1	0,89

Tabelle 34b. Verlauf von PAR_{außen}, Luft- und Blatttemperatur, Photosyntheserate, stomatärer Leitfähigkeit, CF, REIP, PRI, GNDVI, RVI und GR-Ratio während und nach der Abdunklung bei *Brassica napus* var. *napus*, am 23. August 2002. Meßbeginn: 13:58 Uhr, Entfernung der Abdunklung ab der 69. Sekunde ab Meßbeginn (Fettdruck).

Zeit (s)	PAR _{außen} (µmol Quanten m ⁻² s ⁻¹)	Lufttemperatur (°C)	Blatttemperatur (°C)	Photosyntheserate (µmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	Stomatäre Leitfähigkeit (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)	CF	REIP	PRI	GNDVI	RVI	GR-Ratio
0	0	30,88	27,97	-1,9	0,71						
11	0	30,88	28,01	-1,2	0,71						
21	0	30,88	28,00	-1,5	0,70						
33	0	30,89	27,99	-1,6	0,71						
45	0	30,89	28,02	-0,7	0,70						
57	0	30,89	28,05	-2,3	0,69						
69	1685	30,90	29,23	0,0	0,60	1,72	719,5	0,068	0,7	18,3	3,09
81	1684	30,92	29,74	2,6	0,61	1,26	720,2	0,073	0,7	19,5	3,35
94	1668	30,93	29,90	7,3	0,62	1,22	720,2	0,074	0,7	19,8	3,4
107	1667	30,94	29,95	11,1	0,62	1,18	720,2	0,075	0,70	19,8	3,39
121	1665	30,95	29,93	11,7	0,63	1,07	720,3	0,077	0,70	19,7	3,38
133	1671	30,96	29,95	11,7	0,63	1,05	720,5	0,076	0,70	20,1	3,35
143	1673	30,98	30,00	11,8	0,63	1,09	720,6	0,077	0,70	20,2	3,35
155	1676	30,98	29,90	12,9	0,63	1,11	720,6	0,077	0,70	20,2	3,37
166	1675	31,00	29,94	14,0	0,63	1,15	720,5	0,077	0,71	20,3	3,36
178	1676	31,02	30,02	14,4	0,62	1,14	720,5	0,077	0,70	20,1	3,37
190	1671	31,05	30,05	15,1	0,63	0,99	720,5	0,077	0,70	20,2	3,36
202	1663	31,08	30,08	14,7	0,63	1,09	720,6	0,075	0,70	20,3	3,35
213	1669	31,10	30,10	15,1	0,63	1,07	720,7	0,076	0,70	20,4	3,40
225	1674	31,12	30,16	15,3	0,62	1,11	720,6	0,076	0,71	20,5	3,39
236	1669	31,16	30,19	15,3	0,63	0,99	720,7	0,076	0,71	20,3	3,35
247	1660	31,19	30,19	15,6	0,63	1,09	720,8	0,075	0,71	20,9	3,39
260	1627	31,22	30,23	15,4	0,63	1,08	720,8	0,075	0,71	20,3	3,36
272	1621	31,26	30,25	15,3	0,63	1,08	720,7	0,075	0,71	20,4	3,36
283	1631	31,28	30,28	16,1	0,63	1,08	720,7	0,076	0,71	20,6	3,36
295	1634	31,31	30,32	15,2	0,63	1,12	720,7	0,076	0,71	20,5	3,35
305	1649	31,35	30,41	15,7	0,63	1,11	720,8	0,075	0,71	20,3	3,31

Tabelle 35a. Verlauf von PAR_{außen}, Photosyntheserate, Luft- und Blatttemperatur und stomatärer Leitfähigkeit kurz vor und während der Abdunklung bei *Brassica napus* var. *napus*. am 29. August 2002. Meßbeginn: 12:49 Uhr, Abdunklung in der 139. Sekunde ab Meßbeginn (Fettdruck).

Zeit (s)	PAR _{außen} (μmol Quanten m ⁻² s ⁻¹)	Lufttemperatur (°C)	Blatttemperatur (°C)	Photosyntheserate (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	Stomatäre Leitfähigkeit (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)
0	1564	30,84	29,85	22,4	1,31
11	1560	30,85	29,88	22,1	1,32
24	1549	30,88	29,92	22,2	1,28
35	1519	30,90	29,92	21,2	1,27
47	1490	30,92	29,95	21,8	1,25
58	1494	30,95	29,95	22,4	1,24
69	1460	30,97	30,01	22,2	1,20
79	1434	30,99	30,00	21,2	1,18
91	1462	31,01	30,02	20,7	1,16
103	1524	31,03	30,08	20,6	1,15
115	1169	31,06	30,16	22,0	1,15
127	119	31,06	29,61	3,5	1,03
138	0	31,06	29,61	-5,0	0,92
150	1	31,07	29,59	-8,3	0,89
162	1	31,08	29,59	-20,7	0,87
174	0	31,09	29,64	-15,7	0,85
185	0	31,10	29,66	-9,0	0,84
196	0	31,11	29,66	-5,1	0,84
207	0	31,11	29,68	0,0	0,84
220	0	31,12	29,73	-1,2	0,82
233	0	31,13	29,76	-6,0	0,82
245	0	31,14	29,77	-8,8	0,81
256	0	31,14	29,86	-12,0	0,80
268	0	31,15	29,80	-10,6	0,81
279	0	31,16	29,86	-6,6	0,80
292	0	31,16	29,88	-4,6	0,80
303	0	31,17	29,89	-4,4	0,80
314	1	31,18	29,93	-5,8	0,79
325	0	31,18	29,96	-7,8	0,78
337	0	31,19	29,96	-7,5	0,79
347	0	31,20	29,99	-6,9	0,78
360	0	31,21	30,00	-6,9	0,79
372	0	31,21	30,04	-6,2	0,78
383	1	31,22	30,03	-5,8	0,78
394	0	31,23	30,06	-7,3	0,78
406	0	31,23	30,07	-6,4	0,78
417	0	31,24	30,11	-6,4	0,77
428	0	31,24	30,11	-7,1	0,77
439	0	31,25	30,12	-6,3	0,77
450	0	31,26	30,15	-6,4	0,77
461	0	31,26	30,15	-7,2	0,77
472	0	31,27	30,22	-6,3	0,76
483	0	31,28	30,18	-6,5	0,77
495	0	31,28	30,23	-7,2	0,75
507	0	31,29	30,22	-6,9	0,76

Tabelle 35b. Verlauf von PAR_{außen}, Luft- und Blatttemperatur, Photosyntheserate, stomatärer Leitfähigkeit, CF, REIP, PRI, GNDVI, RVI und GR-Ratio während und nach der Abdunklung bei *Brassica napus* var. *napus*, am 29. August 2002. Meßbeginn: 13:07 Uhr, Entfernung der Abdunklung ab der 69. Sekunde ab Meßbeginn (Fettdruck).

Zeit (s)	PAR _{außen} (µmol Quanten m ⁻² s ⁻¹)	Lufttemperatur (°C)	Blatttemperatur (°C)	Photosyntheserate (µmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	Stomatäre Leitfähigkeit (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)	CF	REIP	PRI	GNDVI	RVI	GR-Ratio
0	0	31,87	30,99	-5,8	0,63						
11	0	31,87	30,99	-5,4	0,62						
23	0	31,89	31,00	-6,7	0,63						
34	0	31,90	31,02	-7,0	0,62						
45	0	31,92	31,03	-5,9	0,63						
57	0	31,93	31,03	-6,6	0,62						
69	1213	31,94	31,25	-6,6	0,60	2,16	720	0,083	0,69	19,1	3,34
81	1262	31,97	31,55	-3,6	0,67	1,43	720,4	0,084	0,7	20,5	3,4
93	1320	31,98	31,59	2,4	0,73	1,52	720,4	0,083	0,71	20,9	3,46
106	1334	31,98	31,61	6,2	0,75	1,49	720,4	0,085	0,70	20,7	3,42
116	1368	31,99	31,63	9,4	0,77	1,63	720,4	0,086	0,70	20,6	3,42
128	1549	32,00	31,64	11,0	0,78	1,51	720,4	0,086	0,70	20,5	3,41
142	1610	32,01	31,67	11,3	0,79	1,38	720,5	0,087	0,71	20,8	3,41
154	1485	32,03	31,66	12,0	0,81	1,31	720,6	0,086	0,71	20,9	3,42
164	1424	32,04	31,63	12,8	0,80	1,22	720,6	0,086	0,71	20,7	3,40
176	1522	32,05	31,66	15,2	0,79	1,30	720,6	0,085	0,71	20,7	3,41
188	1511	32,07	31,68	16,4	0,79	1,37	720,6	0,087	0,71	20,8	3,43
200	1556	32,09	31,70	16,0	0,80	1,26	720,6	0,087	0,71	20,7	3,39
212	1593	32,12	31,75	16,8	0,81	1,36	720,6	0,087	0,71	20,8	3,42
222	1602	32,14	31,78	16,8	0,82	1,26	720,6	0,087	0,71	21,0	3,44
233	1615	32,16	31,80	16,9	0,82	1,36	720,5	0,086	0,71	20,6	3,39
245	1618	32,19	31,83	17,2	0,83	1,44	720,6	0,085	0,71	20,7	3,40
257	1626	32,20	31,82	18,4	0,84	1,44	720,5	0,087	0,71	20,7	3,41
269	1633	32,23	31,84	18,8	0,84	1,26	720,5	0,087	0,71	20,8	3,41
281	1640	32,24	31,87	17,6	0,84	1,33	720,6	0,085	0,71	20,5	3,36
293	1639	32,26	31,87	18,5	0,85	1,50	720,6	0,085	0,71	20,6	3,40
304	1637	32,27	31,87	18,8	0,85	1,45	720,6	0,084	0,71	20,6	3,37
314	1639	32,28	31,87	18,5	0,85	1,35	720,5	0,084	0,71	20,8	3,40
326	1638	32,29	31,88	18,9	0,86	1,34	720,6	0,085	0,71	21,0	3,41
337	1632	32,30	31,89	19,6	0,86	1,31	720,6	0,084	0,71	20,7	3,41

Tabelle 36a. Verlauf von PAR_{außen}, Photosyntheserate, Luft- und Blatttemperatur und stomatärer Leitfähigkeit kurz vor und während der Abdunklung bei *Brassica napus* var. *napus*. am 4. September 2002. Meßbeginn: 14:03 Uhr, Abdunklung in der 166. Sekunde ab Meßbeginn (Fettdruck).

Zeit (s)	PAR _{außen} ($\mu\text{mol Quanten m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Blatttemperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Photosyntheserate ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Stomatäre Leitfähigkeit ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
0	1569	33,26	31,48	23,1	1,69
13	1536	33,28	31,48	22,5	1,69
23	1523	33,30	31,50	23,5	1,67
35	1544	33,32	31,51	22,7	1,64
47	1540	33,33	31,53	22,7	1,64
59	1450	33,34	31,52	23,5	1,62
71	1445	33,35	31,46	22,4	1,57
83	1464	33,36	31,45	22,1	1,57
95	1429	33,37	31,51	23,1	1,54
107	1378	33,38	31,45	22,2	1,52
119	1335	33,41	31,44	21,6	1,51
131	1338	33,40	31,42	21,2	1,48
141	1345	33,41	31,44	21,6	1,46
153	58	33,46	31,35	20,9	1,53
166	0	33,44	30,71	4,0	1,54
176	0	33,47	30,64	-2,5	1,43
188	1	33,47	30,61	-11,3	1,39
200	0	33,49	30,60	-17,8	1,39
210	0	33,48	30,62	-8,4	1,36
222	1	33,50	30,62	-6,1	1,35
233	0	33,48	30,63	-5,9	1,34
245	0	33,49	30,60	-0,3	1,35
257	0	33,52	30,69	-1,0	1,29
269	0	33,49	30,65	-4,0	1,32
281	0	33,52	30,72	-5,3	1,28
293	0	33,53	30,71	-6,5	1,27
305	1	33,52	30,70	-5,4	1,27
317	0	33,52	30,70	-4,1	1,27
329	0	33,57	30,80	-3,3	1,22
340	1	33,57	30,74	-4,3	1,24
352	0	33,58	30,78	-3,9	1,22
362	0	33,55	30,77	-2,9	1,21
374	1	33,58	30,80	-3,5	1,19
386	0	33,56	30,79	-3,5	1,19
398	0	33,57	30,80	-3,4	1,18
410	1	33,58	30,81	-3,9	1,16
422	0	33,60	30,89	-4,0	1,12
434	0	33,59	30,85	-3,0	1,13
446	0	33,57	30,87	-3,4	1,11
458	1	33,58	30,91	-4,0	1,09
470	1	33,59	30,92	-3,2	1,08
482	0	33,62	30,91	-3,1	1,07
494	1	33,63	30,95	-3,5	1,04
506	0	33,67	30,97	-3,5	1,03
518	0	33,60	30,95	-2,7	1,02

Tabelle 36b. Verlauf von PAR_{außen}, Luft- und Blatttemperatur, Photosyntheserate, stomatärer Leitfähigkeit, CF, REIP, PRI, GNDVI, RVI und GR-Ratio während und nach der Abdunklung bei *Brassica napus* var. *napus*, am 4. September 2002. Meßbeginn: 14:28 Uhr, Entfernung der Abdunklung ab der 69. Sekunde ab Meßbeginn (Fettdruck).

