

Lehrstuhl für Pflanzenernährung
Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan
Technische Universität München

**Laserinduzierte Chlorophyllfluoreszenz zur Bestimmung des N-Gehaltes, der Biomasse
und der Pflanzendichte - Technik, Feldmessungen und Einfluss der Lichtbedingungen**

Doreen Thoren

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. agr. habil. Kurt-Jürgen Hülsbergen

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. sc. techn. (ETH Zürich) Urs Schmidhalter

2. Univ.-Prof. (komm. L.) Dr. agr., Dr. agr. habil.

Hermann Auernhammer, i. R.

Die Dissertation wurde am 12.03.2007 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 21.06.2007 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeine Einführung	- 6 -
2	Messtechnik: Traktorbasiertes Sensorsystem auf Basis der laserinduzierten Chlorophyllfluoreszenz	- 10 -
2.1	Einführung.....	- 10 -
2.2	Material und Methoden	- 12 -
2.3	Messergebnisse.....	- 21 -
2.4	Diskussion der Ergebnisse	- 24 -
2.5	Schlussfolgerungen	- 24 -
3	Laserinduzierte Chlorophyllfluoreszenz und der Einfluss von Licht sowie der Temperatur	- 25 -
3.1	Einführung.....	- 25 -
3.2	Material und Methoden	- 27 -
3.3	Messergebnisse.....	- 29 -
3.4	Physikalische Modellierung	- 33 -
3.5	Diskussion der Ergebnisse	- 39 -
3.6	Anwendung des Modells zur Erklärung der Temperaturabhängigkeit	- 41 -
3.7	Schlussfolgerungen	- 43 -
4	N-Gehalts- und Biomassebestimmungen von Raps mit Hilfe der laserinduzierten Chlorophyllfluoreszenz im Feldversuch	- 45 -
4.1	Einführung.....	- 45 -
4.2	Material und Methoden	- 47 -
4.3	Messergebnisse.....	- 51 -
4.4	Diskussion der Ergebnisse	- 57 -
4.5	Schlussfolgerungen	- 60 -
5	Biomasse- und Bestandesdichtemessungen mit Hilfe der laserinduzierten Chlorophyllfluoreszenz in Raps- und Getreidebeständen zu sehr frühen Pflanzenstadien.....	- 61 -
5.1	Einführung.....	- 61 -
5.2	Material und Methoden	- 64 -
5.3	Messergebnisse.....	- 67 -
5.4	Diskussion der Ergebnisse	- 70 -
5.5	Schlussfolgerungen	- 71 -
6	Messung der LICF in Getreidebeständen zur 2. und 3. N-Gabe und Vergleich mit N-Tester und Nitratschnelltest.....	- 73 -
6.1	Einführung.....	- 73 -
6.2	Material und Methoden	- 75 -
6.3	Messergebnisse.....	- 77 -
6.4	Diskussion der Ergebnisse	- 81 -
6.5	Schlussfolgerungen	- 86 -
7	Chlorophyll- und N-Verteilung in Getreidepflanzen	- 87 -
7.1	Einführung.....	- 87 -
7.2	Material und Methoden	- 88 -
7.3	Messergebnisse.....	- 92 -
7.4	Diskussion der Ergebnisse	- 95 -
7.5	Schlussfolgerungen	- 97 -
8	Gesamtdiskussion.....	- 98 -
8.1	Bewertung des Einsatzpotentials der LICF-Messung zur teilflächenspezifischen Regulierung der ersten N-Gabe	- 99 -
8.2	Bewertung des Einsatzpotentials der LICF-Messung zur teilflächenspezifischen Regulierung der zweiten und dritten N-Gabe.....	- 103 -

8.3	Bewertung der Einflussgrößen Licht und Temperatur im Hinblick auf die variable N-Düngung	108 -
8.4	Weitere Einsatzmöglichkeiten des LICF- Messverfahrens	112 -
9	Zusammenfassung	113 -
10	Literaturverzeichnis	116 -
	Danksagung	125 -

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	auf dem Traktordach montiertes Sensorsystem (Laser-N-Detektorsystem)	16 -
Abbildung 2.2:	einzelner Sensor (Laser-N-Detektor)	16 -
Abbildung 2.3:	Blockdiagramm der Sensorkomponenten (Laser-N-Detektor)	17 -
Abbildung 2.4:	Skizze der Funktionsweise (Laser-N-Detektorsystem)	18 -
Abbildung 2.5:	Feld der Südzucker AG in Lüttewitz, Düngungsvarianten	20 -
Abbildung 2.6:	N-Messung mit dem Laser-N-Detektor	22 -
Abbildung 2.7:	N-Messung mit dem Hydro-N –Sensor (N-Applikationskarte)	22 -
Abbildung 2.8:	BDI-Messung mit dem Laser-N-Detektor	23 -
Abbildung 2.9:	BDI-Messung mit dem Hydro–N-Sensor	23 -
Abbildung 3.1:	Sensorsystem, das auf der von der Sonne direkt und auf der von der Sonne diffus beschienenen Seite des Getreidebestandes misst	27 -
Abbildung 3.2:	Verschiebung des gemessenen Fluoreszenzverhältnisses zu kleineren Werten bei direktem Sonnenlichteinfall am Beispiel von Weizen auf dem Standort Seehausen (Sachsen) zu BBCH 45 (31.05.02), Freilandmessung. Die obere Kurve repräsentiert die Ergebnisse der LICF-Messung auf der diffus von der Sonne bestrahlten Seite, während die untere Kurve denselben Pflanzenbestand auf der direkt von der Sonne bestrahlten Seite zeigt.	30 -
Abbildung 3.3:	Abhängigkeit des Verhältnisses F_{690}/F_{730} von der Sonnenlichtintensität [a.u.= arbitrary unit]. Zusammenfassung der Messergebnisse (normiert) von verschiedenen Standorten an Tagen mit direktem Sonnenlichteinfluss, Freilandmessungen zu Getreide. Während die Messungen auf der direkt von der Sonne beschienenen Seite einen linearen Zusammenhang zwischen Lichtintensität und Verhältnis F_{690}/F_{730} zeigen, ist auf der diffus beschienenen Seite kein Einfluss auf das Verhältnis erkennbar. Die Abweichungen der Messpunkte von den Geraden zeigen die unterschiedliche N-Versorgung	31 -
Abbildung 3.4:	Zusammenhang zwischen steigender Lichtintensität und dem Fluoreszenzverhältnis F_{690}/F_{730} , Weizen (BBCH 25-30), Klimakammerversuch	32 -
Abbildung 3.5:	Zusammenhang zwischen steigender Lichtintensität und Photosyntheseaktivität, Weizen (BBCH 25-30), Klimakammerversuch	32 -
Abbildung 3.6:	Zusammenhang zwischen steigender Lichtintensität und dem Fluoreszenzverhältnis F_{690}/F_{730} , Weizen (BBCH 32), Klimakammerversuch	32 -
Abbildung 3.7:	Zusammenhang zwischen steigender Lichtintensität und Photosyntheseaktivität von Weizenpflanzen (BBCH 32), Klimakammerversuch	32 -
Abbildung 3.8:	Modellquerschnitt eines Getreideblattes; d_s repräsentiert die Dicke der Schicht, in der das Photosynthesesystem bei starkem Sonnenlicht energetisch gesättigt ist; z symbolisiert die Tiefe, in der das Laserlicht des Sensors absorbiert wird und aus der die Fluoreszenzstrahlung emittiert wird; D repräsentiert die Blattdicke.	35 -

Abbildung 3.9: Ergebnisse der Computersimulation nach Formel (3.9). Diese zeigen den Einfluss von linear steigender, auf die Blattoberfläche auftreffender Lichtintensität. Mit steigender Lichtintensität sinkt das Verhältnis F_{690}/F_{730} linear.	38 -
Abbildung 3.10: Zusammenhang zwischen steigender Temperatur und dem Fluoreszenzverhältnis F_{690}/F_{730} , Weizen (BBCH 25-30), Klimakammerversuch.....	41 -
Abbildung 4.1: Chemisch bestimmter N-Gehalt zur zweiten N-Gabe (BBCH 39) in Abhängigkeit zur variierten ersten N-Gabe (EC 19) zu Raps.....	52 -
Abbildung 4.2: Reflexionswert S1 in Abhängigkeit zum chem. bestimmten N-Gehalt im Feldversuch zu Raps zur 2. N-Gabe (BBCH 39).....	52 -
Abbildung 4.3: F_{690}/F_{730} (LICF) in Abhängigkeit zum chem. bestimmten N-Gehalt im Feldversuch zu Raps zur 2. N-Gabe (BBCH 39).....	52 -
Abbildung 4.4: Trockenmassegehalte zur zweiten N-Gabe (BBCH 39) in Abhängigkeit zur variierten ersten N-Gabe (BBCH 19) zu Raps.....	54 -
Abbildung 4.5: Reflexionswert S2 in Abhängigkeit zur konventionell bestimmten Biomasse durch Trocknung im Feldversuch zu Raps zur 2. N-Gabe (BBCH 39).....	55 -
Abbildung 4.6: BDI_{LICF} in Abhängigkeit zur konventionell bestimmten Biomasse durch Trocknung im Feldversuch zu Raps zur 2. N-Gabe (BBCH 39).....	55 -
Abbildung 4.7: Beziehung zwischen dem Trockenmassegehalt und dem chemisch bestimmten N-Gehalt von Raps zur zweiten N-Gabe (BBCH 39).....	56 -
Abbildung 4.8: Reflexionswert S1 in Abhängigkeit von Reflexionswert S2 im Feldversuch zu Raps zur 2. N-Gabe (BBCH 39).....	56 -
Abbildung 4.9: F_{690}/F_{730} in Abhängigkeit vom BDI_{LICF} (LICF-Messwerte) im Feldversuch zu Raps zur 2. N-Gabe (BBCH 39).....	56 -
Abbildung 5.1: BDI_{LICF} -Messung im Raps zu BBCH 11-32, Großgefäßversuch.....	67 -
Abbildung 5.2: BDI_{LICF} -Messung im Weizen zu BBCH 13-31, Großgefäßversuch.....	67 -
Abbildung 5.3: Zusammenhang zwischen Frischmasseertrag und BDI_{LICF} , Raps im Entwicklungsstadium BBCH 32.....	68 -
Abbildung 5.4: Zusammenhang zwischen Frischmasseertrag und BDI_{LICF} , Weizen im Entwicklungsstadium BBCH 31.....	68 -
Abbildung 5.5: Zusammenhang zwischen Anzahl von Weizenpflanzen/m ² (Mittel 173 – 324) und gemessener Bestandesdichte mittels LICF (BDI_{LICF}) im Feldversuch zu Vegetationsbeginn (BBCH 21).....	69 -
Abbildung 6.1: F_{690}/F_{730} zu WW (DC 32) zur 2. N-Gabe, unterhalb der Kurve ist die Menge an N zur ersten N-Gabe angegeben.....	77 -
Abbildung 6.2: BDI_{LICF} zu WW (DC 32) zur 2. N-Gabe, unterhalb der Kurve ist die Menge an N zur ersten N-Gabe angegeben.....	77 -
Abbildung 6.3: N-Tester zu WW (DC 32) zur 2. N-Gabe, unterhalb der Kurve ist die Menge an N zur ersten N-Gabe angegeben, oberhalb der Kurve ist die Düngeempfehlung nach N-Tester angegeben.....	78 -
Abbildung 6.4: Nitratschnelltest zu WW (DC 32) zur 2. N-Gabe, unterhalb der Kurve ist die Menge an N zur ersten N-Gabe angegeben, oberhalb der Kurve ist die Düngeempfehlung nach NST angegeben.....	78 -
Abbildung 6.5: F_{690}/F_{730} zu WW (DC 45) zur 3. N-Gabe, unterhalb der Kurve ist die Menge an N zur ersten und zweiten N-Gabe angegeben.....	80 -
Abbildung 6.6: BDI_{LICF} zu WW (DC 45) zur 3. N-Gabe, unterhalb der Kurve ist die Menge an N zur ersten und zweiten N-Gabe angegeben.....	80 -
Abbildung 6.7: N-Tester zu WW (DC 45) zur 3. N-Gabe, unterhalb der Kurve ist die Menge an N zur ersten und zweiten N-Gabe dargestellt, oberhalb der Kurve ist die Düngeempfehlung nach N-Tester dargestellt.....	80 -