Zeit (s)	PAR _{außen} (µmol Quanten m ⁻² s ⁻¹)	Lufttemperatur (°C)	Blatttemperatur (°C)	Photosyntheserate (µmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	Stomatäre Leitfähigkeit (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)	CF	REIP	PRI	GNDVI	RVI	GR-Ratio
0	0	34,38	33,23	-2,6	0,23						
11	1	34,38	33,26	-3,0	0,23						
23	0	34,39	33,25	-2,6	0,23						
35	1	34,39	33,29	-2,1	0,22						
47	0	34,41	33,29	-3,4	0,22						
59	0	34,49	33,36	-3,7	0,22						
71	1402	34,38	33,41	-2,5	0,21	1,32	720	0,053	0,72	16,1	2,57
83	681	34,38	33,55	-1,0	0,21	0,59	721,2	0,064	0,73	18,3	2,72
95	520	34,36	33,38	4,1	0,21	0,36	721	0,06	0,73	18,3	2,76
107	438	34,45	33,31	5,5	0,21	0,29	721,2	0,061	0,73	17,7	2,69
119	414	34,33	33,19	8,6	0,21	0,22	721,4	0,058	0,73	18,4	2,80
131	400	34,32	33,15	7,5	0,21	0,27	721,1	0,060	0,72	17,8	2,77
143	390	34,31	33,09	6,5	0,21	0,20	721,1	0,060	0,72	17,5	2,72
154	385	34,32	33,08	5,5	0,21	0,27	721,2	0,057	0,72	17,6	2,74
167	383	34,23	33,01	5,1	0,21	0,28	721,2	0,062	0,72	17,5	2,70
178	380	34,22	32,94	5,7	0,21	0,18	721,1	0,058	0,72	17,6	2,71
189	380	34,24	32,93	6,2	0,21	0,22	721,1	0,058	0,72	17,5	2,71
201	378	34,13	32,84	6,7	0,21	0,25	721,1	0,059	0,72	17,4	2,68
214	377	34,11	32,81	6,8	0,20	0,29	721,2	0,058	0,72	17,4	2,69
225	377	34,02	32,72	5,8	0,21	0,25	721,1	0,057	0,72	17,4	2,70
236	381	33,99	32,74	6,9	0,20	0,26	721,3	0,060	0,72	17,4	2,70
248	387	33,98	32,67	6,6	0,20	0,29	721,3	0,058	0,73	18,0	2,75
258	396	33,92	32,65	6,1	0,20	0,28	721,2	0,058	0,72	18,5	2,84
269	404	33,88	32,61	6,2	0,20	0,33	721,0	0,057	0,73	18,2	2,80
281	413	33,83	32,53	7,0	0,20	0,29	721,1	0,058	0,73	18,4	2,79
293	424	33,77	32,48	7,0	0,20	0,28	721,1	0,058	0,73	18,5	2,82
305	439	33,73	32,46	6,6	0,20	0,30	721,4	0,058	0,73	17,9	2,70
315	452	33,69	32,43	7,3	0,20	0,25	721,2	0,056	0,73	18,7	2,80
326	460	33,64	32,38	8,1	0,20	0,30	721,1	0,056	0,73	18,3	2,75
338	469	33,60	32,34	7,6	0,20	0,30	721,2	0,056	0,73	18,6	2,78

Tabelle 37. Korrelationen zwischen den Einzelwerten von PAR (innen und außen), Luft- und Blatttemperatur, stomatärer Leitfähigkeit, Transpirationsrate, Photosyntheserate und -effizienz, CF, REIP, PRI, RG-Ratio, RVI, GNDVI, FQA, CF/RVI, CF/GNDVI und CF/PRI unter durchziehenden Wolkenfeldern bei Raps (29. August 2002) mit N = 98 (Teilstück links oben).

		PAR _{innen}	PAR _{außen}	Lufttemperatur	Blatttemperatur	Stomatäre Leitfähigkeit	Transpirationsrate	Photosyntheserate	Photosyntheseeffizienz
PAR _{innen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	1 ,000	1,000(**) ,000	,063 ,539	,806(**) ,000	,591(**) ,000	,823(**) ,000	,962(**) ,000	-,766(**) ,000
PAR _{außen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	1,000(**) ,000	1 ,000	,033 ,744	,789(**) ,000	,582(**) ,000	,810(**) ,000	,961(**) ,000	-,764(**) ,000
Lufttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,063 ,539	,033 ,744	1 ,000	,611(**) ,000	,409(**) ,000	,499(**) ,000	,074 ,467	-,103 ,315
Blatttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,806(**) ,000	,789(**) ,000	,611(**) ,000	1 ,000	,601(**) ,000	,888(**) ,000	,801(**) ,000	-,615(**) ,000
Stomatäre Leitfähigkeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,591(**) ,000	,582(**) ,000	,409(**) ,000	,601(**) ,000	1 ,000	,893(**) ,000	,625(**) ,000	-,392(**) ,000
Transpirationsrate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,823(**) ,000	,810(**) ,000	,499(**) ,000	,888(**) ,000	,893(**) ,000	1 ,000	,840(**) ,000	-,580(**) ,000
Photosyntheserate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,962(**) ,000	,961(**) ,000	,074 ,467	,801(**) ,000	,625(**) ,000	,840(**) ,000	1 ,000	-,581(**) ,000
Photosyntheseeffizienz	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,766(**) ,000	-,764(**) ,000	-,103 ,315	-,615(**) ,000	-,392(**) ,000	-,580(**) ,000	-,581(**) ,000	1 ,000
CF	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,989(**) ,000	,990(**) ,000	,025 ,808	,780(**) ,000	,555(**) ,000	,790(**) ,000	,947(**) ,000	-,762(**) ,000
REIP	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,403(**) ,000	-,406(**) ,000	-,015 ,886	-,306(**) ,002	-,128 ,209	-,248(*) ,014	-,346(**) ,000	,339(**) ,001
PRI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,860(**) ,000	,856(**) ,000	,112 ,272	,747(**) ,000	,541(**) ,000	,750(**) ,000	,840(**) ,000	-,678(**) ,000
RG-Ratio	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,808(**) ,000	,817(**) ,000	-,231(*) ,022	,502(**) ,000	,323(**) ,001	,512(**) ,000	,782(**) ,000	-,568(**) ,000
RVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,801(**) ,000	,813(**) ,000	-,383(**) ,000	,417(**) ,000	,294(**) ,003	,459(**) ,000	,777(**) ,000	-,590(**) ,000
GNDVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,460(**) ,000	-,456(**) ,000	-,276(**) ,006	-,504(**) ,000	-,283(**) ,005	-,439(**) ,000	-,440(**) ,000	,295(**) ,003

Fortsetzung Tabelle 37. (Teilstück rechts oben)

		CF	REIP	PRI	RG-Ratio	RVI	GNDVI	FQA	CF/RVI	CF/GNDVI	CF/PRI
PAR _{innen}	Korrelation nach Pearson	,989(**)	-,403(**)	,860(**)	,808(**)	,801(**)	-,460(**)	,567(**)	,989(**)	,989(**)	,983(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
PAR _{außen}	Korrelation nach Pearson	,990(**)	-,406(**)	,856(**)	,817(**)	,813(**)	-,456(**)	,567(**)	,988(**)	,989(**)	,984(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
Lufttemperatur	Korrelation nach Pearson	,025	-,015	,112	-,231(*)	-,383(**)	-,276(**)	,011	,061	,028	,019
	Signifikanz (2-seitig)	,808	,886	,272	,022	,000	,006	,912	,552	,782	,851
Blattemperatur	Korrelation nach Pearson	,780(**)	-,306(**)	,747(**)	,502(**)	,417(**)	-,504(**)	,459(**)	,800(**)	,782(**)	,771(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,002	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
Stomatäre Leitfähigkeit	Korrelation nach Pearson	,555(**)	-,128	,541(**)	,323(**)	,294(**)	-,283(**)	,257(*)	,565(**)	,555(**)	,539(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,209	,000	,001	,003	,005	,011	,000	,000	,000
Transpirationsrate	Korrelation nach Pearson	,790(**)	-,248(*)	,750(**)	,512(**)	,459(**)	-,439(**)	,425(**)	,805(**)	,791(**)	,777(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,014	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
Photosyntheserate	Korrelation nach Pearson	,947(**)	-,346(**)	,840(**)	,782(**)	,777(**)	-,440(**)	,524(**)	,947(**)	,946(**)	,939(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
Photosyntheseeffizienz	Korrelation nach Pearson	-,762(**)	,339(**)	-,678(**)	-,568(**)	-,590(**)	,295(**)	-,476(**)	-,761(**)	-,761(**)	-,759(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,001	,000	,000	,000	,003	,000	,000	,000	,000
CF	Korrelation nach Pearson	1	-,446(**)	,839(**)	,834(**)	,815(**)	-,488(**)	,669(**)	,999(**)	1,000(**)	,998(**)
	Signifikanz (2-seitig)		,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
REIP	Korrelation nach Pearson	-,446(**)	1	-,012	-,688(**)	-,402(**)	,838(**)	-,461(**)	-,444(**)	-,450(**)	-,488(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000		,910	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
PRI	Korrelation nach Pearson	,839(**)	-,012	1	,530(**)	,670(**)	-,067	,459(**)	,839(**)	,837(**)	,806(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,910		,000	,000	,511	,000	,000	,000	,000
RG-Ratio	Korrelation nach Pearson	,834(**)	-,688(**)	,530(**)	1	,911(**)	-,626(**)	,627(**)	,821(**)	,835(**)	,854(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000		,000	,000	,000	,000	,000	,000
RVI	Korrelation nach Pearson	,815(**)	-,402(**)	,670(**)	,911(**)	1	-,259(*)	,551(**)	,794(**)	,813(**)	,817(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000		,010	,000	,000	,000	,000
GNDVI	Korrelation nach Pearson	-,488(**)	,838(**)	-,067	-,626(**)	-,259(*)	1	-,449(**)	-,500(**)	-,494(**)	-,527(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,511	,000	,010		,000	,000	,000	,000

Tabelle 38. Korrelationen zwischen den Einzelwerten von PAR (innen und außen), Luft- und Blatttemperatur, stomatärer Leitfähigkeit, Transpirationsrate, Photosyntheserate und -effizienz, CF, REIP, PRI, RG-Ratio, RVI, GNDVI, FQA, CF/RVI, CF/GNDVI und CF/PRI bei *Beta vulgaris* var. *altissima* L. 'Tatjana' (12. August 2003) mit N = 300 (Teilstück links oben).

		PAR _{innen}	PAR _{außen}	Lufttemperatur	Blatttemperatur	Stomatäre Leitfähigkeit	Transpirationsrate	Photosyntheserate	Photosyntheseeffizienz
PAR _{innen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	1	,946(**) ,000	-,156(**) ,007	,168(**) ,004	,509(**) ,000	,469(**) ,000	,922(**) ,000	-,089 ,124
PAR _{außen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,946(**) ,000	1	,111 ,056	,428(**) ,000	,329(**) ,000	,490(**) ,000	,866(**) ,000	-,045 ,437
Lufttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,156(**) ,007	,111 ,056	1	,915(**) ,000	-,439(**) ,000	,176(**) ,002	-,151(**) ,009	,098 ,091
Blatttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,168(**) ,004	,428(**) ,000	,915(**) ,000	1	-,383(**) ,000	,209(**) ,000	,132(*) ,022	,021 ,722
Stomatäre Leitfähigkeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,509(**) ,000	,329(**) ,000	-,439(**) ,000	-,383(**) ,000	1	,487(**) ,000	,671(**) ,000	,276(**) ,000
Transpirationsrate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,469(**) ,000	,490(**) ,000	,176(**) ,002	,209(**) ,000	,487(**) ,000	1	,586(**) ,000	,276(**) ,000
Photosyntheserate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,922(**) ,000	,866(**) ,000	-,151(**) ,009	,132(*) ,022	,671(**) ,000	,586(**) ,000	1	,210(**) ,000
Photosyntheseeffizienz	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,089 ,124	-,045 ,437	,098 ,091	,021 ,722	,276(**) ,000	,276(**) ,000	,210(**) ,000	1
CF	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,676(**) ,000	,651(**) ,000	,072 ,215	,276(**) ,000	,401(**) ,000	,497(**) ,000	,693(**) ,000	,138(*) ,017
REIP	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,168(**) ,004	-,218(**) ,000	-,192(**) ,001	-,318(**) ,000	-,003 ,955	-,061 ,292	-,211(**) ,000	-,097 ,094
PRI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,100 ,084	,130(*) ,024	,180(**) ,002	,196(**) ,001	,134(*) ,020	,172(**) ,003	,115(*) ,047	,125(*) ,030
RG-Ratio	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,290(**) ,000	-,380(**) ,000	-,385(**) ,000	-,457(**) ,000	-,132(*) ,022	-,230(**) ,000	-,264(**) ,000	,003 ,962
RVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,327(**) ,000	-,441(**) ,000	-,450(**) ,000	-,583(**) ,000	-,017 ,768	-,214(**) ,000	-,312(**) ,000	-,020 ,730
GNDVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,296(**) ,000	-,385(**) ,000	-,323(**) ,000	-,460(**) ,000	-,003 ,954	-,176(**) ,002	-,308(**) ,000	-,071 ,222

Fortsetzung Tabelle 38. (Teilstück rechts oben)

		CF	REIP	PRI	RG-Ratio	RVI	GNDVI	FQA	CF/RVI	CF/GNDVI	CF/PRI
PAR _{innen}	Korrelation nach Pearson	,676(**)	-,168(**)	,100	-,290(**)	-,327(**)	-,296(**)	-,251(**)	,584(**)	,678(**)	,713(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,004	,084	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
PAR _{außen}	Korrelation nach Pearson	,651(**)	-,218(**)	,130(*)	-,380(**)	-,441(**)	-,385(**)	-,334(**)	,571(**)	,660(**)	,679(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,024	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
Lufttemperatur	Korrelation nach Pearson	,072	-,192(**)	,180(**)	-,385(**)	-,450(**)	-,323(**)	,016	,072	,091	,039
	Signifikanz (2-seitig)	,215	,001	,002	,000	,000	,000	,784	,213	,117	,506
Blattemperatur	Korrelation nach Pearson	,276(**)	-,318(**)	,196(**)	-,457(**)	-,583(**)	-,460(**)	-,092	,256(**)	,299(**)	,244(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,001	,000	,000	,000	,113	,000	,000	,000
Stomatäre Leitfähigkeit	Korrelation nach Pearson	,401(**)	-,003	,134(*)	-,132(*)	-,017	-,003	,083	,365(**)	,390(**)	,428(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,955	,020	,022	,768	,954	,149	,000	,000	,000
Transpirationsrate	Korrelation nach Pearson	,497(**)	-,061	,172(**)	-,230(**)	-,214(**)	-,176(**)	,050	,420(**)	,500(**)	,504(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,292	,003	,000	,000	,002	,385	,000	,000	,000
Photosyntheserate	Korrelation nach Pearson	,693(**)	-,211(**)	,115(*)	-,264(**)	-,312(**)	-,308(**)	-,162(**)	,603(**)	,696(**)	,729(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,047	,000	,000	,000	,005	,000	,000	,000
Photosyntheseeffizienz	Korrelation nach Pearson	,138(*)	-,097	,125(*)	,003	-,020	-,071	,178(**)	,118(*)	,143(*)	,117(*)
	Signifikanz (2-seitig)	,017	,094	,030	,962	,730	,222	,002	,041	,013	,044
CF	Korrelation nach Pearson	1	-,227(**)	,455(**)	-,352(**)	-,407(**)	-,322(**)	,433(**)	,777(**)	,987(**)	,923(**)
	Signifikanz (2-seitig)		,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
REIP	Korrelation nach Pearson	-,227(**)	1	-,452(**)	,472(**)	,750(**)	,915(**)	-,061	-,614(**)	-,353(**)	-,031
	Signifikanz (2-seitig)	,000		,000	,000	,000	,000	,294	,000	,000	,591
PRI	Korrelation nach Pearson	,455(**)	-,452(**)	1	-,585(**)	-,539(**)	-,442(**)	,412(**)	,626(**)	,506(**)	,116(*)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000		,000	,000	,000	,000	,000	,000	,045
RG-Ratio	Korrelation nach Pearson	-,352(**)	,472(**)	-,585(**)	1	,884(**)	,665(**)	-,072	-,663(**)	-,418(**)	-,209(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000		,000	,000	,215	,000	,000	,000
RVI	Korrelation nach Pearson	-,407(**)	,750(**)	-,539(**)	,884(**)	1	,880(**)	-,054	-,709(**)	-,497(**)	-,248(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000		,000	,350	,000	,000	,000
GNDVI	Korrelation nach Pearson	-,322(**)	,915(**)	-,442(**)	,665(**)	,880(**)	1	,011	-,731(**)	-,452(**)	-,162(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000		,856	,000	,000	,005

Fortsetzung Tabelle 38. (Teilstück links unten)

		PAR _{innen}	PAR _{außen}	Lufttemperatur	Blatttemperatur	Stomatäre Leitfähigkeit	Transpirationsrate	Photosyntheserate	Photosyntheseeffizienz
FQA	Korrelation nach Pearson	-,251(**)	-,334(**)	,016	-,092	,083	,050	-,162(**)	,178(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,784	,113	,149	,385	,005	,002
CF/RVI	Korrelation nach Pearson	,584(**)	,571(**)	,072	,256(**)	,365(**)	,420(**)	,603(**)	,118(*)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,213	,000	,000	,000	,000	,041
CF/GNDVI	Korrelation nach Pearson	,678(**)	,660(**)	,091	,299(**)	,390(**)	,500(**)	,696(**)	,143(*)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,117	,000	,000	,000	,000	,013
CF/PRI	Korrelation nach Pearson	,713(**)	,679(**)	,039	,244(**)	,428(**)	,504(**)	,729(**)	,117(*)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,506	,000	,000	,000	,000	,044

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Fortsetzung Tabelle 38. (Teilstück rechts unten)

		CF	REIP	PRI	RG-Ratio	RVI	GNDVI	FQA	CF/RVI	CF/GNDVI	CF/PRI
FQA	Korrelation nach Pearson	,433(**)	-,061	,412(**)	-,072	-,054	,011	1	,285(**)	,411(**)	,314(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,294	,000	,215	,350	,856		,000	,000	,000
CF/RVI	Korrelation nach Pearson	,777(**)	-,614(**)	,626(**)	-,663(**)	-,709(**)	-,731(**)	,285(**)	1	,857(**)	,606(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000		,000	,000
CF/GNDVI	Korrelation nach Pearson	,987(**)	-,353(**)	,506(**)	-,418(**)	-,497(**)	-,452(**)	,411(**)	,857(**)	1	,884(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000		,000
CF/PRI	Korrelation nach Pearson	,923(**)	-,031	,116(*)	-,209(**)	-,248(**)	-,162(**)	,314(**)	,606(**)	,884(**)	1
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,591	,045	,000	,000	,005	,000	,000	,000	

Tabelle 39. Korrelationen zwischen den Einzelwerten von Sorte, N-Düngungsstufe, CF, REIP, PRI, RG-Ratio, RVI, GNDVI, FQA, CF/RVI, CF/GNDVI und CF/PRI der zwei Varianten der Winterweizensorten 'Xanthos' und 'Pegassos' im N-Steigerungsversuch mit N = 105 (21. Mai 2002, 14:00 Uhr).

		Sorte	Düngungs- stufe	CF	REIP	PRI	RG-Ratio	RVI	GNDVI	CF/RVI	CF/GNDVI	CF/PRI
Sorte	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	1	,071 ,469	-,375(**) ,000	-,079 ,426	,273(**) ,005	-,504(**) ,000	-,396(**) ,000	-,297(**) ,002	,299(**) ,002	-,381(**) ,000	-,355(**) ,000
Düngungs- stufe	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,071 ,469	1	,695(**) ,000	,858(**) ,000	-,770(**) ,000	,622(**) ,000	,685(**) ,000	,805(**) ,000	-,580(**) ,000	,557(**) ,000	,680(**) ,000
CF	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,375(**) ,000	,695(**) ,000	1	,843(**) ,000	-,872(**) ,000	,854(**) ,000	,887(**) ,000	,878(**) ,000	-,496(**) ,000	,959(**) ,000	,977(**) ,000
REIP	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,079 ,426	,858(**) ,000	,843(**) ,000	1	-,944(**) ,000	,755(**) ,000	,841(**) ,000	,935(**) ,000	-,648(**) ,000	,696(**) ,000	,856(**) ,000
PRI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,273(**) ,005	-,770(**) ,000	-,872(**) ,000	-,944(**) ,000	1	-,872(**) ,000	-,926(**) ,000	-,945(**) ,000	,737(**) ,000	-,721(**) ,000	-,905(**) ,000
RG-Ratio	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,504(**) ,000	,622(**) ,000	,854(**) ,000	,755(**) ,000	-,872(**) ,000	1	,962(**) ,000	,887(**) ,000	-,793(**) ,000	,729(**) ,000	,861(**) ,000
RVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,396(**) ,000	,685(**) ,000	,887(**) ,000	,841(**) ,000	-,926(**) ,000	,962(**) ,000	1	,885(**) ,000	-,762(**) ,000	,754(**) ,000	,930(**) ,000
GNDVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,297(**) ,002	,805(**) ,000	,878(**) ,000	,935(**) ,000	-,945(**) ,000	,887(**) ,000	,885(**) ,000	1	-,749(**) ,000	,733(**) ,000	,855(**) ,000
CF/RVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,299(**) ,002	-,580(**) ,000	-,496(**) ,000	-,648(**) ,000	,737(**) ,000	-,793(**) ,000	-,762(**) ,000	-,749(**) ,000	1	-,247(*) ,011	-,550(**) ,000
CF/GNDVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,381(**) ,000	,557(**) ,000	,959(**) ,000	,696(**) ,000	-,721(**) ,000	,729(**) ,000	,754(**) ,000	,733(**) ,000	-,247(*) ,011	1	,911(**) ,000
CF/PRI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,355(**) ,000	,680(**) ,000	,977(**) ,000	,856(**) ,000	-,905(**) ,000	,861(**) ,000	,930(**) ,000	,855(**) ,000	-,550(**) ,000	,911(**) ,000	1

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Tabelle 40. Korrelationen zwischen den Einzelwerten von EC-Stadium, N-Düngung, PAR (innen und außen), Luft- und Blatttemperatur, stomatärer Leitfähigkeit, Transpirationsrate, Photosyntheserate und -effizienz, CF, REIP, PRI, RG-Ratio, RVI, GNDVI, FQA, CF/RVI, CF/GNDVI und CF/PRI bei *Solanum tuberosum* L. cv. 'Selma' mit N = 3000 (Teilstück links oben)

		EC-Stadium	N-Düngung	Tageszeit	PAR _{innen}	PAR _{außen}	Lufttemperatur	Blatttemperatur	Stomatäre Leitfähigkeit	Transpirationsrate	Photosyntheserate	Photosyntheseeffizienz
EC-Stadium	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	1 ,000	,105(**) ,000	,058(**) ,001	-,067(**) ,000	-,022 ,229	-,140(**) ,000	,045(*) ,014	,017 ,340	-,034 ,065	-,118(**) ,000	-,052(**) ,005
N-Düngung	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,105(**) ,000	1 ,000	,051(**) ,005	,102(**) ,000	,036(*) ,047	-,022 ,227	,024 ,191	-,218(**) ,000	-,277(**) ,000	-,107(**) ,000	-,011 ,539
Tageszeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,058(**) ,001	,051(**) ,005	1 ,000	,093(**) ,000	,095(**) ,000	,747(**) ,000	,371(**) ,000	-,535(**) ,000	-,519(**) ,000	-,202(**) ,000	-,023 ,203
PAR _{innen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,067(**) ,000	,102(**) ,000	,093(**) ,000	1 ,000	,870(**) ,000	,275(**) ,000	,313(**) ,000	-,271(**) ,000	-,166(**) ,000	,151(**) ,000	-,048(**) ,009
PAR _{außen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,022 ,229	,036(*) ,047	,095(**) ,000	,870(**) ,000	1 ,000	,358(**) ,000	,407(**) ,000	-,346(**) ,000	-,218(**) ,000	,225(**) ,000	,104(**) ,000
Lufttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,140(**) ,000	-,022 ,227	,747(**) ,000	,275(**) ,000	,358(**) ,000	1 ,000	,548(**) ,000	-,651(**) ,000	-,525(**) ,000	-,048(**) ,009	,090(**) ,000
Blatttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,045(*) ,014	,024 ,191	,371(**) ,000	,313(**) ,000	,407(**) ,000	,548(**) ,000	1 ,000	-,405(**) ,000	-,329(**) ,000	-,005 ,779	,063(**) ,001
Stomatäre Leitfähigkeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,017 ,340	-,218(**) ,000	-,535(**) ,000	-,271(**) ,000	-,346(**) ,000	-,651(**) ,000	-,405(**) ,000	1 ,930(**)	,930(**) ,000	,097(**) ,000	-,189(**) ,000
Transpirationsrate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,034 ,065	-,277(**) ,000	-,519(**) ,000	-,166(**) ,000	-,218(**) ,000	-,525(**) ,000	-,329(**) ,000	,930(**) ,000	1 ,257(**)	,257(**) ,000	-,125(**) ,000
Photosyntheserate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,118(**) ,000	-,107(**) ,000	-,202(**) ,000	,151(**) ,000	,225(**) ,000	-,048(**) ,009	-,005 ,779	,097(**) ,000	,257(**) ,000	1 ,752(**)	,752(**) ,000
Photosyntheseeffizienz	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,052(**) ,005	-,011 ,539	-,023 ,203	-,048(**) ,009	,104(**) ,000	,090(**) ,000	,063(**) ,001	-,189(**) ,000	-,125(**) ,000	,752(**) ,000	1 ,853
CF	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,012 ,496	,253(**) ,000	-,045(*) ,013	,527(**) ,000	,585(**) ,000	,120(**) ,000	,192(**) ,000	-,194(**) ,000	-,159(**) ,000	,179(**) ,000	,141(**) ,000
REIP	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,183(**) ,000	,653(**) ,000	,043(*) ,020	,018 ,316	-,019 ,306	,057(**) ,002	,027 ,133	-,287(**) ,000	-,353(**) ,000	-,103(**) ,000	,074(**) ,000
PRI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,405(**) ,000	-,413(**) ,000	-,023 ,209	,034 ,064	,048(**) ,008	-,081(**) ,000	-,021 ,260	,242(**) ,000	,304(**) ,000	-,001 ,949	-,171(**) ,000
RG-Ratio	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,177(**) ,000	,190(**) ,000	-,135(**) ,000	-,166(**) ,000	-,243(**) ,000	-,239(**) ,000	-,172(**) ,000	,191(**) ,000	,144(**) ,000	-,033 ,073	-,082(**) ,000
RVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,205(**) ,000	,540(**) ,000	-,070(**) ,000	-,080(**) ,000	-,143(**) ,000	-,120(**) ,000	-,092(**) ,000	-,069(**) ,000	-,136(**) ,000	-,086(**) ,000	,003 ,853

Fortsetzung Tabelle 40. (Teilstück rechts oben)

		CF	REIP	PRI	RG-Ratio	RVI	GNDVI	FQA	CF/RVI	CF/GNDVI	CF/PRI
EC-Stadium	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,012 ,496	-,183(**) ,000	,405(**) ,000	-,177(**) ,000	-,205(**) ,000	-,199(**) ,000	,071(**) ,000	,190(**) ,000	,060(**) ,001	-,175(**) ,000
N-Düngung	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,253(**) ,000	,653(**) ,000	-,413(**) ,000	,190(**) ,000	,540(**) ,000	,631(**) ,000	,134(**) ,000	-,259(**) ,000	,064(**) ,000	,345(**) ,000
Tageszeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,045(*) ,013	,043(*) ,020	-,023 ,209	-,135(**) ,000	-,070(**) ,000	-,020 ,285	-,274(**) ,000	-,011 ,545	-,044(*) ,017	-,043(*) ,018
PAR _{innen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,527(**) ,000	,018 ,316	,034 ,064	-,166(**) ,000	-,080(**) ,000	-,042(*) ,023	-,375(**) ,000	,463(**) ,000	,568(**) ,000	,430(**) ,000
PAR _{außen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,585(**) ,000	-,019 ,306	,048(**) ,008	-,243(**) ,000	-,143(**) ,000	-,095(**) ,000	-,474(**) ,000	,562(**) ,000	,649(**) ,000	,479(**) ,000
Lufttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,120(**) ,000	,057(**) ,002	-,081(**) ,000	-,239(**) ,000	-,120(**) ,000	-,031 ,094	-,407(**) ,000	,149(**) ,000	,138(**) ,000	,136(**) ,000
Blatttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,192(**) ,000	,027 ,133	-,021 ,260	-,172(**) ,000	-,092(**) ,000	-,031 ,094	-,304(**) ,000	,198(**) ,000	,212(**) ,000	,176(**) ,000
Stomatäre Leitfähigkeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,194(**) ,000	-,287(**) ,000	,242(**) ,000	,191(**) ,000	-,069(**) ,000	-,191(**) ,000	,277(**) ,000	-,066(**) ,000	-,141(**) ,000	-,252(**) ,000
Transpirations- rate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,159(**) ,000	-,353(**) ,000	,304(**) ,000	,144(**) ,000	-,136(**) ,000	-,263(**) ,000	,169(**) ,000	,009 ,641	-,080(**) ,000	-,239(**) ,000
Photosynthese- rate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,179(**) ,000	-,103(**) ,000	-,001 ,949	-,033 ,073	-,086(**) ,000	-,107(**) ,000	-,113(**) ,000	,183(**) ,000	,221(**) ,000	,157(**) ,000
Photosynthese- seeffizienz	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,141(**) ,000	,074(**) ,000	-,171(**) ,000	-,082(**) ,000	,003 ,853	,041(*) ,024	-,063(**) ,001	,076(**) ,000	,132(**) ,000	,190(**) ,000
CF	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	1	,295(**) ,000	-,139(**) ,000	,038(*) ,035	,192(**) ,000	,271(**) ,000	,298(**) ,000	,495(**) ,000	,947(**) ,000	,930(**) ,000
REIP	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,295(**) ,000	1	-,795(**) ,000	,364(**) ,000	,869(**) ,000	,973(**) ,000	,196(**) ,000	-,457(**) ,000	,012 ,527	,523(**) ,000
PRI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,139(**) ,000	-,795(**) ,000	1	-,254(**) ,000	-,671(**) ,000	-,745(**) ,000	-,073(**) ,000	,394(**) ,000	,082(**) ,000	-,450(**) ,000
RG-Ratio	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,038(*) ,035	,364(**) ,000	-,254(**) ,000	1	,695(**) ,000	,528(**) ,000	,259(**) ,000	-,603(**) ,000	-,129(**) ,000	,100(**) ,000
RVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,192(**) ,000	,869(**) ,000	-,671(**) ,000	,695(**) ,000	1	,930(**) ,000	,256(**) ,000	-,582(**) ,000	-,077(**) ,000	,395(**) ,000