Abbildung 6.8: Nitratschnelltest zu WW (DC 45) zur 3. N-Gabe, unterhalb der Kurve ist die Menge an N zur ersten und zur zweiten N-Gabe dargestellt, oberhalb der Kurve ist die Düngeempfehlung nach NST dargestellt.....	80 -
Abbildung 6.9: Kornerträge, unterhalb der Kurve ist die Menge an N zur ersten, zweiten und dritten N-Gabe angegeben	81 -
Abbildung 7.1: Messung der LICF mit dem Laser-N-Detektor in verschiedenen Pflanzenebenen (hier dargestellt Wintergerste Ende Ährenschieben)	91 -
Abbildung 7.2: Chlorophyllverteilung der oberen und unteren Blätter im Feldbestand von Getreide zu Beginn Blüte (DC 60) am 07.06.02 in Ab-hängigkeit von der N-Versorgungsstufe, die die Menge an N zur ersten, zweiten und dritten N-Gabe widerspiegelt	93 -
Abbildung 7.3: F_{690}/F_{730} der oberen Blattetagen im Feldbestand von Getreide zu DC 45 am 30.05.02 in Abhängigkeit von der N-Versorgungsstufe, die die Menge an N zur ersten und zweiten N-Gabe widerspiegelt.....	93 -
Abbildung 7.4: Kornerträge des Feldversuches in Abhängigkeit von der N-Versorgungsstufe, die die Menge an N verabreicht zur ersten, zweiten und dritten N-Gabe widerspiegelt	93 -
Abbildung 7.5: F_{690}/F_{730} in verschiedenen Pflanzenebenen gemessen, Gerste (Candesse) zum Schossen am 09.05.01, Gefäßversuch Halle.....	94 -
Abbildung 7.6: F_{690}/F_{730} in verschiedenen Pflanzenebenen gemessen, Gerste (Candesse) zum Ende Ährenschieben am 28.05.01, Gefäßversuch Halle	94 -
Abbildung 7.7: F_{690}/F_{730} in verschiedenen Pflanzenebenen gemessen, Weizen (Tarso) zum Schossen am 09.05.01, Gefäßversuch Halle	94 -
Abbildung 7.8: F_{690}/F_{730} in verschiedenen Pflanzenebenen gemessen, Weizen (Tarso) zum Ende Ährenschieben am 30.05.01, Gefäßversuch Halle	94 -
Abbildung 7.9: F_{690}/F_{730} in verschiedenen Pflanzenebenen gemessen, Weizen (Altos) zum Schossen am 09.05.01, Gefäßversuch Halle	95 -
Abbildung 7.10: F_{690}/F_{730} in verschiedenen Pflanzenebenen gemessen, Weizen (Altos) zum Ende Ährenschieben am 28.05.01, Gefäßversuch Halle	95 -
Abbildung 7.11: F_{690}/F_{730} in verschiedenen Pflanzenebenen gemessen, Weizen (Novalis) zum Schossen am 09.05.01, Gefäßversuch Halle	95 -
Abbildung 7.12: F_{690}/F_{730} in verschiedenen Pflanzenebenen gemessen, Weizen (Novalis) zum Ende Ährenschieben am 28.05.01, Gefäßversuch Halle	95 -

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: N-Düngung zur ersten N-Gabe (BBCH 19) und die entsprechenden N-Aufnahmen, bestimmt zum Zeitpunkt kurz vor der zweiten N-Gabe (BBCH 39)	51 -
Tabelle 6.1: N-Düngungsvarianten zu Getreide zur 1., 2. und 3. N-Gabe in kg N /ha	76 -
Tabelle 6.2: Berechnete Wahrscheinlichkeiten für die Annahme einer Signifikanz nach Ein-Weg ANOVA für die gemessenen Parameter F_{690}/F_{730} , BDI_{LICF} , N-Tester und Nitratschnelltest zur zweiten N-Gabe zu Winterweizen (DC 32)	79 -
Tabelle 7.1: N-Düngungsvarianten zu Getreide zur 1., 2. und 3. N-Gabe in kg N/ha	89 -

1 Allgemeine Einführung

Ziel dieser Arbeit ist es, die laserinduzierte Chlorophyllfluoreszenz, nachfolgend LICF genannt, als Messverfahren zur Messung der N-Versorgung, der Biomasse und der Pflanzendichte am Beispiel Getreide und Raps im Hinblick auf den zukünftigen Einsatz zur teilflächenspezifischen N-Düngung in umfangreichen Feldversuchen zu testen, zu prüfen und zu bewerten.

Auf großen und vor allem auf heterogenen Schlägen landwirtschaftlicher Kulturen ist eine teilschlagspezifische N-Düngung der schlageinheitlichen N-Düngung vorzuziehen, um lokale Über- und Unterversorgung mit N zu vermeiden. Ökonomische und ökologische Vorteile werden in [Ancev et al., 2005; Schmerler & Jürschik, 1997; Malzer et al., 1996; Swinton & Ahmad, 1996; Reetz & Fixen, 1995] beschrieben.

Zwei unterschiedliche Ansätze zur variablen, bedarfsgerechten, teilflächenspezifischen N-Düngung sind in den letzten Jahren entwickelt worden, der Kartieransatz (Mapping approach) und der Sensoransatz (Realtime Sensor Approach, Online Ansatz) [Ludowicy et al., 2002]. Online-Sensoren ermöglichen es, zeitgleich und in einem Arbeitsgang mit der Düngung bestehende Unterschiede in der N-Versorgung der Pflanzen zu detektieren und die N-Düngermenge daraufhin anzupassen. Sie sind deshalb am besten geeignet für den praktischen Einsatz in der Landwirtschaft.

Bisher in der landwirtschaftlichen Praxis eingesetzte Sensorlösungen beruhen auf Reflexionsmessungen von Pflanzenbeständen [Reusch, 1997]. Reflexionsmessungen sind jedoch erst ab bestimmten Bodenbedeckungsgraden (Blattflächenindex > 3) sinnvoll durchführbar, da sich bei geringen Bodenbedeckungsgraden der Boden störend auf das Messergebnis auswirkt [Guyot, 1990]. Der Einsatz dieser Sensoren ist bei Getreide und Raps erst ab der zweiten N-Gabe möglich.

Eine weitere in der landwirtschaftlichen Praxis eingesetzte Sensorlösung zur variablen N-Düngung ist ein Sensor zur Erfassung der Pflanzendichte, das Crop Meter. Dieser misst mechanisch über den Auslenkwinkel eines durch einen Pflanzenbestand bewegten, pendelnd aufgehängten zylindrischen Körpers die Pflanzenmassedichte im Feldbestand [Ehlert et al., 2004; Ehlert & Schmerler, 2001]. Dieses Messprinzip kann jedoch nur bei ausreichend vorhandener Biomasse und nur zu Getreide ab Mitte Schossen, also erst ab der 3. N-Gabe, eingesetzt werden.

Bis heute fehlen leistungsstarke Sensoren, die die teilflächenspezifische N-Düngung schon zu sehr frühen Pflanzenstadien, zur ersten N-Gabe zu Getreide und Raps, ermöglichen.

Ein neuartiges Sensorsystem, basierend auf dem Messverfahren der laserinduzierten Chlorophyllfluoreszenz (LICF), wurde im Rahmen dieser Arbeit als Alternative im Hinblick auf den Einsatz zur variablen, teilflächenspezifischen N-Düngung in zahlreichen Feldversuchen geprüft und getestet. Ein entscheidender Vorteil der LICF ist darin zu sehen, dass die auszuwertenden Fluoreszenzsignale nur von den Pflanzen ausgesendet werden und der Boden keinen Einfluss auf das Messsignal nimmt.

Das von uns eingesetzte Messverfahren der LICF unterscheidet sich von den in der Biologie angewandten Messverfahren zur Messung der Fluoreszenz, mit deren Hilfe die photosynthetischen Prozesse bezüglich Stresszuständen in der Pflanze untersucht werden. Bei diesen Fluoreszenzmessgeräten wird die Fluoreszenz einer bestimmten Wellenlänge (Einwellenlängenfluoreszenz) und deren Zeitverlauf untersucht und ausgewertet. Im Unterschied dazu wird bei dem von uns eingesetzten Messverfahren das Verhältnis zweier Wellenlängen ausgewertet, nämlich der Fluoreszenzen bei 690 nm und 730 nm. Das Verhältnis F_{690}/F_{730} stellt ein Maß für den Chlorophyllgehalt der Blätter dar [**Lichtenthaler & Rinderle, 1988; Chappelle et al., 1984a; Chappelle et al., 1984b**]. Grundlagen dazu sind aus [**Hak et al., 1990; Lichtenthaler & Rinderle, 1988; Lichtenthaler, 1986; Chappelle et al., 1984a; Chappelle et al., 1984b**] zu entnehmen. Das Absorptionsmaximum von Chlorophyll-a für Licht liegt bei 670 nm [**Häder, 1999**] und das Fluoreszenzemissionsspektrum bei 680-730 nm [**Häder, 1999**]. Absorptionsmaximum und Fluoreszenzemissionsspektrum liegen eng beieinander, die Banden überlappen sich. Je höher die Chlorophylldichte ist, desto stärker wird die emittierte Fluoreszenzstrahlung wieder von benachbarten, nicht angeregten Chlorophyllmolekülen reabsorbiert. Das Fluoreszenzsignal wird dabei stärker bei 690 nm reabsorbiert als bei 730 nm. Das bedeutet, dass eine Erhöhung des Chlorophyllgehaltes den Quotienten F_{690}/F_{730} absinken lässt. Im Grunde handelt es sich bei dem von uns eingesetzten Messverfahren also um eine Absorptionsmessung, wobei die Fluoreszenz als Träger der Information genutzt wird.

Da es eine enge Korrelation zwischen dem N-Gehalt der Pflanze und dem Chlorophyllgehalt der Pflanze gibt [**Bredemeier, 2005; Bredemeier & Schmidhalter, 2001; Adams et al., 1990; Chappelle et al., 1984b**], kann das Messverfahren der LICF zur Beschreibung der N-Versorgung der Pflanze genutzt werden.

Bislang sind Messgeräte zur variablen sensorgestützten N-Düngung auf Basis der LICF in der landwirtschaftlichen Praxis noch nicht eingeführt. Im Rahmen dieser Arbeit konnten Prototypen einer Sensortechnik der Firma Planto (Germany, Leipzig) eingesetzt werden, die für den großflächigen Einsatz in der landwirtschaftlichen Düngepraxis entwickelt wurden und Messungen vom Traktordach aus beidseitig in den Feldbestand ermöglichen. Die Messungen erfolgen abtastend über den Feldbestand mit einer typischen Entfernung Sensor - Pflanzenbestand von 3-4 m.

Der erste Teil der Arbeit analysiert die verwendete Technik und das zugrunde liegende Messprinzip im Hinblick auf das angestrebte Einsatzgebiet.

Ein zweiter Teil der Arbeit untersucht den Einfluss des Umgebungslichtes auf das Messsignal F_{690}/F_{730} . In der Literatur gibt es kontroverse Aussagen zu dieser Thematik. Einige Wissenschaftler berichten von einem Einfluss des Umgebungslichtes auf das Messsignal F_{690}/F_{730} [Agati et al., 1995; Valentini et al., 1994], während andere davon ausgehen, dass es keinen Einfluss des Umgebungslichtes auf den Quotienten F_{690}/F_{730} gibt [Günther et al., 1994; Günther et al., 1991]. [Stober & Lichtenthaler, 1993] berichten von einem nur geringen Lichteinfluss. [Bredemeier & Schmidhalter, 2001] fanden in ihren Messungen ebenfalls nur einen geringen Einfluss des Umgebungslichtes auf den Quotienten F_{690}/F_{730} und schlussfolgerten daraus, dass der Einfluss des Umgebungslichtes keine größere Rolle für die Messung der LICF im Hinblick auf die variable N-Düngung unter verschiedenen Lichtbedingungen spielt. Die vorliegende Arbeit verdeutlicht die physikalischen Zusammenhänge zwischen den Umgebungslichtbedingungen und dem Verhältnis F_{690}/F_{730} und erklärt den Widerspruch der Aussagen. Das entwickelte Modell erklärt darüber hinaus auch den in der Literatur beschriebenen Temperatureinfluss [Bredemeier, 2005; Agati et al., 2000; Agati et al., 1997; Agati et al., 1996] auf das Verhältnis F_{690}/F_{730} .