Tabelle 41. Korrelationen zwischen den Einzelwerten von EC-Stadium, Variante, PAR (innen und außen), Luft- und Blatttemperatur, stomatärer Leitfähigkeit, Transpirationsrate, Photosyntheserate und -effizienz, CF, REIP, PRI, RG-Ratio, RVI, GNDVI, FQA, CF/RVI, CF/GNDVI und CF/PRI bei *Hordeum vulgare* 'Duet' (2003) mit N = 3700 (Teilstück links oben)

		EC-Stadium	Variante	Tageszeit	PAR _{innen}	PAR _{außen}	Lufttemperatur	Blatttemperatur	Stomatäre Leitfähigkeit	Transpirationsrate	Photosyntheserate	Photosyntheseeffizienz
EC-Stadium	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	1	,000 1,000	,015 ,357	,259(**) ,000	,337(**) ,000	,586(**) ,000	,580(**) ,000	-,368(**) ,000	-,056(**) ,001	-,300(**) ,000	-,102(**) ,000
Variante	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,000 1,000	1	,034(*) ,036	-,017 ,298	,004 ,801	,014 ,407	,017 ,297	-,034(*) ,039	-,039(*) ,018	,026 ,116	,020 ,225
Tageszeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,015 ,357	,034(*) ,036	1	,060(**) ,000	,021 ,196	,368(**) ,000	,369(**) ,000	-,559(**) ,000	-,513(**) ,000	,129(**) ,000	,264(**) ,000
PAR _{innen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,259(**) ,000	-,017 ,298	,060(**) ,000	1	,943(**) ,000	,685(**) ,000	,736(**) ,000	-,335(**) ,000	,139(**) ,000	,383(**) ,000	,070(**) ,000
PAR _{außen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,337(**) ,000	,004 ,801	,021 ,196	,943(**) ,000	1	,675(**) ,000	,728(**) ,000	-,334(**) ,000	,144(**) ,000	,363(**) ,000	,067(**) ,000
Lufttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,586(**) ,000	,014 ,407	,368(**) ,000	,685(**) ,000	,675(**) ,000	1	,993(**) ,000	-,660(**) ,000	-,111(**) ,000	,113(**) ,000	,061(**) ,000
Blatttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,580(**) ,000	,017 ,297	,369(**) ,000	,736(**) ,000	,728(**) ,000	,993(**) ,000	1	-,680(**) ,000	-,140(**) ,000	,132(**) ,000	,068(**) ,000
Stomatäre Leitfähigkeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,368(**) ,000	-,034(*) ,039	-,559(**) ,000	-,335(**) ,000	-,334(**) ,000	-,660(**) ,000	-,680(**) ,000	1	,686(**) ,000	,082(**) ,000	-,061(**) ,000
Transpirationsrate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,056(**) ,001	-,039(*) ,018	-,513(**) ,000	,139(**) ,000	,144(**) ,000	-,111(**) ,000	-,140(**) ,000	,686(**) ,000	1	,223(**) ,000	-,076(**) ,000
Photosyntheserate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,300(**) ,000	,026 ,116	,129(**) ,000	,383(**) ,000	,363(**) ,000	,113(**) ,000	,132(**) ,000	,082(**) ,000	,223(**) ,000	1	,644(**) ,000
Photosyntheseeffizienz	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,102(**) ,000	,020 ,225	,264(**) ,000	,070(**) ,000	,067(**) ,000	,061(**) ,000	,068(**) ,000	-,061(**) ,000	-,076(**) ,000	,644(**) ,000	1
CF	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,223(**) ,000	,061(**) ,000	,008 ,618	,892(**) ,000	,872(**) ,000	,709(**) ,000	,741(**) ,000	-,311(**) ,000	,200(**) ,000	,330(**) ,000	,045(**) ,007
REIP	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,459(**) ,000	,037(*) ,026	-,019 ,238	-,116(**) ,000	-,165(**) ,000	-,172(**) ,000	-,175(**) ,000	,106(**) ,000	-,012 ,452	,219(**) ,000	,112(**) ,000
PRI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,178(**) ,000	-,066(**) ,000	,136(**) ,000	,239(**) ,000	,267(**) ,000	,097(**) ,000	,114(**) ,000	-,039(*) ,019	,019 ,244	,064(**) ,000	,001 ,941
RG-Ratio	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,790(**) ,000	,011 ,492	-,219(**) ,000	-,261(**) ,000	-,316(**) ,000	-,597(**) ,000	-,586(**) ,000	,391(**) ,000	,019 ,259	,168(**) ,000	,044(**) ,008
RVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,768(**) ,000	-,005 ,766	-,209(**) ,000	-,290(**) ,000	-,341(**) ,000	-,582(**) ,000	-,574(**) ,000	,399(**) ,000	,023 ,165	,219(**) ,000	,072(**) ,000

Fortsetzung Tabelle 41. (Teilstück rechts oben)

		CF	REIP	PRI	RG-Ratio	RVI	GNDVI	FQA	CF/RVI	CF/GNDVI	CF/PRI
EC-Stadium	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,223(**) ,000	-,459(**) ,000	,178(**) ,000	-,790(**) ,000	-,768(**) ,000	-,663(**) ,000	-,058(**) ,000	,480(**) ,000	,287(**) ,000	,181(**) ,000
Variante	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,061(**) ,000	,037(*) ,026	-,066(**) ,000	,011 ,492	-,005 ,766	,010 ,561	,097(**) ,000	,033(*) ,045	,055(**) ,001	,085(**) ,000
Tageszeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,008 ,618	-,019 ,238	,136(**) ,000	-,219(**) ,000	-,209(**) ,000	-,112(**) ,000	-,074(**) ,000	,019 ,243	,008 ,634	-,004 ,788
PAR _{innen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,892(**) ,000	-,116(**) ,000	,239(**) ,000	-,261(**) ,000	-,290(**) ,000	-,257(**) ,000	-,483(**) ,000	,802(**) ,000	,886(**) ,000	,831(**) ,000
PAR _{außen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,872(**) ,000	-,165(**) ,000	,267(**) ,000	-,316(**) ,000	-,341(**) ,000	-,316(**) ,000	-,552(**) ,000	,835(**) ,000	,877(**) ,000	,804(**) ,000
Lufttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,709(**) ,000	-,172(**) ,000	,097(**) ,000	-,597(**) ,000	-,582(**) ,000	-,460(**) ,000	-,280(**) ,000	,738(**) ,000	,730(**) ,000	,695(**) ,000
Blatttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,741(**) ,000	-,175(**) ,000	,114(**) ,000	-,586(**) ,000	-,574(**) ,000	-,460(**) ,000	-,312(**) ,000	,774(**) ,000	,763(**) ,000	,720(**) ,000
Stomatäre Leitfähigkeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,311(**) ,000	,106(**) ,000	-,039(*) ,019	,391(**) ,000	,399(**) ,000	,301(**) ,000	,070(**) ,000	-,397(**) ,000	-,337(**) ,000	-,294(**) ,000
Transpirations- rate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,200(**) ,000	-,012 ,452	,019 ,244	,019 ,259	,023 ,165	,025 ,134	-,047(**) ,004	,102(**) ,000	,184(**) ,000	,202(**) ,000
Photosynthese- rate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,330(**) ,000	,219(**) ,000	,064(**) ,000	,168(**) ,000	,219(**) ,000	,233(**) ,000	-,337(**) ,000	,128(**) ,000	,282(**) ,000	,328(**) ,000
Photosynthe- seeffizienz	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,045(**) ,007	,112(**) ,000	,001 ,941	,044(**) ,008	,072(**) ,000	,085(**) ,000	-,150(**) ,000	-,005 ,748	,031 ,059	,051(**) ,002
CF	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	1 ,000	-,137(**) ,000	,204(**) ,000	-,277(**) ,000	-,323(**) ,000	-,281(**) ,000	-,286(**) ,000	,874(**) ,000	,990(**) ,000	,963(**) ,000
REIP	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,137(**) ,000	1 ,000	-,749(**) ,000	,345(**) ,000	,681(**) ,000	,869(**) ,000	-,105(**) ,000	-,399(**) ,000	-,228(**) ,000	,040(*) ,014
PRI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,204(**) ,000	-,749(**) ,000	1 ,000	-,118(**) ,000	-,394(**) ,000	-,538(**) ,000	-,071(**) ,000	,290(**) ,000	,244(**) ,000	-,018 ,283
RG-Ratio	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,277(**) ,000	,345(**) ,000	-,118(**) ,000	1 ,000	,884(**) ,000	,643(**) ,000	-,026 ,113	-,498(**) ,000	-,328(**) ,000	-,276(**) ,000
RVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,323(**) ,000	,681(**) ,000	-,394(**) ,000	,884(**) ,000	1 ,000	,884(**) ,000	-,040(*) ,015	-,585(**) ,000	-,400(**) ,000	-,247(**) ,000

Tabelle 42. Korrelationen zwischen den Einzelwerten von EC-Stadium, Variante, Applikationstermin, Tageszeit, Globalstrahlung, CF, REIP, PRI, RG-Ratio, RVI, GNDVI, FQA, CF/RVI, CF/GNDVI und CF/PRI bei *Hordeum vulgare* 'Duet' im Timingversuch (2004) mit N = 4214 (Teilstück links)

		EC-Stadium	Variante	Applikations-termin	Tageszeit	Globalstrahlung	CF	REIP	PRI	RG-Ratio	RVI
EC-Stadium	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	1	,001 ,929	,002 ,903	,076(**) ,000	,084(**) ,000	-,032(*) ,040	-,692(**) ,000	,297(**) ,000	-,790(**) ,000	-,803(**) ,000
Variante	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,001 ,929	1	,508(**) ,000	,011 ,464	-,011 ,459	,088(**) ,000	,107(**) ,000	-,051(**) ,001	,046(**) ,003	,059(**) ,000
Applikationstermin	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,002 ,903	,508(**) ,000	1	,014 ,375	-,011 ,471	,050(**) ,001	,050(**) ,001	-,050(**) ,001	,032(*) ,038	,028 ,072
Tageszeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,076(**) ,000	,011 ,464	,014 ,375	1	-,370(**) ,000	,114(**) ,000	-,075(**) ,000	-,046(**) ,003	-,076(**) ,000	-,105(**) ,000
Globalstrahlung	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,084(**) ,000	-,011 ,459	-,011 ,471	-,370(**) ,000	1	,673(**) ,000	,077(**) ,000	-,103(**) ,000	-,042(**) ,006	,009 ,581
CF	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,032(*) ,040	,088(**) ,000	,050(**) ,001	,114(**) ,000	,673(**) ,000	1	,121(**) ,000	-,173(**) ,000	-,004 ,812	,045(**) ,003
REIP	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,692(**) ,000	,107(**) ,000	,050(**) ,001	-,075(**) ,000	,077(**) ,000	,121(**) ,000	1	-,673(**) ,000	,648(**) ,000	,898(**) ,000
PRI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,297(**) ,000	-,051(**) ,001	-,050(**) ,001	-,046(**) ,003	-,103(**) ,000	-,173(**) ,000	-,673(**) ,000	1	-,108(**) ,000	-,486(**) ,000
RG-Ratio	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,790(**) ,000	,046(**) ,003	,032(*) ,038	-,076(**) ,000	-,042(**) ,006	-,004 ,812	,648(**) ,000	-,108(**) ,000	1	,866(**) ,000
RVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,803(**) ,000	,059(**) ,000	,028 ,072	-,105(**) ,000	,009 ,581	,045(**) ,003	,898(**) ,000	-,486(**) ,000	,866(**) ,000	1
GNDVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,754(**) ,000	,057(**) ,000	,031(*) ,045	-,098(**) ,000	,062(**) ,000	,103(**) ,000	,966(**) ,000	-,566(**) ,000	,770(**) ,000	,941(**) ,000
FQA	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,018 ,241	,107(**) ,000	,064(**) ,000	,677(**) ,000	-,364(**) ,000	,369(**) ,000	-,070(**) ,000	-,038(*) ,013	-,077(**) ,000	-,081(**) ,000
CF/RVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,634(**) ,000	,016 ,300	,014 ,374	,137(**) ,000	,409(**) ,000	,487(**) ,000	-,668(**) ,000	,253(**) ,000	-,694(**) ,000	-,728(**) ,000
CF/GNDVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,175(**) ,000	,077(**) ,000	,048(**) ,002	,140(**) ,000	,667(**) ,000	,958(**) ,000	-,135(**) ,000	-,030 ,051	-,205(**) ,000	-,200(**) ,000
CF/PRI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,144(**) ,000	,090(**) ,000	,054(**) ,000	,101(**) ,000	,610(**) ,000	,939(**) ,000	,325(**) ,000	-,458(**) ,000	,036(*) ,018	,203(**) ,000

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Fortsetzung Tabelle 42. (Teilstück rechts)

		GNDVI	FQA	CF/RVI	CF/GNDVI	CF/PRI
EC-Stadium	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,754(**) ,000	,018 ,241	,634(**) ,000	,175(**) ,000	-,144(**) ,000
Variante	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,057(**) ,000	,107(**) ,000	,016 ,300	,077(**) ,000	,090(**) ,000
Applikationstermin	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,031(*) ,045	,064(**) ,000	,014 ,374	,048(**) ,002	,054(**) ,000
Tageszeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,098(**) ,000	,677(**) ,000	,137(**) ,000	,140(**) ,000	,101(**) ,000
Globalstrahlung	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,062(**) ,000	-,364(**) ,000	,409(**) ,000	,667(**) ,000	,610(**) ,000
CF	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,103(**) ,000	,369(**) ,000	,487(**) ,000	,958(**) ,000	,939(**) ,000
REIP	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,966(**) ,000	-,070(**) ,000	-,668(**) ,000	-,135(**) ,000	,325(**) ,000
PRI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,566(**) ,000	-,038(*) ,013	,253(**) ,000	-,030 ,051	-,458(**) ,000
RG-Ratio	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,770(**) ,000	-,077(**) ,000	-,694(**) ,000	-,205(**) ,000	,036(*) ,018
RVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,941(**) ,000	-,081(**) ,000	-,728(**) ,000	-,200(**) ,000	,203(**) ,000
GNDVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	1 ,000	-,074(**) ,000	-,744(**) ,000	-,167(**) ,000	,281(**) ,000
FQA	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,074(**) ,000	1 ,000	,181(**) ,000	,356(**) ,000	,354(**) ,000
CF/RVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,744(**) ,000	,181(**) ,000	1 ,000	,713(**) ,000	,320(**) ,000
CF/GNDVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,167(**) ,000	,356(**) ,000	,713(**) ,000	1 ,000	,844(**) ,000
CF/PRI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,281(**) ,000	,354(**) ,000	,320(**) ,000	,844(**) ,000	1 ,000

Tabelle 43. Korrelationen zwischen den Einzelwerten von Variante, PAR (innen und außen), Luft- und Blatttemperatur, stomatärer Leitfähigkeit, Transpirationsrate, Photosyntheserate und -effizienz, CF, REIP, PRI, RG-Ratio, RVI, GNDVI, FQA, CF/RVI, CF/GNDVI und CF/PRI bei *Rheum rhabarbarum* (2003) mit N = 1000 (Teilstück links oben)

		Variante	Tageszeit	PAR _{innen}	PAR _{außen}	Lufttemperatur	Blatttemperatur	Stomatäre Leitfähigkeit	Transpirationsrate	Photosyntheserate	Photosyntheseeffizienz
Variante	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	1	,006 ,848	-,080(*) ,011	,029 ,365	-,064(*) ,042	,011 ,733	-,620(**) ,000	-,608(**) ,000	-,310(**) ,000	-,144(**) ,000
Tageszeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,006 ,848	1	-,710(**) ,000	-,676(**) ,000	,122(**) ,000	,025 ,427	-,389(**) ,000	-,362(**) ,000	-,635(**) ,000	,654(**) ,000
PAR _{innen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,080(*) ,011	-,710(**) ,000	1	,985(**) ,000	,420(**) ,000	,501(**) ,000	,083(**) ,008	,476(**) ,000	,862(**) ,000	-,742(**) ,000
PAR _{außen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,029 ,365	-,676(**) ,000	,985(**) ,000	1	,454(**) ,000	,544(**) ,000	-,044 ,164	,374(**) ,000	,806(**) ,000	-,764(**) ,000
Lufttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,064(*) ,042	,122(**) ,000	,420(**) ,000	,454(**) ,000	1	,989(**) ,000	-,406(**) ,000	,391(**) ,000	,463(**) ,000	-,115(**) ,000
Blatttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,011 ,733	,025 ,427	,501(**) ,000	,544(**) ,000	,989(**) ,000	1	-,449(**) ,000	,351(**) ,000	,499(**) ,000	-,210(**) ,000
Stomatäre Leitfähigkeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,620(**) ,000	-,389(**) ,000	,083(**) ,008	-,044 ,164	-,406(**) ,000	-,449(**) ,000	1	,648(**) ,000	,325(**) ,000	,054 ,085
Transpirationsrate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,608(**) ,000	-,362(**) ,000	,476(**) ,000	,374(**) ,000	,391(**) ,000	,351(**) ,000	,648(**) ,000	1	,763(**) ,000	-,070(*) ,026
Photosyntheserate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,310(**) ,000	-,635(**) ,000	,862(**) ,000	,806(**) ,000	,463(**) ,000	,499(**) ,000	,325(**) ,000	,763(**) ,000	1	-,402(**) ,000
Photosyntheseeffizienz	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,144(**) ,000	,654(**) ,000	-,742(**) ,000	-,764(**) ,000	-,115(**) ,000	-,210(**) ,000	,054 ,085	-,070(*) ,026	-,402(**) ,000	1
CF	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,034 ,280	-,701(**) ,000	,978(**) ,000	,986(**) ,000	,414(**) ,000	,504(**) ,000	,011 ,736	,392(**) ,000	,813(**) ,000	-,752(**) ,000
REIP	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,141(**) ,000	,161(**) ,000	-,291(**) ,000	-,325(**) ,000	-,226(**) ,000	-,256(**) ,000	,332(**) ,000	,100(**) ,002	-,077(*) ,015	,400(**) ,000
PRI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,451(**) ,000	-,562(**) ,000	,823(**) ,000	,786(**) ,000	,514(**) ,000	,547(**) ,000	,219(**) ,000	,653(**) ,000	,804(**) ,000	-,534(**) ,000
RG-Ratio	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,770(**) ,000	-,365(**) ,000	,235(**) ,000	,132(**) ,000	-,040 ,202	-,063(*) ,045	,574(**) ,000	,487(**) ,000	,365(**) ,000	-,037 ,242
RVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,671(**) ,000	-,526(**) ,000	,302(**) ,000	,192(**) ,000	-,196(**) ,000	-,194(**) ,000	,725(**) ,000	,533(**) ,000	,480(**) ,000	-,072(*) ,022

Fortsetzung Tabelle 43. (Teilstück rechts oben)

		CF	REIP	PRI	RG-Ratio	RVI	GNDVI	FQA	CF/RVI	CF/GNDVI	CF/PRI
Variante	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,034 ,280	-,141(**) ,000	-,451(**) ,000	-,770(**) ,000	-,671(**) ,000	-,496(**) ,000	-,448(**) ,000	,122(**) ,000	,002 ,945	,047 ,135
Tageszeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,701(**) ,000	,161(**) ,000	-,562(**) ,000	-,365(**) ,000	-,526(**) ,000	-,567(**) ,000	-,430(**) ,000	-,620(**) ,000	-,682(**) ,000	-,735(**) ,000
PAR _{innen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,978(**) ,000	-,291(**) ,000	,823(**) ,000	,235(**) ,000	,302(**) ,000	,319(**) ,000	,246(**) ,000	,937(**) ,000	,973(**) ,000	,962(**) ,000
PAR _{außen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,986(**) ,000	-,325(**) ,000	,786(**) ,000	,132(**) ,000	,192(**) ,000	,220(**) ,000	,203(**) ,000	,974(**) ,000	,988(**) ,000	,979(**) ,000
Lufttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,414(**) ,000	-,226(**) ,000	,514(**) ,000	-,040 ,202	-,196(**) ,000	-,226(**) ,000	-,110(**) ,000	,463(**) ,000	,433(**) ,000	,355(**) ,000
Blatttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,504(**) ,000	-,256(**) ,000	,547(**) ,000	-,063(*) ,045	-,194(**) ,000	-,209(**) ,000	-,086(**) ,007	,560(**) ,000	,525(**) ,000	,456(**) ,000
Stomatäre Leitfähigkeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,011 ,736	,332(**) ,000	,219(**) ,000	,574(**) ,000	,725(**) ,000	,697(**) ,000	,355(**) ,000	-,177(**) ,000	-,040 ,207	-,019 ,548
Transpirations- rate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,392(**) ,000	,100(**) ,002	,653(**) ,000	,487(**) ,000	,533(**) ,000	,511(**) ,000	,237(**) ,000	,252(**) ,000	,359(**) ,000	,318(**) ,000
Photosynthese- rate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,813(**) ,000	-,077(*) ,015	,804(**) ,000	,365(**) ,000	,480(**) ,000	,504(**) ,000	,283(**) ,000	,711(**) ,000	,790(**) ,000	,779(**) ,000
Photosynthe- seeffizienz	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,752(**) ,000	,400(**) ,000	-,534(**) ,000	-,037 ,242	-,072(*) ,022	-,088(**) ,005	-,126(**) ,000	-,764(**) ,000	-,760(**) ,000	-,771(**) ,000
CF	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	1	-,279(**) ,000	,813(**) ,000	,191(**) ,000	,270(**) ,000	,293(**) ,000	,348(**) ,000	,972(**) ,000	,998(**) ,000	,989(**) ,000
REIP	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,279(**) ,000	1	-,247(**) ,000	-,082(**) ,009	,365(**) ,000	,511(**) ,000	,068(*) ,031	-,410(**) ,000	-,323(**) ,000	-,293(**) ,000
PRI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,813(**) ,000	-,247(**) ,000	1	,466(**) ,000	,446(**) ,000	,406(**) ,000	,439(**) ,000	,741(**) ,000	,800(**) ,000	,737(**) ,000
RG-Ratio	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,191(**) ,000	-,082(**) ,009	,466(**) ,000	1	,830(**) ,000	,633(**) ,000	,577(**) ,000	,033 ,294	,158(**) ,000	,155(**) ,000
RVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,270(**) ,000	,365(**) ,000	,446(**) ,000	,830(**) ,000	1	,950(**) ,000	,614(**) ,000	,054 ,086	,215(**) ,000	,242(**) ,000

Tabelle 44. Korrelationen zwischen den Einzelwerten von EC-Stadium, Variante, PAR (innen und außen), Luft- und Blatttemperatur, stomatärer Leitfähigkeit, Transpirationsrate, Photosyntheserate und -effizienz, CF, REIP, PRI, RG-Ratio, RVI, GNDVI, FQA, CF/RVI, CF/GNDVI und CF/PRI bei *Triticale* 'Modus' (2003) mit N = 2100 (Teilstück links oben)

		EC-Stadium	Variante	Tageszeit	PAR _{innen}	PAR _{außen}	Lufttemperatur	Blatttemperatur	Stomatäre Leitfähigkeit	Transpirationsrate	Photosyntheserate	Photosyntheseeffizienz
EC-Stadium	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	1	,000 1,000	-,003 ,875	-,001 ,951	-,003 ,881	-,076(**) ,000	-,102(**) ,000	,466(**) ,000	,318(**) ,000	,336(**) ,000	,009 ,689
Variante	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,000 1,000	1	-,001 ,946	-,046(*) ,035	-,031 ,160	-,015 ,504	-,077(**) ,000	,353(**) ,000	,261(**) ,000	,090(**) ,000	-,037 ,093
Tageszeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,003 ,875	-,001 ,946	1	,100(**) ,000	,080(**) ,000	,595(**) ,000	,561(**) ,000	-,320(**) ,000	-,021 ,347	-,048(*) ,028	,041 ,058
PAR _{innen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,001 ,951	-,046(*) ,035	,100(**) ,000	1	,982(**) ,000	,783(**) ,000	,809(**) ,000	,014 ,526	,513(**) ,000	,551(**) ,000	-,032 ,143
PAR _{außen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,003 ,881	-,031 ,160	,080(**) ,000	,982(**) ,000	1	,786(**) ,000	,813(**) ,000	,025 ,245	,523(**) ,000	,557(**) ,000	-,033 ,135
Lufttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,076(**) ,000	-,015 ,504	,595(**) ,000	,783(**) ,000	,786(**) ,000	1	,990(**) ,000	-,211(**) ,000	,379(**) ,000	,352(**) ,000	-,004 ,842
Blatttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,102(**) ,000	-,077(**) ,000	,561(**) ,000	,809(**) ,000	,813(**) ,000	,990(**) ,000	1	-,293(**) ,000	,297(**) ,000	,312(**) ,000	-,002 ,925
Stomatäre Leitfähigkeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,466(**) ,000	,353(**) ,000	-,320(**) ,000	,014 ,526	,025 ,245	-,211(**) ,000	-,293(**) ,000	1	,757(**) ,000	,600(**) ,000	-,037 ,092
Transpirationsrate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,318(**) ,000	,261(**) ,000	-,021 ,347	,513(**) ,000	,523(**) ,000	,379(**) ,000	,297(**) ,000	,757(**) ,000	1	,823(**) ,000	-,046(*) ,034
Photosyntheserate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,336(**) ,000	,090(**) ,000	-,048(*) ,028	,551(**) ,000	,557(**) ,000	,352(**) ,000	,312(**) ,000	,600(**) ,000	,823(**) ,000	1	-,036 ,103
Photosyntheseeffizienz	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,009 ,689	-,037 ,093	,041 ,058	-,032 ,143	-,033 ,135	-,004 ,842	-,002 ,925	-,037 ,092	-,046(*) ,034	-,036 ,103	1
CF	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,117(**) ,000	-,106(**) ,000	,131(**) ,000	,914(**) ,000	,927(**) ,000	,780(**) ,000	,798(**) ,000	,053(*) ,014	,536(**) ,000	,579(**) ,000	-,033 ,126
REIP	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,427(**) ,000	-,220(**) ,000	,617(**) ,000	-,087(**) ,000	-,093(**) ,000	,221(**) ,000	,172(**) ,000	,111(**) ,000	,199(**) ,000	,185(**) ,000	,027 ,222
PRI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,378(**) ,000	-,068(**) ,002	-,126(**) ,000	,302(**) ,000	,281(**) ,000	,153(**) ,000	,216(**) ,000	-,475(**) ,000	-,226(**) ,000	-,200(**) ,000	-,005 ,806
RG-Ratio	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,290(**) ,000	-,144(**) ,000	,411(**) ,000	-,162(**) ,000	-,170(**) ,000	,121(**) ,000	,103(**) ,000	-,278(**) ,000	-,177(**) ,000	-,064(**) ,003	,043(*) ,047
RVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,112(**) ,000	-,250(**) ,000	,575(**) ,000	-,199(**) ,000	-,205(**) ,000	,167(**) ,000	,135(**) ,000	-,209(**) ,000	-,099(**) ,000	-,028 ,197	,049(*) ,025

Fortsetzung Tabelle 44. (Teilstück rechts oben)