Einen wesentlichen Teil der Arbeit bildet die Bewertung des Einsatzpotentials der LICF für die variable N-Düngung bevorzugt zu Getreide und Raps. Die LICF wird dabei mit herkömmlichen Messmethoden (N-Gehaltsbestimmung, Biomassebestimmung, Pflanzendichtebestimmung, Nitratschnelltest und N-Tester) sowie erstmalig mit Reflexionsmessungen in Feldbeständen verglichen.

Darüber hinaus wird die Einsatzmöglichkeit der LICF als hilfreiches Messverfahren zur variablen N-Düngung schon ab der ersten N-Gabe analysiert und bewertet.

Ein abschließender Teil der Arbeit widmet sich den Verteilungsmustern an Chlorophyll in Getreidepflanzen. Dabei wird analysiert, welcher Pflanzenteil die N-Versorgung am besten widerspiegelt und welche Aussagen die Chlorophyllgehalte der obersten Pflanzenschichten (Canopy) bezüglich der N-Versorgung liefern. Das dürfte auch im Hinblick auf andere optische Messverfahren, wie Reflexionsmessverfahren und N-Testermessungen, interessant erscheinen, da diese ebenfalls die N-Versorgung über die Messung der Chlorophyllgehalte der obersten Blattschichten ableiten.

2 Messtechnik: Traktorbasiertes Sensorsystem auf Basis der laserinduzierten Chlorophyllfluoreszenz

Es wurde eine neuartige, auf dem Verfahren der laserinduzierten Chlorophyllfluoreszenz basierende Messtechnik für die landwirtschaftliche Forschung entwickelt und eingeführt.

Da sich das verwendete Messgerät von bisher in der Fachliteratur bekannten Messgeräten zur Messung der laserinduzierten Chlorophyllfluoreszenz (LICF) unterscheidet, werden zunächst die verwendete Messtechnik und die Unterschiede zu anderen Messgeräten beschrieben. Besonders hervorzuheben ist, dass die Messungen vom Traktordach aus bei typischen Traktorarbeitsgeschwindigkeiten erfolgen und dass das Sensorsystem neben der Messung des Chlorophyllgehaltes von Pflanzen die gleichzeitige Bestimmung der Pflanzendichte erlaubt.

Am Ende des Kapitels werden durchgeführte LICF-Messungen auf einem typischen Getreideschlag vorgestellt, die die Praxistauglichkeit dieses Messgerätes aufzeigen.

2.1 Einführung

Während sich die Fluoreszenzmessung von Pflanzenblättern in der pflanzenphysiologischen Forschung in den letzten Jahrzehnten zu einer Standardmethode zum Nachweis von Pflanzenstress entwickelte [Bolhár-Nordenkamp & Öquist, 1993; Schreiber & Bilger, 1993; Krause & Weis, 1991], wurde die laserinduzierte Mehrwellenlängenfluoreszenz als Methode zur Bestimmung des Pigmentgehaltes von Pflanzenmaterial (z.B. Chlorophyll) erst in den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts als neues Forschungsfeld eingeführt. Bei den ersten Anwendungen handelte es sich um flugzeugbasierte Systeme zur Beobachtung der Vegetation [Zimmermann und Günther, 1986; Hoge et al., 1983]. Es dauerte ein weiteres Jahrzehnt, bis erste Prototypen zur bodengebundenen Anwendung in der landwirtschaftlichen Forschung zur Verfügung standen [Agati et al., 1995; Günther et al., 1991].

Die wesentlichen Vorteile des Einsatzes der laserbasierten Zweiwellenlängenmesstechnik (LICF) zur Bestimmung von Stickstoff bei einer Anregungswellenlänge um 650 nm (Maximum der Chlorophyllabsorption) und Nachweiswellenlängen bei 690 und 730 nm im Vergleich zu auf der Reflexion des Sonnenlichtes basierenden Messtechniken sind:

- Messprinzip ist unabhängig vom Tageslicht (Messung auch in Dunkelheit und Dämmerung möglich)
- Messung ist unabhängig von der Farbe des Tageslichtes
- Nur chlorophyllhaltige Materie liefert Signale (Boden liefert kein Signal)
- Problem der wellenlängenunabhängigen Totalreflexion des Sonnenlichtes existiert nicht.

Bei den ersten verfügbaren Prototypen von auf LICF-Messung basierenden Sensoren handelte es sich um modifizierte Systeme der Vegetationsbeobachtung. Sie waren daher große und teure Geräte [Günther et al., 1991] oder benötigten mehr oder weniger direkten Kontakt zwischen der Sensoroptik und der zu messenden Pflanzenoberfläche [Schächtl et al., 2005; Sticksel et al., 2001; Agati et al., 1995]. Die Eignung solcher Systeme für die Landwirtschaft war somit stark eingeschränkt.

Ein neuartiges Sensorsystem, genannt Laser-N-Detektor, wurde im Zeitraum 2000-2003 von der Firma Planto GmbH eingeführt. Dieses Sensorsystem nutzt die Vorteile der Zweiwellenlängen-LICF-Messung, vermeidet aber die Nachteile der vorher genannten Systeme.

Neue Merkmale sind:

- Messung erfolgt aus einer Entfernung von mehreren Metern
- Messung erfolgt bei Traktorarbeitsgeschwindigkeiten
- Messung charakteristischer Bestandesflächen unter Beibehaltung der Ortsauflösung von wenigen mm
- Unabhängige Messung der Bestandesdichte neben der Messung des N-Gehaltes möglich
- Unterscheidung zwischen niedrigen Bestandesdichten bei hohen Chlorophyllgehalten der Pflanzen und hohen Bestandesdichten bei niedrigen Chlorophyllgehalten ist möglich.

2.2 Material und Methoden

Arbeitsweise

Der Photosyntheseprozess innerhalb eines Pflanzenblattes beruht auf dem einfallenden Sonnenlicht als Energiequelle. Hierbei dienen die Chlorophyllmoleküle als „Antennen“. Diese absorbieren die Sonnenlichtenergie, indem sie in einen angeregten Zustand wechseln und die aufgenommene Energie zu sogenannten Reaktionszentren transportieren, wo die photosynthetischen Prozesse stattfinden. Der nicht für photochemische Reaktionen benötigte Teil der absorbierten Energie wird in Wärme umgewandelt oder als Fluoreszenzstrahlung in die Umgebung wieder abgegeben. Die Messung dieser Fluoreszenzstrahlung liefert uns in erster Linie Informationen über den Pflanzenstresszustand, da Stress die Geschwindigkeiten der chemischen Photosynthesereaktionen zugunsten der Emission von Fluoreszenz reduziert [Schreiber & Bilger, 1993; Krause & Weis, 1991].

Bei Verwendung der Zweiwellenlängenfluoreszenz-Messtechnik liefert das Verhältnis der gemessenen Lichtintensitäten, F_{690}/F_{730} , zusätzliche Informationen über die Chlorophylldichte der gemessenen Pflanzenblätter [Günther et al., 1993; Lichtenthaler & Rinderle, 1988; Chapelle et al., 1984a] und macht die Messwerte entfernungsunabhängig. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass das Fluoreszenzlicht bei den zwei Wellenlängen unterschiedlich starker Reabsorption durch andere Chlorophyllmoleküle auf seinem Weg zur Blattoberfläche unterliegt [Günther et al., 1993]. Die Stärke der Reabsorption ist abhängig von der Chlorophyllkonzentration in diesen Blättern. Die Zweiwellenlängenfluoreszenzmessung ist daher grundsätzlich eine Absorptionsmessung, die die Fluoreszenzstrahlung als Informationsträger nutzt.

In [Günther et al., 1993] wurde eine Formel, basierend auf dem Lambert-Beer-Gesetz, das die Lichtabsorption in nichttransparenten Medien beschreibt, hergeleitet, die die Abhängigkeit des Fluoreszenzverhältnisses F_{690}/F_{730} von der Chlorophyllkonzentration, den spezifischen Absorptionskoeffizienten, den Streukoeffizienten und der Blattdicke beschreibt.

$$\left(\frac{F_{690}}{F_{730}} \right)_{\lambda_{ex}} = \psi_{730}^{690} \frac{(\beta_2 + c\alpha_2) \left(e^{-(\beta_1 + c\alpha_1)D} - 1 \right)}{(\beta_1 + c\alpha_1) \left(e^{-(\beta_2 + c\alpha_2)D} - 1 \right)} \quad (2.1)$$

λ_{ex}	=	Anregungswellenlänge
$\Psi_{690/730}$	=	Verhältnis der Fluoreszenzeffizienzen
c	=	Chlorophyllkonzentration
α_1	= $\alpha_{690} + \alpha_{\text{ex}}$;	α_{690} = Absorptionskoeffizient bei 690 nm
		α_{ex} = Absorptionskoeffizient bei Anregungswellenlänge
α_2	= $\alpha_{730} + \alpha_{\text{ex}}$;	α_{730} = Absorptionskoeffizient bei 730 nm
		α_{ex} = Absorptionskoeffizient bei Anregungswellenlänge
β_1	= $\beta_{690} + \beta_{\text{ex}}$;	β_{690} = Streukoeffizient bei 690 nm
		β_{ex} = Streukoeffizient bei Anregungswellenlänge
β_2	= $\beta_{730} + \beta_{\text{ex}}$;	β_{730} = Streukoeffizient bei 730 nm
D	=	Blattdicke

Da das Verhältnis der Fluoreszenzeffizienzen $\Psi_{690/730}$ eine Konstante ist und die Absorptions- und Streukoeffizienten α und β in der Regel für eine gegebene Pflanzenart konstant sind, bleibt das zu messende Fluoreszenzverhältnis F_{690}/F_{730} lediglich abhängig von dem Chlorophyllgehalt c unter der Annahme, dass die Laserenergie vollständig innerhalb der Blattdicke D absorbiert wird.

Formel (2.1) basiert auf der Annahme, dass die Fluoreszenzeffizienzen über die Blattdicke konstant bleiben. Diese Annahme ist unter starker Sonnenlichteinwirkung nicht mehr gültig, wenn energetische Sättigungseffekte des Photosynthesesystems in oberen Blattschichten auftreten. Dieser Effekt und eine erweiterte Formel, die diesen Sachverhalt erklärt, werden in Kapitel 3 beschrieben.

Um das Fluoreszenzsignal von dem reflektierten Sonnenlicht in der jeweiligen Wellenlänge zu unterscheiden, wird ein Laserstrahl bei etwa 630 nm verwendet, um zusätzliche Energie zur Anregung der Chlorophyllmoleküle innerhalb der beleuchteten Pflanzenblätter bereitzustellen. Der Laserstrahl wird gepulst, um zwei Signale zu erhalten. Bei ausgeschaltetem Laser wird die sonnenlichtinduzierte Fluoreszenz und die Sonnenlichtreflexion gemessen. Bei eingeschaltetem Laser beinhaltet das Messsignal zusätzlich die laserinduzierte Fluoreszenz. Die Fluoreszenzausbeute (F_λ) bei jeder Wellenlänge ist daher die Differenz dieser zwei Signale.

$$F_{\lambda} = (F_{laser} + F_{sun} + R_{sun}) - (F_{sun} + R_{sun}) = F_{laser} \quad (2.2)$$

F_{laser} = Intensität der laserinduzierten Chlorophyllfluoreszenz

F_{sun} = Intensität der sonnenlichtinduzierten Chlorophyllfluoreszenz

R_{sun} = Intensität des reflektierten Sonnenlichtes

Ein Laser erlaubt im Vergleich zu anderen Beleuchtungstechniken einen sehr effizienten Transport der Lichtenergie über größere Entfernungen (der Laserfleck am Ziel hat einen Durchmesser von wenigen mm). Weiterhin hat das Laserlicht eine sehr enge Frequenzverteilung und liefert daher Energie nahezu einer einzelnen Wellenlänge im Chlorophyllabsorptionsband. Die Anregungsenergie reicht nicht in die zu messenden Fluoreszenzwellenlängenbänder bei leicht höheren Frequenzen hinein. Daher muss die Laserlichtreflexion nicht betrachtet werden.