		CF	REIP	PRI	RG-Ratio	RVI	GNDVI	FQA	CF/RVI	CF/GNDVI	CF/PRI
EC-Stadium	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,117(**) ,000	,427(**) ,000	-,378(**) ,000	-,290(**) ,000	-,112(**) ,000	,054(*) ,014	,205(**) ,000	,090(**) ,000	,103(**) ,000	,236(**) ,000
Variante	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,106(**) ,000	-,220(**) ,000	-,068(**) ,002	-,144(**) ,000	-,250(**) ,000	-,340(**) ,000	-,272(**) ,000	-,049(*) ,026	-,094(**) ,000	-,077(**) ,000
Tageszeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,131(**) ,000	,617(**) ,000	-,126(**) ,000	,411(**) ,000	,575(**) ,000	,607(**) ,000	,115(**) ,000	,026 ,229	,109(**) ,000	,147(**) ,000
PAR _{innen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,914(**) ,000	-,087(**) ,000	,302(**) ,000	-,162(**) ,000	-,199(**) ,000	-,058(**) ,008	-,370(**) ,000	,912(**) ,000	,920(**) ,000	,867(**) ,000
PAR _{außen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,927(**) ,000	-,093(**) ,000	,281(**) ,000	-,170(**) ,000	-,205(**) ,000	-,064(**) ,003	-,376(**) ,000	,936(**) ,000	,935(**) ,000	,884(**) ,000
Lufttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,780(**) ,000	,221(**) ,000	,153(**) ,000	,121(**) ,000	,167(**) ,000	,281(**) ,000	-,174(**) ,000	,730(**) ,000	,776(**) ,000	,752(**) ,000
Blatttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,798(**) ,000	,172(**) ,000	,216(**) ,000	,103(**) ,000	,135(**) ,000	,249(**) ,000	-,202(**) ,000	,757(**) ,000	,797(**) ,000	,756(**) ,000
Stomatäre Leitfähigkeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,053(*) ,014	,111(**) ,000	-,475(**) ,000	-,278(**) ,000	-,209(**) ,000	-,156(**) ,000	,007 ,756	,059(**) ,006	,047(*) ,030	,175(**) ,000
Transpirations- rate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,536(**) ,000	,199(**) ,000	-,226(**) ,000	-,177(**) ,000	-,099(**) ,000	,049(*) ,026	-,086(**) ,000	,516(**) ,000	,529(**) ,000	,613(**) ,000
Photosynthese- rate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,579(**) ,000	,185(**) ,000	-,200(**) ,000	-,064(**) ,003	-,028 ,197	,095(**) ,000	-,122(**) ,000	,530(**) ,000	,571(**) ,000	,651(**) ,000
Photosynthese- seeffizienz	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,033 ,126	,027 ,222	-,005 ,806	,043(*) ,047	,049(*) ,025	,037 ,092	-,011 ,624	-,036 ,099	-,034 ,118	-,033 ,127
CF	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	1	,050(*) ,021	,197(**) ,000	-,073(**) ,001	-,075(**) ,001	,077(**) ,000	-,052(*) ,017	,951(**) ,000	,999(**) ,000	,977(**) ,000
REIP	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,050(*) ,021	1	-,461(**) ,000	,322(**) ,000	,665(**) ,000	,841(**) ,000	,399(**) ,000	-,115(**) ,000	,008 ,722	,157(**) ,000
PRI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,197(**) ,000	-,461(**) ,000	1	-,087(**) ,000	-,237(**) ,000	-,230(**) ,000	-,153(**) ,000	,231(**) ,000	,215(**) ,000	,008 ,701
RG-Ratio	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,073(**) ,001	,322(**) ,000	-,087(**) ,000	1	,906(**) ,000	,705(**) ,000	,202(**) ,000	-,291(**) ,000	-,099(**) ,000	-,084(**) ,000
RVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,075(**) ,001	,665(**) ,000	-,237(**) ,000	,906(**) ,000	1	,916(**) ,000	,349(**) ,000	-,309(**) ,000	-,114(**) ,000	-,047(*) ,030

Fortsetzung Tabelle 44. (Teilstück links unten)

		EC-Stadium	Variante	Tageszeit	PAR _{innen}	PAR _{außen}	Lufttemperatur	Blatttemperatur	Stomatäre Leitfähigkeit	Transpirationsrate	Photosyntheserate	Photosyntheseeffizienz
GNDVI	Korrelation nach Pearson	,054(*)	-,340(**)	,607(**)	-,058(**)	-,064(**)	,281(**)	,249(**)	-,156(**)	,049(*)	,095(**)	,037
	Signifikanz (2-seitig)	,014	,000	,000	,008	,003	,000	,000	,000	,026	,000	,092
FQA	Korrelation nach Pearson	,205(**)	-,272(**)	,115(**)	-,370(**)	-,376(**)	-,174(**)	-,202(**)	,007	-,086(**)	-,122(**)	-,011
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,756	,000	,000	,624
CF/RVI	Korrelation nach Pearson	,090(**)	-,049(*)	,026	,912(**)	,936(**)	,730(**)	,757(**)	,059(**)	,516(**)	,530(**)	-,036
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,026	,229	,000	,000	,000	,000	,006	,000	,000	,099
CF/GNDVI	Korrelation nach Pearson	,103(**)	-,094(**)	,109(**)	,920(**)	,935(**)	,776(**)	,797(**)	,047(*)	,529(**)	,571(**)	-,034
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,030	,000	,000	,118
CF/PRI	Korrelation nach Pearson	,236(**)	-,077(**)	,147(**)	,867(**)	,884(**)	,752(**)	,756(**)	,175(**)	,613(**)	,651(**)	-,033
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,127

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Fortsetzung Tabelle 44. (Teilstück rechts unten)

		CF	REIP	PRI	RG-Ratio	RVI	GNDVI	FQA	CF/RVI	CF/GNDVI	CF/PRI
GNDVI	Korrelation nach Pearson	,077(**)	,841(**)	-,230(**)	,705(**)	,916(**)	1	,391(**)	-,156(**)	,033	,126(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,133	,000
FQA	Korrelation nach Pearson	-,052(*)	,399(**)	-,153(**)	,202(**)	,349(**)	,391(**)	1	-,177(**)	-,076(**)	-,014
	Signifikanz (2-seitig)	,017	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,532
CF/RVI	Korrelation nach Pearson	,951(**)	-,115(**)	,231(**)	-,291(**)	-,309(**)	-,156(**)	-,177(**)	1	,965(**)	,918(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
CF/GNDVI	Korrelation nach Pearson	,999(**)	,008	,215(**)	-,099(**)	-,114(**)	,033	-,076(**)	,965(**)	1	,971(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,722	,000	,000	,000	,133	,000	,000	,000	,000
CF/PRI	Korrelation nach Pearson	,977(**)	,157(**)	,008	-,084(**)	-,047(*)	,126(**)	-,014	,918(**)	,971(**)	1
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,701	,000	,030	,000	,532	,000	,000	,000

Tabelle 45. Korrelationen zwischen den Einzelwerten von Variante, PAR (innen und außen), Luft- und Blatttemperatur, stomatärer Leitfähigkeit, Transpirationsrate, Photosyntheserate und -effizienz, CF, REIP, PRI, GR-Ratio, RVI, GNDVI, FQA, CF/RVI, CF/GNDVI und CF/PRI bei der Sommerweizensorte 'Triso' (2003) mit N = 300 (Teilstück links oben)

		Variante	Tageszeit	PAR _{innen}	PAR _{außen}	Lufttemperatur	Blatttemperatur	Stomatäre Leitfähigkeit	Transpirationsrate	Photosyntheserate	Photosyntheseeffizienz
Variante	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	1	,000 1,000	-,023 ,695	,065 ,259	,035 ,540	-,002 ,971	,101 ,082	,042 ,468	-,102 ,078	,123(*) ,033
Tageszeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,000 1,000	1	-,105 ,070	-,090 ,118	,868(**) ,000	,817(**) ,000	-,670(**) ,000	-,336(**) ,000	-,208(**) ,000	-,342(**) ,000
PAR _{innen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,023 ,695	-,105 ,070	1	,939(**) ,000	,225(**) ,000	,417(**) ,000	,076 ,188	,476(**) ,000	,813(**) ,000	-,076 ,192
PAR _{außen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,065 ,259	-,090 ,118	,939(**) ,000	1	,247(**) ,000	,442(**) ,000	,097 ,094	,499(**) ,000	,811(**) ,000	,052 ,366
Lufttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,035 ,540	,868(**) ,000	,225(**) ,000	,247(**) ,000	1	,937(**) ,000	-,513(**) ,000	-,017 ,770	,100 ,085	-,363(**) ,000
Blatttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,002 ,971	,817(**) ,000	,417(**) ,000	,442(**) ,000	,937(**) ,000	1	-,605(**) ,000	-,061 ,292	,204(**) ,000	-,362(**) ,000
Stomatäre Leitfähigkeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,101 ,082	-,670(**) ,000	,076 ,188	,097 ,094	-,513(**) ,000	-,605(**) ,000	1	,793(**) ,000	,448(**) ,000	,567(**) ,000
Transpirationsrate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,042 ,468	-,336(**) ,000	,476(**) ,000	,499(**) ,000	-,017 ,770	-,061 ,292	,793(**) ,000	1	,792(**) ,000	,499(**) ,000
Photosyntheserate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,102 ,078	-,208(**) ,000	,813(**) ,000	,811(**) ,000	,100 ,085	,204(**) ,000	,448(**) ,000	,792(**) ,000	1	,280(**) ,000
Photosyntheseeffizienz	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,123(*) ,033	-,342(**) ,000	-,076 ,192	,052 ,366	-,363(**) ,000	-,362(**) ,000	,567(**) ,000	,499(**) ,000	,280(**) ,000	1
CF	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,209(**) ,000	-,371(**) ,000	,854(**) ,000	,892(**) ,000	-,023 ,685	,155(**) ,007	,255(**) ,000	,483(**) ,000	,730(**) ,000	,076 ,191
REIP	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,819(**) ,000	,041 ,478	-,399(**) ,000	-,320(**) ,000	-,097 ,094	-,180(**) ,002	,015 ,790	-,192(**) ,001	-,408(**) ,000	,136(*) ,019
PRI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,710(**) ,000	,056 ,333	,271(**) ,000	,196(**) ,001	,106 ,068	,181(**) ,002	-,131(*) ,023	,036 ,537	,251(**) ,000	-,114(*) ,048
GR-Ratio	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,703(**) ,000	,059 ,305	-,477(**) ,000	-,382(**) ,000	-,072 ,212	-,195(**) ,001	,070 ,227	-,139(*) ,016	-,438(**) ,000	,146(*) ,011
RVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,759(**) ,000	,039 ,501	-,474(**) ,000	-,380(**) ,000	-,108 ,063	-,220(**) ,000	,068 ,239	-,150(**) ,009	-,436(**) ,000	,188(**) ,001

Fortsetzung Tabelle 45. (Teilstück rechts oben)

		CF	REIP	PRI	GR-Ratio	RVI	GNDVI	FQA	CF/RVI	CF/GNDVI	CF/PRI
Variante	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,209(**) ,000	,819(**) ,000	-,710(**) ,000	,703(**) ,000	,759(**) ,000	,773(**) ,000	,110 ,056	-,160(**) ,006	,120(*) ,037	,395(**) ,000
Tageszeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,371(**) ,000	,041 ,478	,056 ,333	,059 ,305	,039 ,501	-,001 ,993	-,703(**) ,000	-,299(**) ,000	-,360(**) ,000	-,368(**) ,000
PAR _{innen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,854(**) ,000	-,399(**) ,000	,271(**) ,000	-,477(**) ,000	-,474(**) ,000	-,466(**) ,000	-,152(**) ,009	,905(**) ,000	,887(**) ,000	,737(**) ,000
PAR _{außen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,892(**) ,000	-,320(**) ,000	,196(**) ,001	-,382(**) ,000	-,380(**) ,000	-,384(**) ,000	-,212(**) ,000	,897(**) ,000	,915(**) ,000	,795(**) ,000
Lufttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,023 ,685	-,097 ,094	,106 ,068	-,072 ,212	-,108 ,063	-,152(**) ,008	-,615(**) ,000	,046 ,423	-,003 ,953	-,049 ,397
Blatttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,155(**) ,007	-,180(**) ,002	,181(**) ,002	-,195(**) ,001	-,220(**) ,000	-,251(**) ,000	-,652(**) ,000	,232(**) ,000	,180(**) ,002	,100 ,083
Stomatäre Leitfähigkeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,255(**) ,000	,015 ,790	-,131(*) ,023	,070 ,227	,068 ,239	,069 ,235	,429(**) ,000	,193(**) ,001	,247(**) ,000	,276(**) ,000
Transpirations- rate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,483(**) ,000	-,192(**) ,001	,036 ,537	-,139(*) ,016	-,150(**) ,009	-,180(**) ,002	,090 ,120	,506(**) ,000	,502(**) ,000	,440(**) ,000
Photosynthese- rate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,730(**) ,000	-,408(**) ,000	,251(**) ,000	-,438(**) ,000	-,436(**) ,000	-,448(**) ,000	-,132(*) ,022	,817(**) ,000	,770(**) ,000	,621(**) ,000
Photosynthese- seeffizienz	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,076 ,191	,136(*) ,019	-,114(*) ,048	,146(*) ,011	,188(**) ,001	,180(**) ,002	,071 ,219	,053 ,364	,072 ,216	,075 ,198
CF	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	1	-,134(*) ,020	,001 ,980	-,244(**) ,000	-,218(**) ,000	-,182(**) ,002	,168(**) ,003	,882(**) ,000	,993(**) ,000	,960(**) ,000
REIP	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,134(*) ,020	1	-,781(**) ,000	,819(**) ,000	,941(**) ,000	,964(**) ,000	,175(**) ,002	-,509(**) ,000	-,236(**) ,000	,093 ,107
PRI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,001 ,980	-,781(**) ,000	1	-,836(**) ,000	-,806(**) ,000	-,784(**) ,000	-,225(**) ,000	,383(**) ,000	,096 ,097	-,252(**) ,000
GR-Ratio	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,244(**) ,000	,819(**) ,000	-,836(**) ,000	1	,941(**) ,000	,880(**) ,000	,130(*) ,024	-,608(**) ,000	-,336(**) ,000	-,018 ,753
RVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,218(**) ,000	,941(**) ,000	-,806(**) ,000	,941(**) ,000	1	,971(**) ,000	,170(**) ,003	-,586(**) ,000	-,316(**) ,000	,011 ,847

Fortsetzung Tabelle 45. (Teilstück links unten)

		Variante	Tageszeit	PAR _{innen}	PAR _{außen}	Lufttemperatur	Blatttemperatur	Stomatäre Leitfähigkeit	Transpirationsrate	Photosyntheserate	Photosyntheseeffizienz
GNDVI	Korrelation nach Pearson	,773(**)	-,001	-,466(**)	-,384(**)	-,152(**)	-,251(**)	,069	-,180(**)	-,448(**)	,180(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,993	,000	,000	,008	,000	,235	,002	,000	,002
FQA	Korrelation nach Pearson	,110	-,703(**)	-,152(**)	-,212(**)	-,615(**)	-,652(**)	,429(**)	,090	-,132(*)	,071
	Signifikanz (2-seitig)	,056	,000	,009	,000	,000	,000	,000	,120	,022	,219
CF/RVI	Korrelation nach Pearson	-,160(**)	-,299(**)	,905(**)	,897(**)	,046	,232(**)	,193(**)	,506(**)	,817(**)	,053
	Signifikanz (2-seitig)	,006	,000	,000	,000	,423	,000	,001	,000	,000	,364
CF/GNDVI	Korrelation nach Pearson	,120(*)	-,360(**)	,887(**)	,915(**)	-,003	,180(**)	,247(**)	,502(**)	,770(**)	,072
	Signifikanz (2-seitig)	,037	,000	,000	,000	,953	,002	,000	,000	,000	,216
CF/PRI	Korrelation nach Pearson	,395(**)	-,368(**)	,737(**)	,795(**)	-,049	,100	,276(**)	,440(**)	,621(**)	,075
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,397	,083	,000	,000	,000	,198

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Fortsetzung Tabelle 45. (Teilstück rechts unten)

		CF	REIP	PRI	GR-Ratio	RVI	GNDVI	FQA	CF/RVI	CF/GNDVI	CF/PRI
GNDVI	Korrelation nach Pearson	-,182(**)	,964(**)	-,784(**)	,880(**)	,971(**)	1	,241(**)	-,579(**)	-,288(**)	,052
	Signifikanz (2-seitig)	,002	,000	,000	,000	,000		,000	,000	,000	,373
FQA	Korrelation nach Pearson	,168(**)	,175(**)	-,225(**)	,130(*)	,170(**)	,241(**)	1	,006	,129(*)	,239(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,003	,002	,000	,024	,003	,000		,922	,026	,000
CF/RVI	Korrelation nach Pearson	,882(**)	-,509(**)	,383(**)	-,608(**)	-,586(**)	-,579(**)	,006	1	,931(**)	,729(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,922		,000	,000
CF/GNDVI	Korrelation nach Pearson	,993(**)	-,236(**)	,096	-,336(**)	-,316(**)	-,288(**)	,129(*)	,931(**)	1	,923(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,097	,000	,000	,000	,026	,000		,000
CF/PRI	Korrelation nach Pearson	,960(**)	,093	-,252(**)	-,018	,011	,052	,239(**)	,729(**)	,923(**)	1
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,107	,000	,753	,847	,373	,000	,000	,000	

Tabelle 46. Korrelationen zwischen den Einzelwerten von EC-Stadium, Variante, PAR (innen und außen), Luft- und Blatttemperatur, stomatärer Leitfähigkeit, Transpirationsrate, Photosyntheserate und -effizienz, CF, REIP, PRI, GR-Ratio, RVI, GNDVI, FQA, CF/RVI, CF/GNDVI und CF/PRI bei der Winterweizensorte 'Ludwig' (2003) mit N = 800 (Teilstück links oben)

		EC-Stadium	Variante	Tageszeit	PAR _{innen}	PAR _{außen}	Lufttemperatur	Blatttemperatur	Stomatäre Leitfähigkeit	Transpirationsrate	Photosyntheserate	Photosyntheseeffizienz
EC-Stadium	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	1	,000 1,000	,117(**) ,001	-,293(**) ,000	-,319(**) ,000	-,049 ,169	-,147(**) ,000	,226(**) ,000	,595(**) ,000	,123(**) ,000	,341(**) ,000
Variante	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,000 1,000	1	-,007 ,835	,007 ,841	,063 ,074	-,021 ,545	,012 ,725	,147(**) ,000	-,065 ,067	-,018 ,620	-,059 ,096
Tageszeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,117(**) ,001	-,007 ,835	1	,073(*) ,038	,098(**) ,005	,811(**) ,000	,743(**) ,000	-,373(**) ,000	,050 ,158	-,054 ,129	,026 ,458
PAR _{innen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,293(**) ,000	,007 ,841	,073(*) ,038	1	,899(**) ,000	,533(**) ,000	,629(**) ,000	-,284(**) ,000	,156(**) ,000	,638(**) ,000	-,124(**) ,000
PAR _{außen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,319(**) ,000	,063 ,074	,098(**) ,005	,899(**) ,000	1	,586(**) ,000	,686(**) ,000	-,299(**) ,000	,200(**) ,000	,684(**) ,000	,005 ,880
Lufttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,049 ,169	-,021 ,545	,811(**) ,000	,533(**) ,000	,586(**) ,000	1	,984(**) ,000	-,437(**) ,000	,195(**) ,000	,326(**) ,000	,040 ,263
Blatttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,147(**) ,000	,012 ,725	,743(**) ,000	,629(**) ,000	,686(**) ,000	,984(**) ,000	1	-,487(**) ,000	,114(**) ,001	,355(**) ,000	-,002 ,958
Stomatäre Leitfähigkeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,226(**) ,000	,147(**) ,000	-,373(**) ,000	-,284(**) ,000	-,299(**) ,000	-,437(**) ,000	-,487(**) ,000	1	,412(**) ,000	-,022 ,529	,115(**) ,001
Transpirationsrate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,595(**) ,000	-,065 ,067	,050 ,158	,156(**) ,000	,200(**) ,000	,195(**) ,000	,114(**) ,001	,412(**) ,000	1	,655(**) ,000	,407(**) ,000
Photosyntheserate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,123(**) ,000	-,018 ,620	-,054 ,129	,638(**) ,000	,684(**) ,000	,326(**) ,000	,355(**) ,000	-,022 ,529	,655(**) ,000	1	,482(**) ,000
Photosyntheseeffizienz	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,341(**) ,000	-,059 ,096	,026 ,458	-,124(**) ,000	,005 ,880	,040 ,263	-,002 ,958	,115(**) ,001	,407(**) ,000	,482(**) ,000	1
CF	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,304(**) ,000	,461(**) ,000	,201(**) ,000	,770(**) ,000	,798(**) ,000	,568(**) ,000	,660(**) ,000	-,313(**) ,000	,006 ,868	,449(**) ,000	-,094(**) ,008
REIP	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,327(**) ,000	,713(**) ,000	,213(**) ,000	-,079(*) ,026	-,095(**) ,007	,127(**) ,000	,092(**) ,009	,176(**) ,000	,140(**) ,000	-,085(*) ,016	-,012 ,743
PRI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,660(**) ,000	-,245(**) ,000	,237(**) ,000	,294(**) ,000	,321(**) ,000	,326(**) ,000	,371(**) ,000	-,471(**) ,000	-,435(**) ,000	,029 ,416	-,137(**) ,000
GR-Ratio	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,170(**) ,000	,188(**) ,000	,577(**) ,000	,091(**) ,010	,037 ,298	,438(**) ,000	,409(**) ,000	-,397(**) ,000	-,268(**) ,000	-,095(**) ,007	-,085(*) ,016
RVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,026 ,469	,542(**) ,000	,532(**) ,000	,082(*) ,020	,056 ,115	,435(**) ,000	,408(**) ,000	-,252(**) ,000	-,121(**) ,001	-,066 ,060	-,066 ,063

Fortsetzung Tabelle 46. (Teilstück rechts oben)

		CF	REIP	PRI	GR-Ratio	RVI	GNDVI	FQA	CF/RVI	CF/GNDVI	CF/PRI
EC-Stadium	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,304(**) ,000	,327(**) ,000	-,660(**) ,000	-,170(**) ,000	,026 ,469	,172(**) ,000	-,013 ,714	-,348(**) ,000	-,330(**) ,000	-,104(**) ,003
Variante	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,461(**) ,000	,713(**) ,000	-,245(**) ,000	,188(**) ,000	,542(**) ,000	,662(**) ,000	,471(**) ,000	,100(**) ,005	,405(**) ,000	,553(**) ,000
Tageszeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,201(**) ,000	,213(**) ,000	,237(**) ,000	,577(**) ,000	,532(**) ,000	,397(**) ,000	,125(**) ,000	,039 ,275	,187(**) ,000	,158(**) ,000
PAR _{innen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,770(**) ,000	-,079(*) ,026	,294(**) ,000	,091(**) ,010	,082(*) ,020	,085(*) ,016	-,275(**) ,000	,822(**) ,000	,808(**) ,000	,700(**) ,000
PAR _{außen}	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,798(**) ,000	-,095(**) ,007	,321(**) ,000	,037 ,298	,056 ,115	,054 ,130	-,424(**) ,000	,904(**) ,000	,842(**) ,000	,726(**) ,000
Lufttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,568(**) ,000	,127(**) ,000	,326(**) ,000	,438(**) ,000	,435(**) ,000	,334(**) ,000	-,113(**) ,001	,475(**) ,000	,577(**) ,000	,501(**) ,000
Blatttemperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,660(**) ,000	,092(**) ,009	,371(**) ,000	,409(**) ,000	,408(**) ,000	,306(**) ,000	-,137(**) ,000	,586(**) ,000	,675(**) ,000	,580(**) ,000
Stomatäre Leitfähigkeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,313(**) ,000	,176(**) ,000	-,471(**) ,000	-,397(**) ,000	-,252(**) ,000	-,024 ,504	,128(**) ,000	-,216(**) ,000	-,318(**) ,000	-,210(**) ,000
Transpirations- rate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,006 ,868	,140(**) ,000	-,435(**) ,000	-,268(**) ,000	-,121(**) ,001	,048 ,171	-,266(**) ,000	,141(**) ,000	,020 ,571	,131(**) ,000
Photosynthese- rate	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,449(**) ,000	-,085(*) ,016	,029 ,416	-,095(**) ,007	-,066 ,060	-,033 ,355	-,365(**) ,000	,599(**) ,000	,488(**) ,000	,466(**) ,000
Photosynthese- seeffizienz	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,094(**) ,008	-,012 ,743	-,137(**) ,000	-,085(*) ,016	-,066 ,063	-,050 ,161	-,134(**) ,000	-,010 ,773	-,087(*) ,014	-,042 ,236
CF	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	1 ,000	,329(**) ,000	,242(**) ,000	,300(**) ,000	,462(**) ,000	,496(**) ,000	,061 ,085	,772(**) ,000	,994(**) ,000	,954(**) ,000
REIP	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,329(**) ,000	1 ,000	-,485(**) ,000	,270(**) ,000	,729(**) ,000	,918(**) ,000	,446(**) ,000	-,169(**) ,000	,246(**) ,000	,486(**) ,000
PRI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,242(**) ,000	-,485(**) ,000	1 ,000	,550(**) ,000	,138(**) ,000	-,170(**) ,000	-,014 ,688	,275(**) ,000	,279(**) ,000	-,026 ,466
GR-Ratio	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,300(**) ,000	,270(**) ,000	,550(**) ,000	1 ,000	,828(**) ,000	,576(**) ,000	,376(**) ,000	-,126(**) ,000	,261(**) ,000	,189(**) ,000
RVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,462(**) ,000	,729(**) ,000	,138(**) ,000	,828(**) ,000	1 ,000	,902(**) ,000	,458(**) ,000	-,107(**) ,002	,390(**) ,000	,464(**) ,000

Fortsetzung Tabelle 46. (Teilstück links unten)

		EC-Stadium	Variante	Tageszeit	PAR _{innen}	PAR _{außen}	Lufttemperatur	Blatttemperatur	Stomatäre Leitfähigkeit	Transpirationsrate	Photosyntheserate	Photosyntheseeffizienz
GNDVI	Korrelation nach Pearson	,172(**)	,662(**)	,397(**)	,085(*)	,054	,334(**)	,306(**)	-,024	,048	-,033	-,050
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,016	,130	,000	,000	,504	,171	,355	,161
FQA	Korrelation nach Pearson	-,013	,471(**)	,125(**)	-,275(**)	-,424(**)	-,113(**)	-,137(**)	,128(**)	-,266(**)	-,365(**)	-,134(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,714	,000	,000	,000	,000	,001	,000	,000	,000	,000	,000
CF/RVI	Korrelation nach Pearson	-,348(**)	,100(**)	,039	,822(**)	,904(**)	,475(**)	,586(**)	-,216(**)	,141(**)	,599(**)	-,010
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,005	,275	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,773
CF/GNDVI	Korrelation nach Pearson	-,330(**)	,405(**)	,187(**)	,808(**)	,842(**)	,577(**)	,675(**)	-,318(**)	,020	,488(**)	-,087(*)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,571	,000	,014
CF/PRI	Korrelation nach Pearson	-,104(**)	,553(**)	,158(**)	,700(**)	,726(**)	,501(**)	,580(**)	-,210(**)	,131(**)	,466(**)	-,042
	Signifikanz (2-seitig)	,003	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,236

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Fortsetzung Tabelle 46. (Teilstück rechts unten)

		CF	REIP	PRI	GR-Ratio	RVI	GNDVI	FQA	CF/RVI	CF/GNDVI	CF/PRI
GNDVI	Korrelation nach Pearson	,496(**)	,918(**)	-,170(**)	,576(**)	,902(**)	1	,465(**)	-,067	,417(**)	,571(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000		,000	,057	,000	,000
FQA	Korrelation nach Pearson	,061	,446(**)	-,014	,376(**)	,458(**)	,465(**)	1	-,236(**)	,015	,090(*)
	Signifikanz (2-seitig)	,085	,000	,688	,000	,000	,000		,000	,663	,011
CF/RVI	Korrelation nach Pearson	,772(**)	-,169(**)	,275(**)	-,126(**)	-,107(**)	-,067	-,236(**)	1	,831(**)	,708(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,002	,057	,000		,000	,000
CF/GNDVI	Korrelation nach Pearson	,994(**)	,246(**)	,279(**)	,261(**)	,390(**)	,417(**)	,015	,831(**)	1	,938(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,663	,000		,000
CF/PRI	Korrelation nach Pearson	,954(**)	,486(**)	-,026	,189(**)	,464(**)	,571(**)	,090(*)	,708(**)	,938(**)	1
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,466	,000	,000	,000	,011	,000	,000	

Tabelle 47. Korrelationen zwischen den Einzelwerten von EC-Stadium, Variante, Tageszeit, Globalstrahlung, CF, REIP, PRI, RG-Ratio, RVI, GNDVI, FQA, CF/RVI, CF/GNDVI und CF/PRI bei *Solanum tuberosum* 'Edelstein' im Timingversuch (2004) mit N = 1596 (Teilstück links)

		EC-Stadium	Variante	Tageszeit	Globalstrahlung	CF	REIP	PRI	RG-Ratio
EC-Stadium	Korrelation nach Pearson	1	,000	-,128(**)	-,047	-,149(**)	-,505(**)	,332(**)	-,453(**)
	Signifikanz (2-seitig)		1,000	,000	,061	,000	,000	,000	,000
Variante	Korrelation nach Pearson	,000	1	-,009	,009	,294(**)	,269(**)	-,286(**)	,212(**)
	Signifikanz (2-seitig)	1,000		,729	,719	,000	,000	,000	,000
Tageszeit	Korrelation nach Pearson	-,128(**)	-,009	1	-,373(**)	-,150(**)	,162(**)	-,119(**)	-,046
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,729		,000	,000	,000	,000	,064
Globalstrahlung	Korrelation nach Pearson	-,047	,009	-,373(**)	1	,546(**)	-,149(**)	,316(**)	,143(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,061	,719	,000		,000	,000	,000	,000
CF	Korrelation nach Pearson	-,149(**)	,294(**)	-,150(**)	,546(**)	1	,225(**)	,020	,392(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000		,000	,425	,000
REIP	Korrelation nach Pearson	-,505(**)	,269(**)	,162(**)	-,149(**)	,225(**)	1	-,838(**)	,178(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000		,000	,000
PRI	Korrelation nach Pearson	,332(**)	-,286(**)	-,119(**)	,316(**)	,020	-,838(**)	1	,007
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,425	,000		,785
RG-Ratio	Korrelation nach Pearson	-,453(**)	,212(**)	-,046	,143(**)	,392(**)	,178(**)	,007	1
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,064	,000	,000	,000	,785	
RVI	Korrelation nach Pearson	-,688(**)	,273(**)	,069(**)	,015	,399(**)	,749(**)	-,512(**)	,753(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,006	,550	,000	,000	,000	,000
GNDVI	Korrelation nach Pearson	-,594(**)	,295(**)	,097(**)	-,071(**)	,339(**)	,941(**)	-,760(**)	,435(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,005	,000	,000	,000	,000
FQA	Korrelation nach Pearson	-,056(*)	,303(**)	,266(**)	-,461(**)	,453(**)	,364(**)	-,295(**)	,262(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,026	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
CF/RVI	Korrelation nach Pearson	,445(**)	-,014	-,149(**)	,441(**)	,438(**)	-,443(**)	,417(**)	-,416(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,569	,000	,000	,000	,000	,000	,000
CF/GNDVI	Korrelation nach Pearson	-,016	,254(**)	-,174(**)	,587(**)	,976(**)	,022	,187(**)	,334(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,516	,000	,000	,000	,000	,376	,000	,000
CF/PRI	Korrelation nach Pearson	-,213(**)	,359(**)	-,094(**)	,360(**)	,852(**)	,490(**)	-,391(**)	,238(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Fortsetzung Tabelle 47. (Teilstück rechts)