Neue Eigenschaften des Laser-N-Detektors

Die Innovation des Laser-N-Detektors liegt in seiner Fähigkeit, die Fluoreszenz aus einer Entfernung von einigen Metern mit mm-Auflösung unter allen Lichtbedingungen und unter normalen landwirtschaftlichen Arbeitsbedingungen zu messen. Luftgestützte Systeme [**Zimmermann & Günther, 1986; Hoge et al., 1983**] können Fluoreszenzen aus großen Entfernungen messen, haben aber keine Detailauflösung, sondern arbeiten integral über mehrere Meter. Weiterhin sind diese Systeme auf aufwendigen Technologien aufgebaut. Andere Systeme [**Günther et al., 1991**] können bodenbasierte Entfernungsmessungen durchführen, sind aber ebenfalls auf aufwendiger Technologie basiert und haben keine Detailauflösung.

Neuere Entwicklungen, die für die landwirtschaftliche Forschung oder den praktischen Einsatz entwickelt wurden [**Schächtl et al., 2005; Sticksel et al., 2001**], benötigen mehr oder weniger direkten Kontakt zwischen dem Pflanzenblatt und der Optik. Hierdurch entfällt oder vermindert sich die Notwendigkeit, ein sehr großes Störsignal aus Sonnenlichtreflexion und sonnenlichtinduzierter Fluoreszenz zu unterdrücken, um das laserinduzierte Fluoreszenzsignal zu erhalten. Mit diesen Messverfahren ist eine hohe Detailauflösung erreichbar, jedoch lässt sich keine größere Pflanzenbestandsfläche erfassen. Weiterhin ist die Nutzbarkeit in der landwirtschaftlichen Praxis begrenzt aufgrund der Anzahl der benötigten Sensoren, der Ver-

schmutzungsanfälligkeit der Optik sowie eines benötigten Auslegergestänges mit vertikalen Verstellmöglichkeiten.

Das Laser-N-Detektorsystem ist, wie ein bereits in der landwirtschaftlichen Düngepraxis eingeführtes reflexionsbasierendes Verfahren [Lammel et al., 2001], auf dem Traktordach angebracht. Es ist dort gut gegen Schmutz geschützt und arbeitet ohne externe bewegliche Teile.

Ein weiterer Parameter, die Bestandesdichte, wird für die Messung zugänglich. Dies wird erreicht durch statistische Analyse der Messsignale auf beiden Wellenlängen. Dieser Messparameter wird zugänglich durch das scannende Funktionsprinzip des Sensorsystems, wie weiter unten beschrieben. Da nur dann Messsignale oberhalb der Rauschschwelle auftreten, wenn sich Pflanzenmaterial im Laserstrahl befindet, liefert die Anzahl gültiger Messsignale pro Flächeneinheit während des Scannens des Laserstrahls über den Pflanzenbestand zusätzliche Bestandesdichteinformationen. Im Gegensatz zu integralen Biomassemessmethoden ist diese Messmethode in der Lage, zwischen geringen Bestandesdichten mit hohen Chlorophyllgehalten pro einzelner Pflanze und höheren Bestandesdichten mit geringen Chlorophyllgehalten pro Einzelpflanze zu unterscheiden.

Sensorsystemaufbau

Das Laser-N-Detektorsystem besteht aus zwei Sensoren, die auf dem Traktordach montiert sind (Abbildung 2.1). Die zwei Sensoren messen den Pflanzenbestand zur rechten und zur linken Seite der Traktorfahrspur. Die Messdaten werden in jedem Sensor gespeichert und können später ausgelesen werden. Die Stromversorgung wird durch eine Stromversorgungsbuchse des Traktors sichergestellt, die Steuerung des Sensors kann über eine geeignete Bordelektronik oder ein Notebook durchgeführt werden.

Abbildung 2.2 zeigt einen einzelnen Sensor. Das Sensorgehäuse besteht überwiegend aus glasfaserverstärktem Kunststoff mit einem innen liegenden Aluminiumrahmen, der mechanische und optische Stabilität gewährleistet. Der innere Rahmen ist von dem äußeren Gehäuse durch Schockabsorber entkoppelt, um dem Effekt von externen Stößen auf das optische System zu minimieren. Zusätzliche Schockabsorber sind zwischen Sensor und Traktordachbefestigung vorgesehen. Die Messung erfolgt durch ein Glasfenster auf der Sensorvorderseite. Die Anschlüsse für Stromversorgung und Datentransfer sind auf der Rückseite des Sensors angebracht, ebenso wie eine GPS-Antenne und zusätzliche Licht- und Temperatursensoren.



Abbildung 2.1: auf dem Traktordach montiertes Sensorsystem (Laser-N-Detektorsystem)

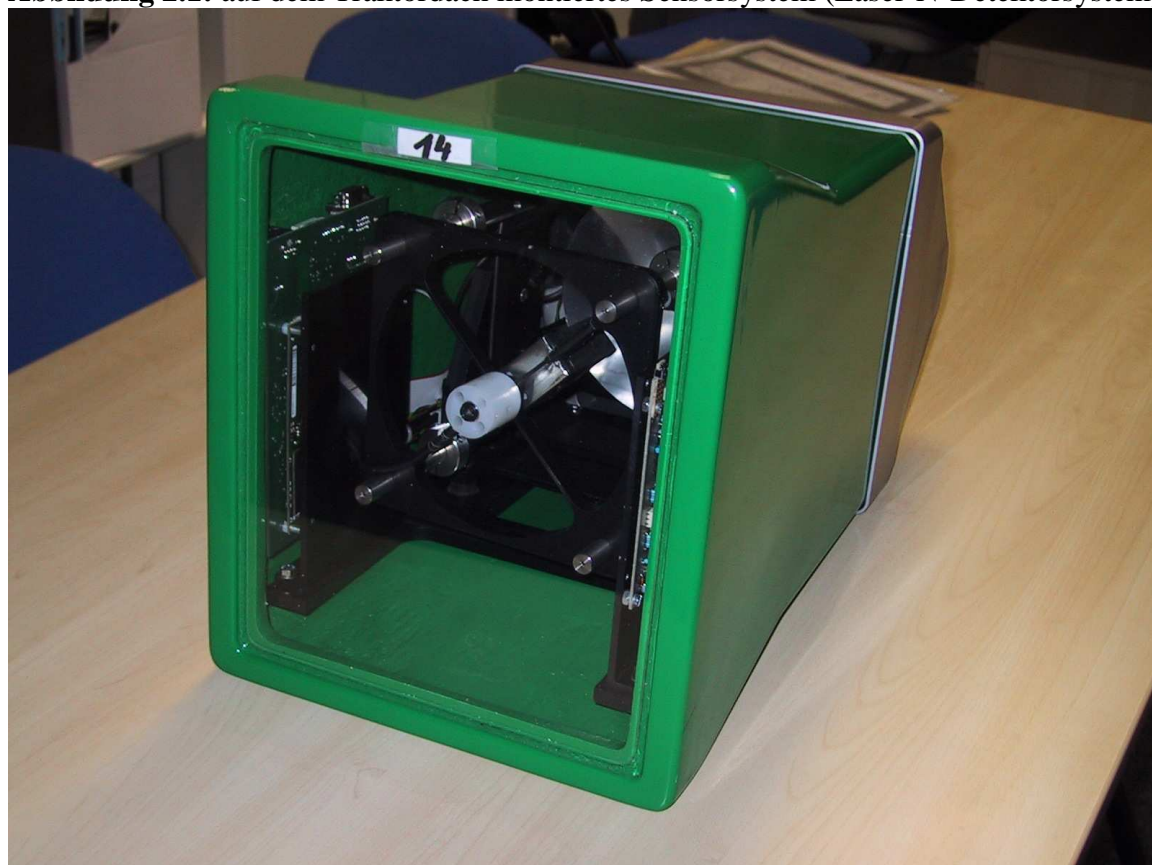


Abbildung 2.2: einzelner Sensor (Laser-N-Detektor)

Der Sensor besteht aus einer Laserquelle, lichtsammelnder Optik, Filteroptik, optoelektronischen Wandlern, analoger Signalverarbeitung, digitaler Signalverarbeitung, Embedded PC, Schrittmotor mit Steuerelektronik, GPS-Modul und zusätzlichen Licht- und Temperatursensoren.

Das Blockdiagramm in Abbildung 2.3 zeigt die Sensorkomponenten.

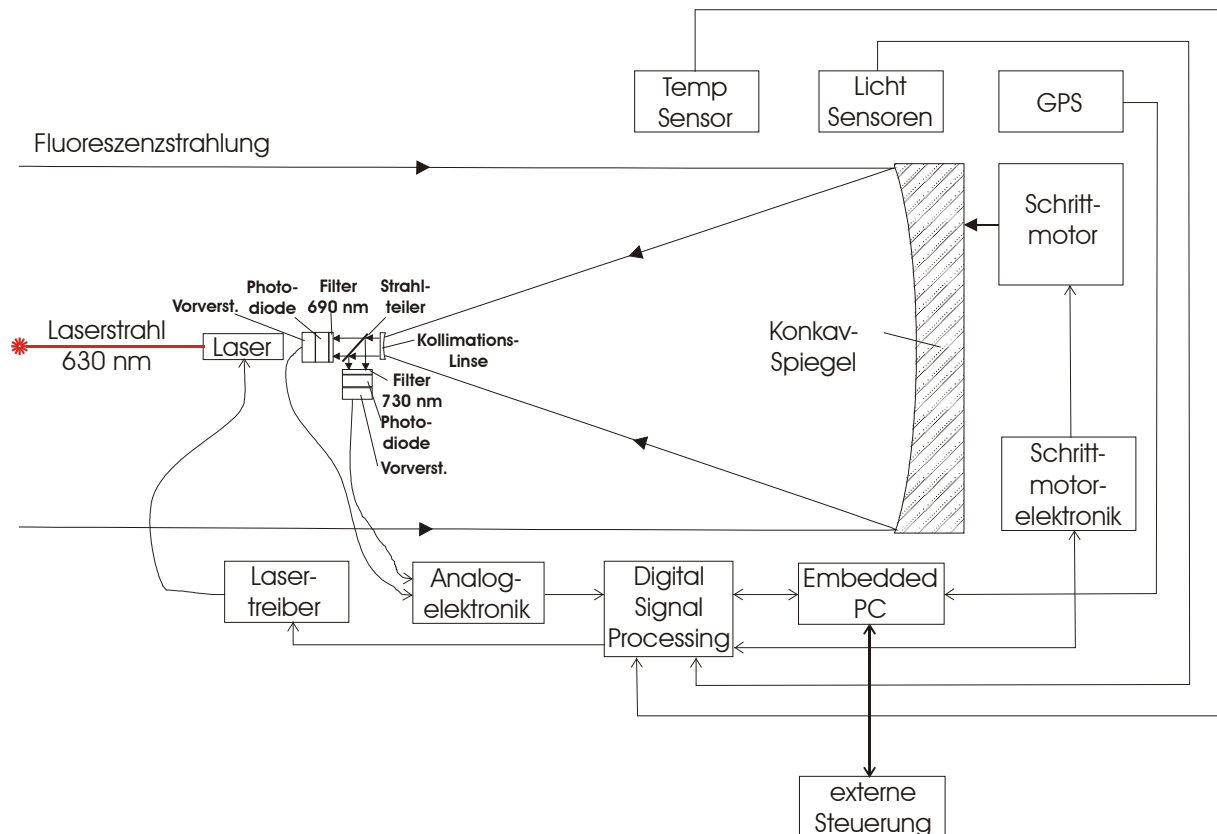


Abbildung 2.3: Blockdiagramm der Sensorkomponenten (Laser-N-Detektor)

Eine Laserdiode geringer Leistung ist auf der optischen Achse der Empfangsoptik montiert. Der Laser wird durch eine spezielle Treiberelektronik mit Spannung versorgt und sendet einen gepulsten Laserstrahl bei 630 nm aus, der auf einem Fleck mit einem Durchmesser von wenigen mm auf dem Ziel Fluoreszenz induziert. Die Pulsfrequenz beträgt 10 kHz mit einem Tastverhältnis von 50 %. Die mittlere ausgesendete Leistung liegt deutlich unterhalb von 5 mW.

Die Fluoreszenzstrahlung wird durch eine speziell berechnete Teleskopoptik detektiert. Ein kundenspezifisch geformter konkaver Spiegel mit 15 cm Durchmesser und 15 cm Brennweite sammelt die schwachen Fluoreszenzsignale und fokussiert diese auf einen optischen Detektorblock. Dieser Block umfasst eine Kollimationslinse, einen Strahlteiler für die Erzeugung

von zwei Lichtwegen und für jeden Lichtweg einen Bandpassinterferenzfilter, der die gewünschte Wellenlänge liefert (690/730 nm) sowie eine Photodiode.

Die gesamte Optik kann durch einen Schrittmotor bewegt werden, der mit einem absoluten Winkelkodierer und Motorsteuerelektronik versehen ist.

Die Photodiodenströme, die linear proportional zu den einfallenden Lichtintensitäten sind, werden an der Photodiode durch eine spezielle Elektronik vorverstärkt, bevor sie durch eine Analogelektronikplatine verstärkt und bearbeitet werden.

Die Analogelektronik sorgt für die Beseitigung von unerwünschten sonnenlichtinduzierten Fluoreszenz- und Reflexionssignalanteilen (siehe Formel 2.2). Das resultierende Signal wird zusammen mit Licht- und Temperatursensorsignalen digitalisiert und durch einen digitalen Signalprozessor (DSP-Platine) weiter bearbeitet. Diese Platine steuert ebenfalls den Lasertreiber und die Schrittmotorelektronik, die die Optik bewegt, und liefert das vorverarbeitete Messsignal an ein Embedded PC-Board. Der Embedded PC führt die Steuerung des DSP-Boards durch und sorgt für die übergeordnete Datenverarbeitung, Datenspeicherung, die Akquisition der GPS-Daten von einem integrierten GPS-Modul und für die Kommunikation mit externen Systemen (z.B. Notebook).

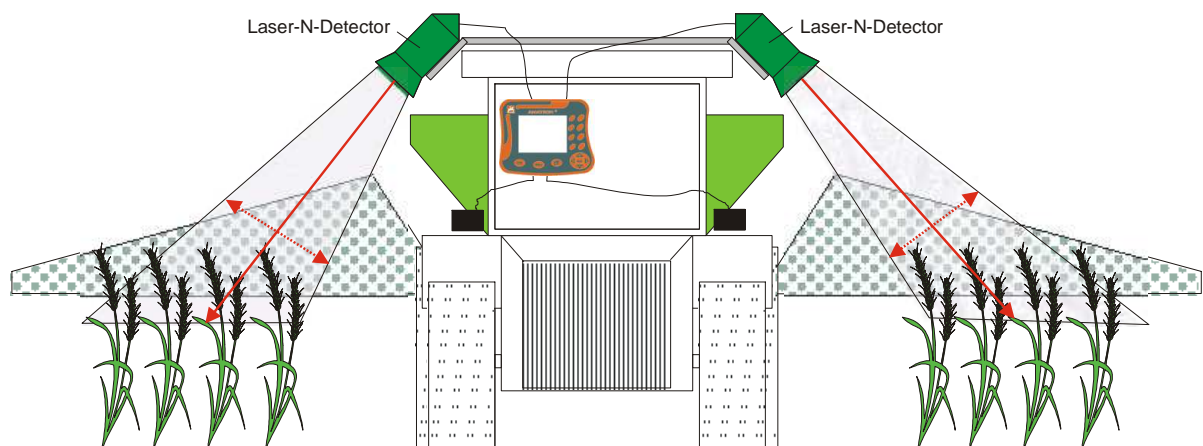


Abbildung 2.4: Skizze der Funktionsweise (Laser-N-Detektorsystem)

Abbildung 2.4 zeigt eine Skizze des Sensorarbeitsprinzips. Sobald der Sensor eingeschaltet wird, bewegt sich die Optik in eine Startposition, während der Laserstrahl ausgeschaltet ist. Sobald die Messung durch ein steuerndes Gerät gestartet wird, bewegt sich die Optik auf- und abwärts, um den Pflanzenbestand neben dem Traktor in einem Streifen bis zu einem Meter abzutasten. Der Laserstrahl wird seitlich über den Bestand mit einer wählbaren Frequenz von 1-2 Hz bewegt, während die Bewegung in Fahrtrichtung durch den fahrenden Traktor erzielt wird.

Da die Optik für einen optimalen Abstand zum Pflanzenbestand von ca. 3 – 3,5 m ausgelegt ist und die Bestandeshöhe mit dem Wachstumsstadium variiert, ist eine Kalibrationsroutine in der Sensorsoftware vorgesehen. Der Messstreifen kann auf die Fahrspur hin oder von der Fahrspur weg bewegt werden, um den optimalen Messabstand zu erzielen, in dem das Signal / Rauschverhältnis optimal ist. Die Kalibrierungsroutine findet automatisch den geeigneten Abstand und sollte vor jeder Messung eines neuen Pflanzenbestandes durchgeführt werden. Ein Teil des Bestandes sollte ausgewählt werden, der eine typische Pflanzenhöhe aufweist.

Die Datenaufnahme wird gestartet, wenn der Traktor seine Arbeitsgeschwindigkeit erreicht hat. Die Messung kann bei typischen Arbeitsgeschwindigkeiten der Düngung durchgeführt werden.

Nach Beendigung der Messung können die Messdaten des Sensorsystems ausgelesen werden. Die Daten beider Seiten der Fahrspur sind in Kombination mit entsprechenden GPS-Positionsinformationen verfügbar.

Feldmessungen

Umfassende Feldversuche wurden mit dem Laser-N-Detektor in den Jahren 2001-2005 durchgeführt, die das Potential des Sensorsystems für die teilflächenspezifische N-Düngung im Rahmen von teilflächenspezifischer Bewirtschaftung unter Praxisbedingungen gezeigt haben.

Ein Beispiel einer Feldversuchsmessung im Vergleich zu einer Messung mit einem reflexionsbasierten Sensorsystem, dem Hydro-N-Sensor [Lammel et al., 2001], demonstriert die Genauigkeit der N-Gehalts- und Bestandesdichtemessung des Laser-N-Detektors. Der Feld-

versuch wurde in Lüttewitz (Sachsen, Deutschland) auf einem Feld der Südzucker AG, nachfolgend Südzucker genannt, im Jahre 2002 mit 5 verschiedenen N-Düngungsstrategien zu Winterweizen durchgeführt. Die Feldgröße betrug 16 ha. Das Feld wurde in Parzellen von je 50 x 50 m unterteilt.

Die Messungen wurden kurz vor der 3. N-Gabe durchgeführt. 8 Parzellen erhielten keine N-Düngung. Weitere 8 Parzellen wurden teilflächenspezifisch gemäß der regionalen N-Düngempfehlung der LUFA gedüngt und bekamen zwischen 95 und 114 kg N/ha. Weitere 8 Parzellen wurden uniform nach einem N-Modell mit 84 kg N/ha gedüngt. 32 Parzellen bekamen eine parzellenspezifische N-Düngung nach einem N-Modell in einem Bereich von 50 bis 105 kg N/ha. Die letzten 8 Parzellen wurden uniform gemäß des N-Modells mit 30 % Reduktion der N-Düngung mit 59 kg N/ha gedüngt. Die Einteilung und die N-Düngungsvarianten sind in Abbildung 2.5 dargestellt.

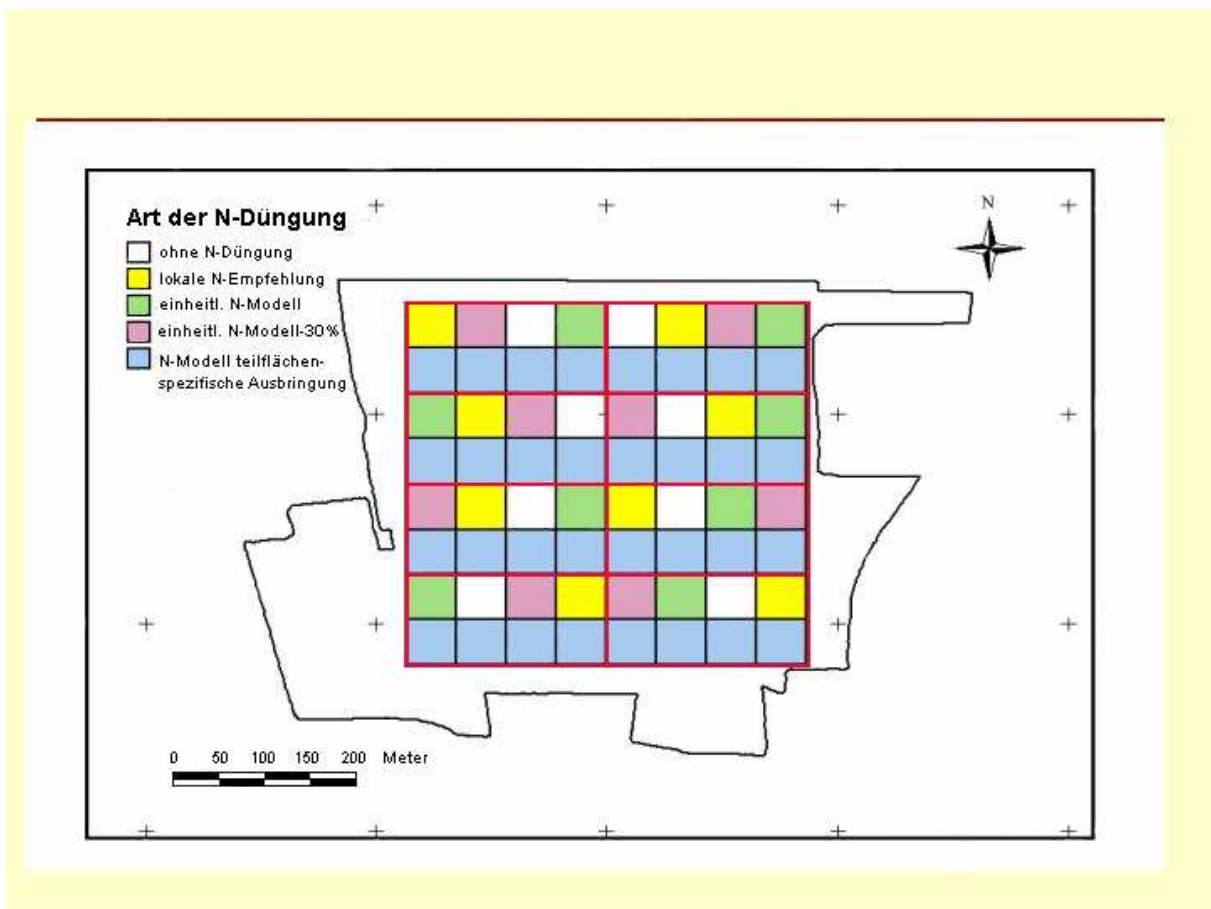


Abbildung 2.5: Feld der Südzucker AG in Lüttewitz, Düngungsvarianten

Während die N-Varianten mit 0 N-Düngung und die um 30 % reduzierten N-Düngungsvarianten keine optimale N-Düngung erhielten, entsprachen die anderen 48 Parzellen mehr oder weniger einer optimalen N-Düngung. Die optimale N-Düngung war zu diesem Zeitpunkt noch nicht bestimmt.

2.3 Messergebnisse

Kurz vor der dritten N-Gabe, am 22. Mai 2002, wurden die Messung mit dem Laser-N-Detektor und die Messung mit dem Hydro-N-Sensor zur N-Gehaltsbestimmung und zur Bestimmung der Bestandesdichte durchgeführt. Abbildung 2.6 zeigt die N-Messungen des Laser-N-Detektors. Dunkle Flecken repräsentieren niedrige N-Gehalte und helle Flecken Teilflächen mit hohen N-Gehalten. Abbildung 2.7 zeigt die parallele Messung mit dem Hydro-N-Sensor.