		RVI	GNDVI	FQA	CF/RVI	CF/GNDVI	CF/PRI
EC-Stadium	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,688(**) ,000	-,594(**) ,000	-,056(*) ,026	,445(**) ,000	-,016 ,516	-,213(**) ,000
Variante	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,273(**) ,000	,295(**) ,000	,303(**) ,000	-,014 ,569	,254(**) ,000	,359(**) ,000
Tageszeit	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,069(**) ,006	,097(**) ,000	,266(**) ,000	-,149(**) ,000	-,174(**) ,000	-,094(**) ,000
Globalstrahlung	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,015 ,550	-,071(**) ,005	-,461(**) ,000	,441(**) ,000	,587(**) ,000	,360(**) ,000
CF	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,399(**) ,000	,339(**) ,000	,453(**) ,000	,438(**) ,000	,976(**) ,000	,852(**) ,000
REIP	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,749(**) ,000	,941(**) ,000	,364(**) ,000	-,443(**) ,000	,022 ,376	,490(**) ,000
PRI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,512(**) ,000	-,760(**) ,000	-,295(**) ,000	,417(**) ,000	,187(**) ,000	-,391(**) ,000
RG-Ratio	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,753(**) ,000	,435(**) ,000	,262(**) ,000	-,416(**) ,000	,334(**) ,000	,238(**) ,000
RVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	1 ,000	,893(**) ,000	,384(**) ,000	-,564(**) ,000	,225(**) ,000	,460(**) ,000
GNDVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,893(**) ,000	1	,400(**) ,000	-,536(**) ,000	,133(**) ,000	,514(**) ,000
FQA	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,384(**) ,000	,400(**) ,000	1	,007 ,785	,393(**) ,000	,494(**) ,000
CF/RVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	-,564(**) ,000	-,536(**) ,000	,007 ,785	1	,582(**) ,000	,372(**) ,000
CF/GNDVI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,225(**) ,000	,133(**) ,000	,393(**) ,000	,582(**) ,000	1	,782(**) ,000
CF/PRI	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,460(**) ,000	,514(**) ,000	,494(**) ,000	,372(**) ,000	,782(**) ,000	1

Tabelle 48. Tabellarische Aufstellung über die relativen Tendenzen der einzelnen Faktoren, während der größten Ausprägung der Streßsymptome der jeweiligen Versuche (ohne Mittagshitze-streß), begleitend zur besseren Übersicht bzw. Orientierung (Legende: steigende Intensität von „-“ (gering) über „+“ und „++“ bis „+++“ (hoch); k.A. – keine Angabe).

Versuch	Pflanzenart bzw. Sorte	Variante	LFM	Krankheitsgrad	Grünheitsgrad/Chlorophyllgehalt	N-Gehalt	Bestandesdichte	Wuchs	Blatttemperatur	Stomatare Leitfähigkeit	Transpirationsrate	PHS	PE	PHS/Chl a
Stickstoffsteigerungsversuch	<i>Triticum aestivum</i> L. 'Xanthos'	N ₀	k.A.	k.A.	-	-	-	-	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
		N ₂₂₀	k.A.	k.A.	+++	+++	++	++	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	<i>Triticum aestivum</i> L. 'Pegassos'	N ₀	k.A.	k.A.	-	-	+	+	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
		N ₂₂₀	k.A.	k.A.	++	++	+++	+++	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Stickstoffsteigerungsversuch	<i>Solanum tuberosum</i> L. 'Selma'	N ₀	k.A.	k.A.	-	-	-	-	+++	+++	+++	++	++	+++
		N ₁₈₀	k.A.	k.A.	+++	+++	+++	+++	++	++	++	+	+	+
Krankheitsfrüherkennung	<i>Hordeum vulgare</i> L. 'Duet' (2003)	Unbehandelt	k.A.	+++	++(+)	++(+)	+++	+++	++(+)	++	++	++	++	++
		Opera	k.A.	++	+++	+++	+++	+++	++	++	++	++	++	+
Krankheitsfrüherkennung	<i>Hordeum vulgare</i> L. 'Duet' (2004)	Kontrolle	k.A.	+	+	k.A.	+++	+++	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
		Variante C	k.A.	++(+)	++	k.A.	+++	+++	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
		Variante P	k.A.	++	++	k.A.	+++	+++	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Primärfolgen unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit	<i>Rheum rhabarbarum</i>	Ungewässert	+	k.A.	+++	+++	k.A.	k.A.	++	+	+	+	+	+
		Angegossen	+++	k.A.	++	++	k.A.	k.A.	+	+++	+++	++	++	+++
Primärfolgen unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit	<i>Triticale</i> 'Modus'	Ungewässert	+	k.A.	++(+)	++	+++	++	+++	++(+)	++	++	++	++
		Angegossen	++	k.A.	++	++	+++	++	+++	++	+(+)	+(+)	+(+)	+(+)
Beginnende Sekundärfolgen von Wassermangel	<i>Triticale</i> 'Modus'	Ungewässert	+	k.A.	++	+(+)	+++	++	+++	++	++	++	++	++
		Angegossen	+++	k.A.	++(+)	+++	+++	++(+)	++	+++	+++	+++	+++	+++
Sekundärfolgen von Wassermangel	Winterweizen 'Triso'	Unbewässert	k.A.	k.A.	+	++	+	++	++	++	++	++(+)	+++	+++
		Bewässert	k.A.	k.A.	+++	+++	+++	+++	++	++	++	++	++	++
Sekundärfolgen von Wassermangel	Winterweizen 'Ludwig'	Wassermangel	+	k.A.	+	+	++	++	++	++(+)	+++	++(+)	+++	+++
		Kontrolle	++	k.A.	++	++	+++	+++	++	++	++	++	++	++
Multivariater Versuch	<i>Solanum tuberosum</i> 'Edelstein'	Ungebeizt	++	+++	++	++	+	+	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
		Kontrolle	+	+	++(+)	++	+++	+++	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
		N ₅₀	++	+	+	+	+	+	+	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
		Ungewässert	-	+	+++	++	++	++	++	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

Fortsetzung Tabelle 48. (Teilstück rechts)

Versuch	Pflanzenart bzw. Sorte	Stressart	CF	REIP	PRI	RG-Ratio	RVI	GNDVI	FQA	CF/RVI	CF/GNDVI	CF/PRI
Stickstoffsteigerungsversuch	<i>Triticum aestivum</i> L. 'Xanthos'	N ₀	-	-	+++	-	-	-	k.A.	+++	-	-
		N ₂₂₀	++	++	+	+	++	++	k.A.	+	+	++
	<i>Triticum aestivum</i> L. 'Pegassos'	N ₀	+	+	++	++	+	+	k.A.	++	++	+
		N ₂₂₀	+++	+++	-	+++	+++	+++	k.A.	-	+++	+++
Stickstoffsteigerungsversuch	<i>Solanum tuberosum</i> L. 'Selma'	N ₀	++	-	+++	-	-	-	++	+++	+++	+
		N ₁₈₀	+++	++	+	+	++	++	+	+	++	+++
Krankheitsfrüherkennung	<i>Hordeum vulgare</i> L. 'Duet' (2003)	Unbehandelt	++	++	+++	+	+	+(+)	++	+++	++	++
		Opera	+++	+++	++	++	++	++	++(+)	++	++(+)	+++
Krankheitsfrüherkennung	<i>Hordeum vulgare</i> L. 'Duet' (2004)	Kontrolle	+	+	+++	+	+	+(+)	++	+++	+	+
		Variante C	++	++	++	++	++	++	++(+)	++(+)	++	++
		Variante P	+++	++	+	++	++	++	++	+++	+++	+++
Primärfolgen unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit	<i>Rheum rhabarbarum</i>	Ungewässert	+++	++	+	+	+	++	+++	+++	+++	+++
		Angegossen	++	++	+++	+	++	++	++	++	++	++
Primärfolgen unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit	<i>Triticale</i> 'Modus'	Ungewässert	+++	++	++	++	++	++	+++	++	+++	+++
		Angegossen	++	+(+)	+++	+(+)	+(+)	+(+)	++	+++	++	++
Beginnende Sekundärfolgen von Wassermangel	<i>Triticale</i> 'Modus'	Ungewässert	+++	++	+++	++	++	++	+++	++(+)	+++	+++
		Angegossen	++	++(+)	++	++	++(+)	++	++	+++	++	++
Sekundärfolgen von Wassermangel	Winterweizen 'Triso'	Unbewässert	++	+	+++	+	+	+	++	+++	++	+
		Bewässert	+++	++	+	++	++	++	+++	++	+++	+++
Sekundärfolgen von Wassermangel	Winterweizen 'Ludwig'	Wassermangel	+	++	+++	++	+	++	++	+++	++	+
		Kontrolle	+++	+++	++	+++	+++	+++	+++	++	+++	+++
Multivariater Versuch	<i>Solanum tuberosum</i> 'Edelstein'	Ungebeizt	-	+	+++	-	+	-	-	++	-	-
		Kontrolle	+++	++	+	+	+++	+++	++	+(+)	+(+)	++
		N ₅₀	++	+	++	+++	++	+	+(+)	++	++	+
		Ungewässert	+++	++	-	++	+++	+++	+++	++	++	++

Selbständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, daß ich die vorliegende Doktorarbeit selbständig verfaßt habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder aus anderweitigen fremden Äußerungen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Ferner erkläre ich, daß die Arbeit noch nicht in einem anderen Studiengang als Prüfungsleistung verwendet wurde.

Persönliche Danksagung

Das Projekt wurde freundlicherweise vom Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen gefördert.

Mein herzlicher Dank gilt allen Personen, die zu der Erstellung dieser Arbeit beigetragen haben:

Herrn Prof. Dr. G. Wenzel für seine weitreichende und umfassende Unterstützung, die sehr gute Zusammenarbeit und die große Selbständigkeit, die er mir gewährte, sowie die Durchsicht des Manuskripts, die wesentliche Beiträge zur Entstehung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr. U. Schmidhalter und Herrn Prof. Dr. K.-J. Hülsbergen möchte ich für die Übernahme des Koreferats danken. Herrn Dr. E. Stickel für die erfolgreiche Erhebung des Projektes und die wertvolle Beratung und Unterstützung, die mir immer eine überaus große Hilfe waren.

Den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Pflanzenzüchtung (TUM) gilt mein besonderer Dank für die analytischen Tätigkeiten, die Anlage und Instandhaltung der Feldversuche und die wertvollen Ratschläge in praktischen Fragen. Auch die Mitarbeiter des Lehrstuhls für Pflanzenernährung waren mir immer eine große Hilfe. Herrn Lindinger, Betreuer der Versuchsanlage der BASF in Oberding, Herrn Manhart und Herrn Jungert vom Lehrstuhl für Pflanzenernährung (TUM) und Herrn Dr. M. Hess vom Lehrstuhl für Phytopathologie (TUM) möchte ich besonders für die Überlassung der Versuchsanlagen und der dazugehörigen Erntedaten danken.

Meinem Onkel Josef Selmayr möchte ich hier ganz herzlich für die wertvolle Beratung bei der Wahl des Themas und für die Erlaubnis, in Erching messen zu können. Auch meinem Onkel Prof. Dr. Tassilo Selmayr von der Fachhochschule Weihenstephan, Fachbereich Chemie, für die moralische und fachliche Unterstützung gilt mein ganz besonderer Dank.

Meiner Familie (namentlich meiner Mutter Maria Lindenberg und meinem Bruder Martin Idelberger) und meinen Freunden (namentlich Anton Kasper) aber sei hier besonders und herzlichst für die immerwährende Anteilnahme und fröhliche Hilfestellung bei der Bewältigung dieser großen Aufgabe gedankt.

Lebenslauf

Geburtsdatum / -ort 13. August 1971 in München
Kontakt: claudia@idelberger.net

Beruflicher Werdegang

seit 09/2008	Innendienst Vertrieb, Strom und Gas für Industriekunden Kundenakquisition und -betreuung Oberbayern, EO.N Bayern Vertrieb GmbH, München
02/2008 – 08/2008	Sachbearbeiterin, Teilprojekt Kundenbewertung „Task Force Erdgas“, Einsatz bei der EO.N Bayern AG, Regensburg
04/2007 – 11/2007	Sachbearbeiterin, MVI Group GmbH, München
05/2005 – 03/2007	Weitestgehende Fertigstellung der Promotion Dr. agr. Thema: „Sonnenlichtinduzierte Chlorophyll-Fluoreszenz in Nutzpflanzenbeständen im Tagesgang“
05/2002 – 04/2005	Wissenschaftliche Angestellte Technische Universität München / Wissenschaftszentrum Weihenstephan
09/1999 – 03/2002	Auslandsaufenthalte Großbritannien und Italien
05/1999 – 07/1999	Redakteurin T-Nova Deutsche Telekom Innovationsgesellschaft mbH, Berlin
02/1997 – 03/1999	Tutorin Humboldt-Universität zu Berlin, Fachgebiet Pflanzenzüchtung

Ausbildung

12/2007 – 20/2008	Praktikum, Klinikum Großhadern der Ludwig-Maximilians-Universität München
10/1992 – 02/1999	Studium der Gartenbauwissenschaften mit Abschluß Dipl.-Ing. agr. (Master sc. hort.) Humboldt-Universität zu Berlin Thema der Diplomarbeit: „Untersuchungen an variegaten Formen von <i>Ficus pumila</i> L. und <i>Soleirolia soleirolii</i> (Req.) Dandy“
08/1986 – 06/1992	Rheingau-Oberschule, Berlin, mit Abschluß Abitur
09/1982 – 07/1986	Karls gymnasium in Bad Reichenhall

Sonstiges

seit 07/2000 Mitglied der Royal Horticultural Society (Großbritannien)

München, 2. August 2010

Claudia Idelberger