Abbildung 2.8 zeigt die Bestandesdichtemessung des Feldes gemessen mit dem Laser-N-Detektor. Die dunklen Gebiete repräsentieren hohe Bestandesdichten, während helle Gebiete niedrige Bestandesdichten zeigen. Die gleiche Messung wurde mit dem Hydro-N-Sensor durchgeführt und ist in Abbildung 2.9 dargestellt.

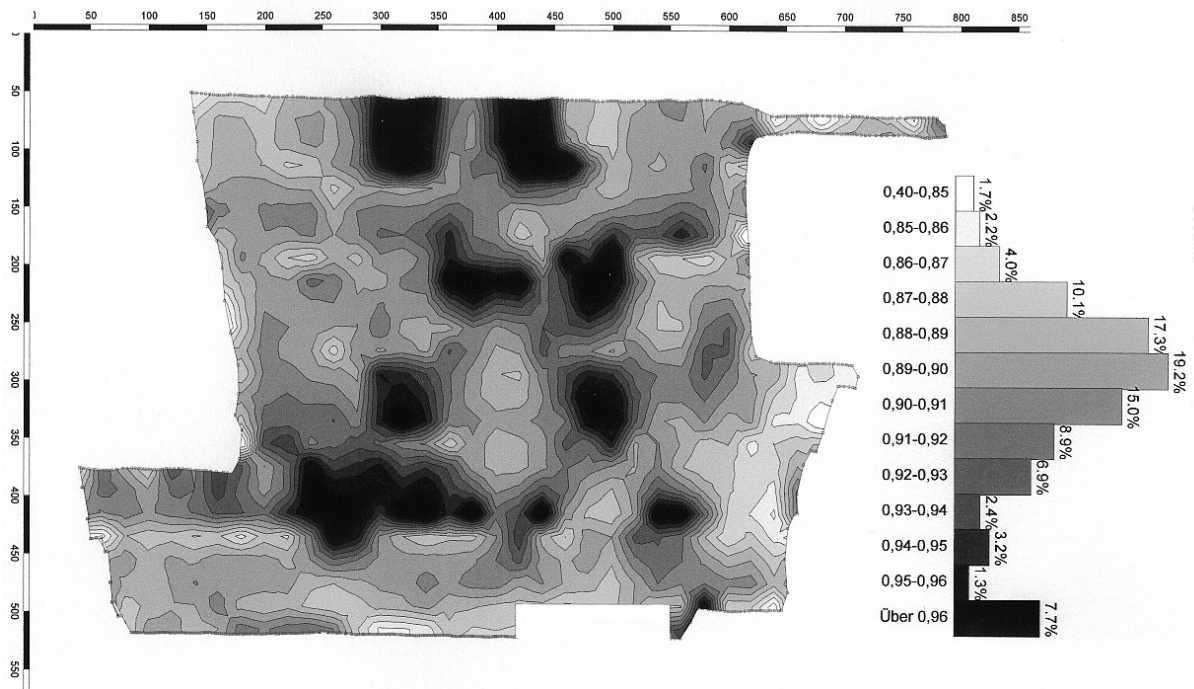


Abbildung 2.6: N-Messung mit dem Laser-N-Detektor

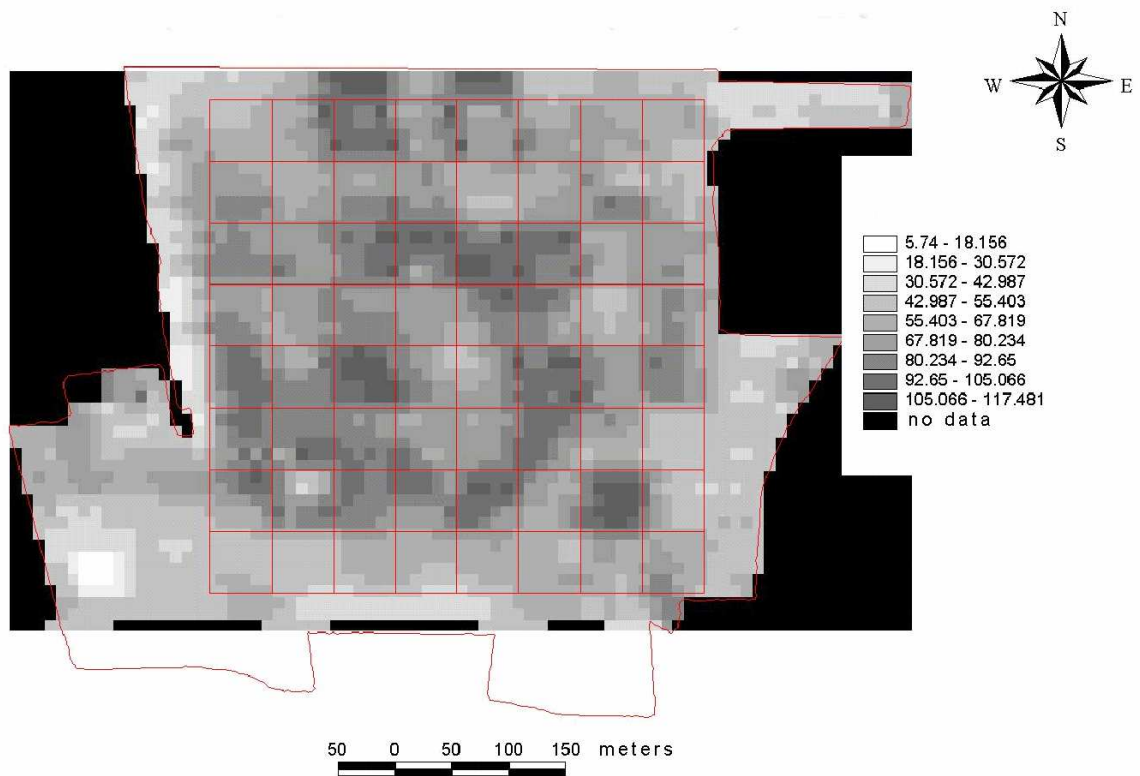


Abbildung 2.7: N-Messung mit dem Hydro-N –Sensor (N-Applikationskarte)

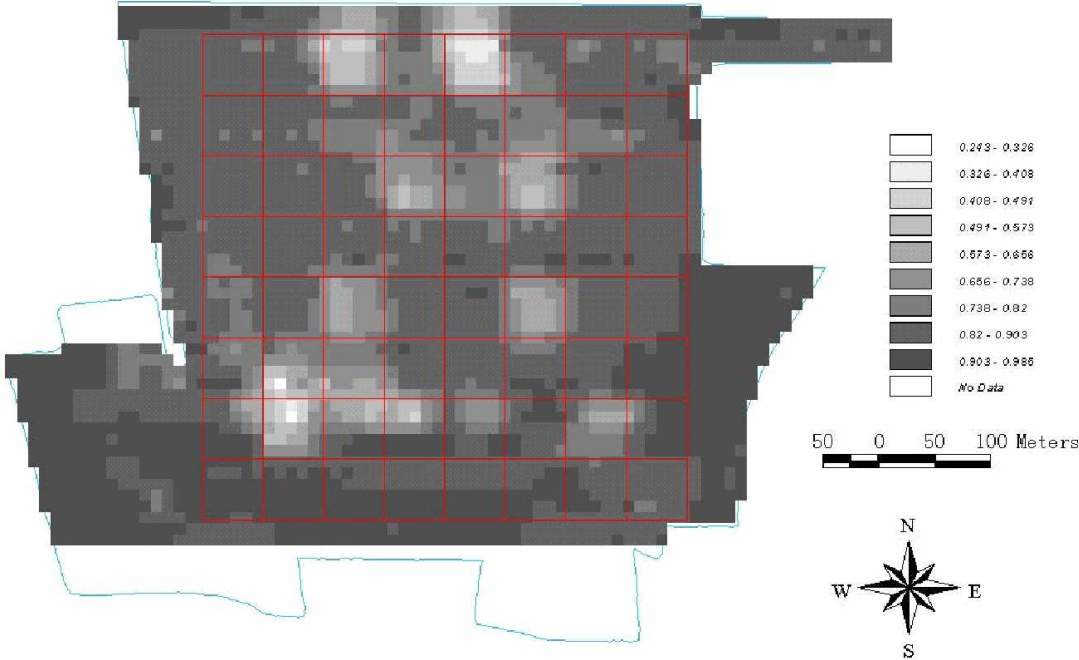


Abbildung 2.8: BDI-Messung mit dem Laser-N-Detektor

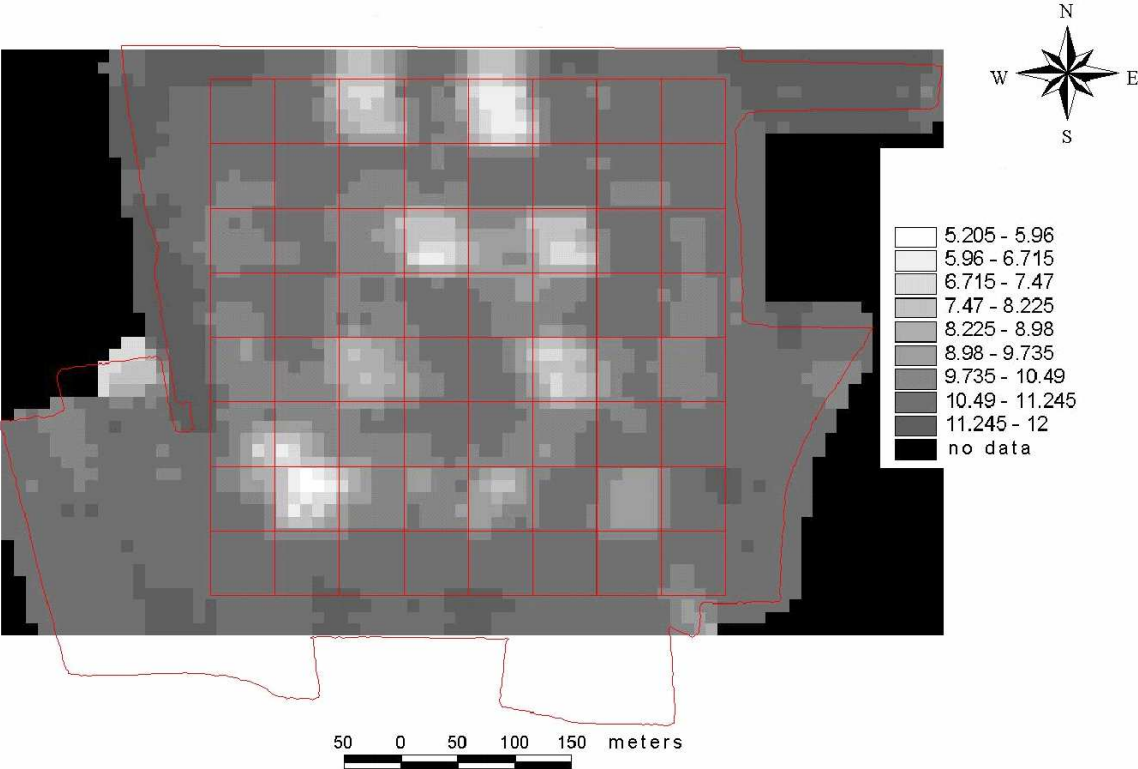


Abbildung 2.9: BDI-Messung mit dem Hydro-N-Sensor

2.4 Diskussion der Ergebnisse

Die N- und die Bestandesdichtemessungen mit dem Laser-N-Detektor stellen sehr gut die Bedingungen im Feld dar und zeigen dieselben Charakteristiken wie die reflexionsbasierende Messung.

Die Ergebnisse der N-Messungen unterscheiden die nicht gedüngten Parzellen von den mehr oder weniger optimalen N-Düngungsvarianten. Das gleiche gilt für die Bestandesdichtemessungen. Darüber hinaus lassen die Messungen lokalspezifische Details erkennen. In der Region im Südwesten des Feldes befindet sich um die Nullparzelle eine Senke, in der sich Wasser gesammelt hat und die das Wachstum der Pflanzen behindert. Deshalb ist das Gebiet mit niedrigem N-Gehalt größer als die Nullparzelle. Die Bestandesdichten sind aus dem gleichen Grunde hier sehr niedrig.

Die Düngungsvarianten gemäß des N-Modells mit 30 % Reduktion wurden ebenfalls detektiert und gut erkannt.

Die Bandbreite der Messwerte lassen darüber hinaus eine entsprechende Versorgungs- und Speicherkapazität des Bodens der verschiedenen Parzellen erkennen, die einen entschiedenen Einfluss auf die N-Versorgung der Parzellen aufweisen.

2.5 Schlussfolgerungen

Das neue Messkonzept, realisiert durch ein LICF-Sensorsystem, Laser-N-Detektor genannt, zeigt die Eignung des Sensorsystems für die Echtzeitmessung der N-Versorgungen von Getreidepflanzen unter Bedingungen der landwirtschaftlichen Praxis. Probleme bisheriger Messgeräte, die auf der laserinduzierten Chlorophyllfluoreszenz oder auf anderen Techniken beruhen, konnten mit diesem Konzept gelöst werden. Die Möglichkeit der Bestimmung der Bestandesdichte, unabhängig von der Chlorophyllgehaltsmessung, ermöglicht einen Mehrwert für die teilflächenspezifischen N-Düngung im Rahmen von Präzisionsanwendungen in der Landwirtschaft.

3 Laserinduzierte Chlorophyllfluoreszenz und der Einfluss von Licht sowie der Temperatur

Im Rahmen der Anwendung der laserinduzierten Zweiwellenlängen-Chlorophyllfluoreszenz zur teilflächenspezifischen Düngung konnte in umfangreichen Messversuchen in Getreidebeständen ein Lichtphänomen beobachtet werden. Waren die Pflanzen direktem Sonnenlicht ausgesetzt, so sank das Fluoreszenz-Intensitätsverhältnis F_{690}/F_{730} linear mit steigender Lichtintensität. Dieser Effekt konnte auf der von der Sonne abgewandten Seite des Pflanzenbestandes nicht beobachtet werden. In diesem Kapitel werden Messergebnisse diskutiert, die anschließend durch ein physikalisches Modell der Licht-Materie- Wechselwirkung in Pflanzenblättern beschrieben werden. Das entwickelte Modell liefert weiterhin eine Erklärung für die beobachtete Temperaturabhängigkeit des Fluoreszenzintensitätsverhältnisses. Es wird eine Formel hergeleitet, die den Einfluss des Umgebungslichtes auf das Messsignal F_{690}/F_{730} beschreibt und hilft, mit diesem Phänomen in der Messpraxis umzugehen.

3.1 Einführung

In der Vergangenheit konnte gezeigt werden, dass das Verhältnis der Wellenlängen 690 nm (F_{690}) und 730 nm (F_{730}) sehr gut korreliert mit dem Chlorophyllgehalt der Blätter [Günther et al., 1993; Lichtenthaler & Rinderle, 1988; Chapelle et al., 1984a]. Die Messung des Verhältnisses F_{690}/F_{730} der laserinduzierten Fluoreszenzintensitäten liefert eine entfernungsunabhängige Information über den Chlorophyllgehalt der zu messenden Pflanzen. Da der Stickstoffgehalt der Getreide- und Rapspflanzen eng mit dem Chlorophyllgehalt korreliert [Bredemeier, 2005; Adams et al., 1990; Chapelle et al., 1984b], ist die Messung des N-Gehaltes und die Bestimmung des N-Bedarfs von Getreide- und Rapsbeständen im Rahmen der teilflächenspezifischen Düngung vom Traktor aus mit geeigneten Sensorlösungen möglich. Mit dem Laser-N-Detektor steht ein derartiges Messsystem zur Verfügung.

Die Fluoreszenzmessung stellt eine Standardmethode zur Messung von Stress in der Pflanzenphysiologie dar [Lichtenthaler & Rinderle, 1988] und wird unter definierten Bedingungen mit Vorverdunkelung der Blätter, definierten Strahlungsintensitäten und definierten Bestrahlungszeiten durchgeführt. Der Laser-N-Detektor hingegen wurde als Messinstrument für

die Landwirtschaft zur variablen Stickstoffdüngung von großen Feldern entwickelt, wobei Messungen unter allen Einsatzbedingungen, auch hinsichtlich Licht, möglich sind.

Der Laser-N-Detektor weist folgende Merkmale auf: Die Messung der laserinduzierten Chlorophyllfluoreszenz (LICF) erfolgt mit zwei Sensoren, die auf dem Traktordach installiert sind, jeweils zur rechten und zur linken Seite des Feldbestandes. Dabei wird der Pflanzenbestand in einer Entfernung von 3-4 m auf beiden Traktorseiten optisch abgetastet (gescannt). Die Scan-Methode stellt eine Flächenmessung unter Beibehaltung der Auflösung der Messpunkte im mm Bereich dar. Dies erlaubt neben der Messung des N-Gehaltes der Pflanzen auch die Messung der Pflanzendichte des Bestandes. Nur die Kombination dieser zwei Messgrößen (Pflanzendichte und N-Gehalt) liefert wichtige Parameter für die Düngung und erlaubt eine genaue Anpassung der N-Düngung der Pflanzen entsprechend des Bedarfs der Pflanzen.

Umfassende Feldmessungen wurden mit dem Laser-N-Detektor zu allen Tageszeiten und bei stark unterschiedlichen Lichtbedingungen durchgeführt.

Im Zuge der Messungen konnte mit dem Sensorsystem ein sonnenlichtabhängiges Phänomen beobachtet werden. Während alle Messungen der Pflanzenbestände ohne direkten Sonneneinfall, d.h. Messungen „gegen“ die Richtung der einfallenden Sonne (Schattenseite), Messungen bei Bewölkung, Messungen in Dunkelheit, keine Beeinflussung durch die Lichtbedingungen zeigten, änderte sich die Situation, wenn direktes Sonnenlicht (siehe Abbildung 3.1) den Pflanzenbestand beleuchtete. Das Verhältnis F_{690}/F_{730} fiel nun linear mit der einfallenden Sonnenlichtintensität.

Während in bisherigen Veröffentlichungen [Agati et al., 1995; Günther et al., 1994; Valentini et al., 1994] der Einfluss der Lichtbedingungen auf das Verhältnis F_{690}/F_{730} kontrovers diskutiert und nur unzureichende Erklärungen für das Verhalten gegeben worden sind, enthält diese Arbeit eine umfassende Erklärung des Einflusses des Lichts auf das Verhältnis F_{690}/F_{730} , die auf biologischen und physikalischen Prozessen innerhalb eines Pflanzenblattes basiert.

3.2 Material und Methoden

Umfangreiche LICF-Messungen wurden zu allen Tageszeiten und unter verschiedenen Lichtbedingungen im Feldversuch durchgeführt. Der Lichteinfluss wurde ebenfalls in Phyto-kammerversuchen unter kontrollierten Bedingungen untersucht. Messungen erfolgten zu Wintergetreide. Die Menge an Daten erlaubt eine umfassende Klärung des Einflusses des Lichtes auf das Verhältnis F_{690}/F_{730} .

Feldmessungen

Das Laser-N-Detektorsystem enthält zwei Sensoren, die auf dem Traktordach zur rechten und zur linken Seite montiert und im Winkel von 45° zur Waagerechten auf den Pflanzenbestand gerichtet sind (Abbildung 3.1). Jeder Sensor scannt eine mittlere Bestandesfläche mit Hilfe eines im Sensor integrierten Bewegungsmechanismus unter Beibehaltung einer hohen räumlichen Auflösung. Der gemessene Streifen des Bestandes hat eine Breite von ungefähr 1m auf jeder Seite des Traktors.

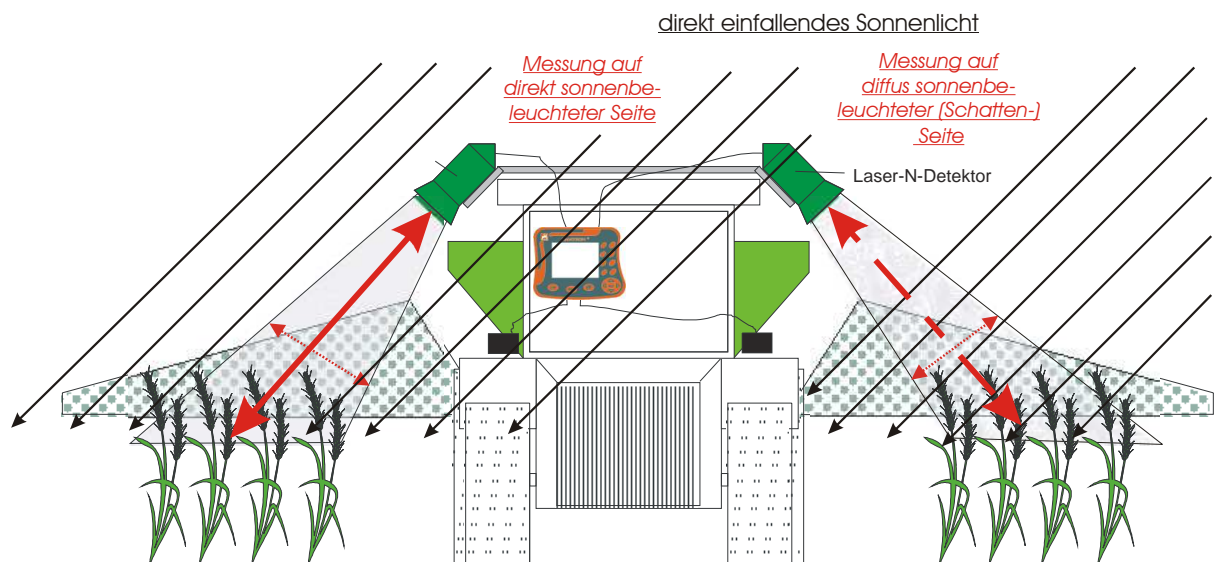


Abbildung 3.1: Sensorsystem, das auf der von der Sonne direkt und auf der von der Sonne diffus beschienenen Seite des Getreidebestandes misst

Die Messungen wurden sowohl an bewölkten Tagen als auch an sonnigen Tagen mit direkten Sonnenlichteinfall durchgeführt. Da das Laser-N-Detektorsystem aus zwei Sensoren besteht, die in 180° entgegengesetzter Richtung ausgerichtet sind, misst bei direktem Sonnenlichteinfall ein Sensor zu jeder Tageszeit auf der direkt von der Sonne beschienenen Seite des Bestan-

des (Messungen „mit der Sonne“), während der andere Sensor die nur diffus von der Sonne bestrahlte Seite des Bestandes (Schattenseite, Messung „gegen die Sonne“) misst (Abbildung 3.1).

Beide Sensoren sind ausgestattet mit zusätzlichen Lichtsensoren auf der oberen Seite des Gerätes, die die gesamte einfallende Lichtintensität und die Richtung, aus der das direkte Sonnenlicht einfällt, aufzeichnen. Die Unterschiede der Lichtintensitäten aus den verschiedenen Einfallsrichtungen können zur Bestimmung der Lichtbedingungen (direkte oder diffuse Strahlung) genutzt werden.

Eine große Anzahl an Winterweizen- und Wintergersteparzellen mit unterschiedlicher Menge an Stickstoff wurden an verschiedenen Standorten gemessen. Die N-Düngung erfolgte mit unterschiedlichen Mengen zur ersten, zweiten und dritten N-Gabe. Die Feldversuche wurden in Deutschland an verschiedenen Standorten der Universitäten Halle-Wittenberg und Kiel, an Standorten der Landesversuchsanstalt für Landwirtschaft in Sachsen und auf den Versuchsfeldern der Firma Südzucker AG in Sachsen durchgeführt. Die in diesem Kapitel beschriebenen Feldversuchsergebnisse stammen hauptsächlich aus dem Jahre 2002. Gemessen wurden die Getreidebestände mit dem Laser-N-Detektorsystem an verschiedenen Tagen und zu unterschiedlichen Tageszeiten unter unterschiedlichen Lichtbedingungen, wobei die Hauptmessungen zur zweiten (BBCH 32) und zur dritten N-Gabe (BBCH 37-49) erfolgten. Die Definitionen zum BBCH-Code sind den Quellen [Aufhammer, 1998; Kübler, 1994] zu entnehmen.

Die Fahrgeschwindigkeit des Traktors betrug bei allen Messungen 6 km/h. Alle Messungen wurden jeweils von beiden Seiten des Bestandes mit gleicher Düngung durchgeführt. Folglich konnten das Verhältnis F_{690}/F_{730} und die dazugehörigen Lichtbedingungen separat für jede Seite ausgewertet werden. Der Einfluss der N-Düngung konnte so eliminiert werden, da der N-Gehalt auf beiden Seiten des Bestandes gleich war. Alle Messungen wurden in Bezug auf die Lichtbedingungen analysiert und wurden in der Auswertung berücksichtigt.

Normierung

Die Auswertung der Messergebnisse wurde zunächst separat für jede Seite durchgeführt. Um die Ergebnisse aller Standorte miteinander vergleichen zu können, mussten die Ergebnisse normiert werden. Das Verhältnis F_{690}/F_{730} der Schattenseite wurde daher auf den Wert 1,2 normiert (Abbildung 3.3). Abbildung 3.3 zeigt die gesammelten Ergebnisse für Winterweizen

von den Standorten in Halle, Seehausen (beide Universität Halle-Wittenberg) und Lüttewitz (Südzucker) zum Zeitpunkt der dritten N-Gabe.

Phytokammermessungen

Ein modifizierter Laser-N-Detektor wurde für die Messungen in der Phytokammer verwendet. Um eine optimale Entfernung zwischen den Pflanzen und dem Sensor vergleichbar zu den Feldmessungen zu erreichen, wurde die ausgesendete und die einfallende Strahlung über zwei Spiegel umgelenkt.

Ausgesät wurde Winterweizen in Containern mit Abmessungen 1,2 m x 0,8 m im Gewächshaus der Versuchsstation Dürnast in Freising (TU München) im Spätsommer 2003. Am 19. November zu BBCH 25-30 (Mitte bis Ende Bestockung) und am 9. Dezember 2003 zu BBCH 32 (Schossen, 2. Halmknoten) wurden diese Pflanzen unterschiedlichen Lichtbedingungen ausgesetzt (0, 142, 244, 318, 485, 569 und 832 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Die Definitionen zum BBCH-Code sind der Quelle [Aufhammer, 1998] zu entnehmen. Zu beiden Messterminen wurde die Temperatur konstant gehalten, zu BBCH 25-30 am 19. November auf 18 °C und zu BBCH 32 am 9. Dezember auf 23 °C. Die Luftfeuchte betrug zu beiden Messterminen konstant 60 %.

Am 21. November 2003 zum Zeitpunkt BBCH 25-30 wurden die Weizenpflanzen auf den Einfluss unterschiedlicher Temperaturbedingungen in der Phytokammer gemessen. Für die Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit der LICF-Messungen beim Weizen wurde dieser sechs unterschiedlichen Temperaturen (8 °C, 13 °C, 18 °C, 23 °C, 28 °C und 33 °C) ausgesetzt, wobei die Lichtstärke konstant auf 245 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ gehalten wurde.

Die Einwirkzeit der jeweiligen Lichtstärke bzw. der jeweiligen Temperatur betrug 20 min, dann erst erfolgte die LICF-Messung. Zusätzliche Messungen der Photosyntheserate wurden mit einem Porometer durchgeführt.

3.3 Messergebnisse

Ergebnisse der Feldmessungen

Abbildung 3.2 zeigt eine typische Messung des Verhältnisses von F_{690}/F_{730} von Weizenbeständen mit variiertem N-Düngung. Auf der X-Achse sind die verschiedenen N-Behandlungsstufen aufgetragen, die hier im Rahmen der Betrachtung des Einflusses der Lichtverhältnisse auf das Verhältnis F_{690}/F_{730} nicht weiter diskutiert werden. Die Y-Achse zeigt das Verhältnis

F_{690}/F_{730} . Die obere Kurve entstand unter schattigen Bedingungen, d.h. nicht beeinflusst durch direktes Sonnenlicht. Die untere Kurve von Abbildung 3.2 zeigt die gleichen Pflanzenbestände zur gleichen Zeit unter direktem Sonnenlichteinfluss. Die Messkurve verschiebt sich durch den Einfluss von direktem Sonnenlicht nach unten. Der vertikale Abstand der Kurven ist dabei linear abhängig von der Intensität der einfallenden Sonnenlichtstrahlung (wie Abb. 3.3 zu entnehmen ist).

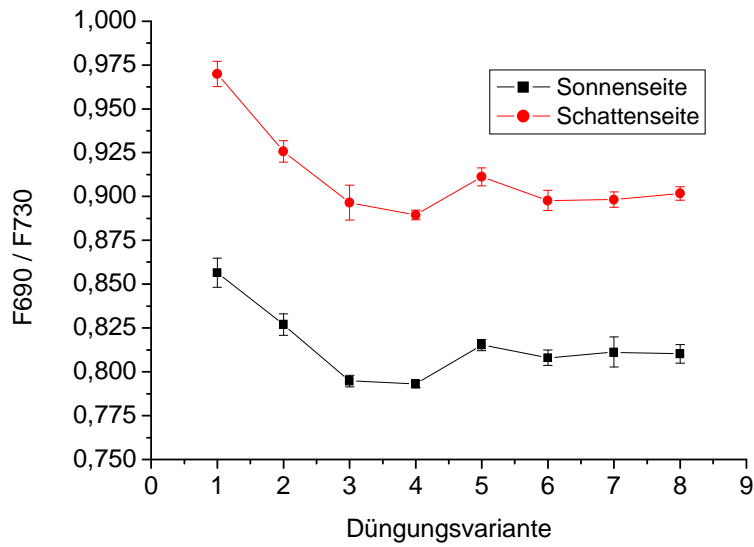


Abbildung 3.2: Verschiebung des gemessenen Fluoreszenzverhältnisses zu kleineren Werten bei direktem Sonnenlichteinfall am Beispiel von Weizen auf dem Standort Seehausen (Sachsen) zu BBCH 45 (31.05.02), Freilandmessung. Die obere Kurve repräsentiert die Ergebnisse der LICF-Messung auf der diffus von der Sonne bestrahlten Seite, während die untere Kurve denselben Pflanzenbestand auf der direkt von der Sonne bestrahlten Seite zeigt.

Nach der Auswertung einer großen Menge von Messdaten von Winterweizen an verschiedenen Standorten konnte empirisch eine lineare Funktion für die Lichtabhängigkeit ermittelt werden (Abbildung 3.3). Während die Messungen im Schatten keine Abhängigkeiten von den einfallenden Lichtintensitäten zeigten (vertikale Linie), zeigte die von der Sonne direkt beschienen Seite eine Abhängigkeit der Messergebnisse F_{690}/F_{730} von der Intensität des einfallenden Lichtes (diagonale Linie). F_{690}/F_{730} fiel hier linear mit steigender Sonnenlichtintensität. Die Abweichung der einzelnen Messpunkte von den beiden Geraden (vertikale und diagonale Linie in Abbildung 3.3) stellt die unterschiedliche N-Versorgung der Feldfrucht dar.

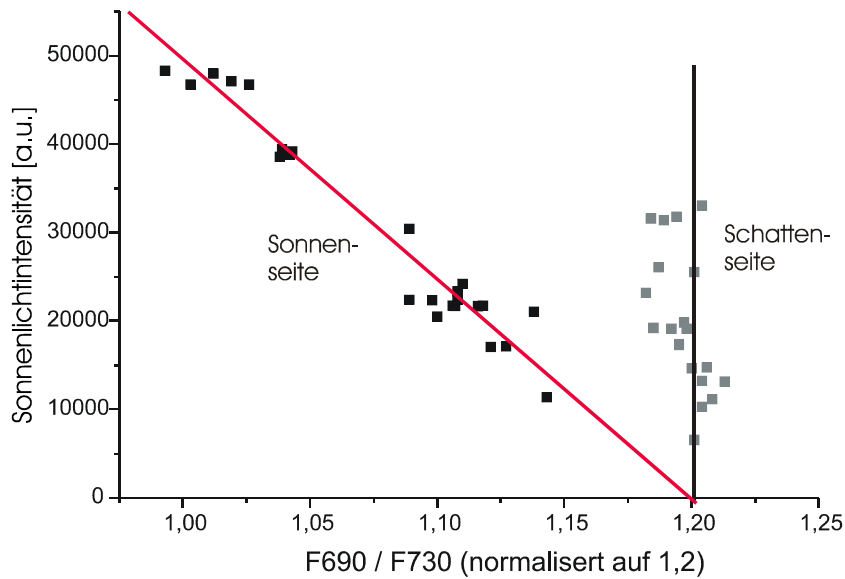


Abbildung 3.3: Abhängigkeit des Verhältnisses F_{690}/F_{730} von der Sonnenlichtintensität [a.u.= arbitrary unit]. Zusammenfassung der Messergebnisse (normiert) von verschiedenen Standorten an Tagen mit direktem Sonnenlichteinfluss, Freilandmessungen zu Getreide. Während die Messungen auf der direkt von der Sonne beschienenen Seite einen linearen Zusammenhang zwischen Lichtintensität und Verhältnis F_{690}/F_{730} zeigen, ist auf der diffus beschienenen Seite kein Einfluss auf das Verhältnis erkennbar. Die Abweichungen der Messpunkte von den Geraden zeigen die unterschiedliche N-Versorgung.

Die zusätzlichen Messungen der Lichtintensitäten ermöglichen eine einfache Korrektur der Messergebnisse mit Hilfe einer linearen Funktion im Falle von Messungen bei direktem Sonnenlichteinfall.

Ergebnisse der Phytokammermessungen

Die Messungen unter definierten Lichtbedingungen in der Phytokammer zeigen dasselbe Phänomen (Abbildung 3.4 bis 3.7): Ab einer bestimmten Schwelle der einfallenden Lichtintensität sinkt das Verhältnis F_{690}/F_{730} mit steigender auf den Pflanzenbestand einfallender Lichtintensität (Abbildung 3.4 und 3.6).

Zusätzliche Messungen mit einem Gaswechsellmessgerät (Porometer) zeigten ab diesem Schwellenwert ebenfalls einen verringerten linearen Anstieg mit der Lichtintensität (Abb. 3.5 und 3.7).

Diese Ergebnisse lassen auf eine Abhängigkeit des beobachteten Phänomens von der photosynthetischen Aktivität in der Pflanze schließen.

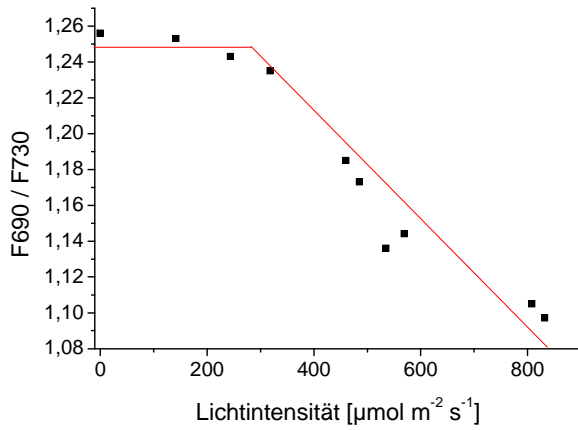


Abbildung 3.4: Zusammenhang zwischen steigender Lichtintensität und dem Fluoreszenzverhältnis F_{690}/F_{730} , Weizen (BBCH 25-30), Klimakammerversuch

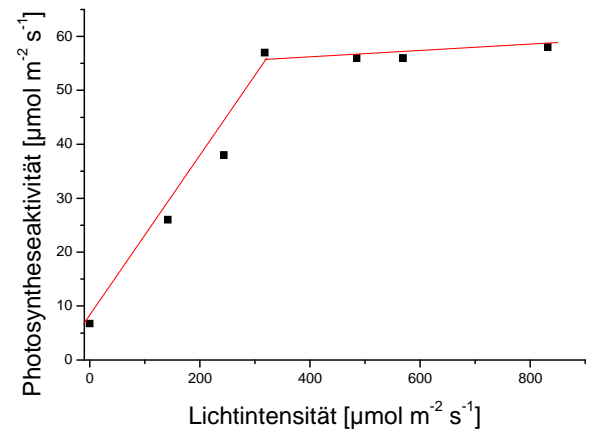


Abbildung 3.5: Zusammenhang zwischen steigender Lichtintensität und Photosyntheseaktivität, Weizen (BBCH 25-30), Klimakammerversuch

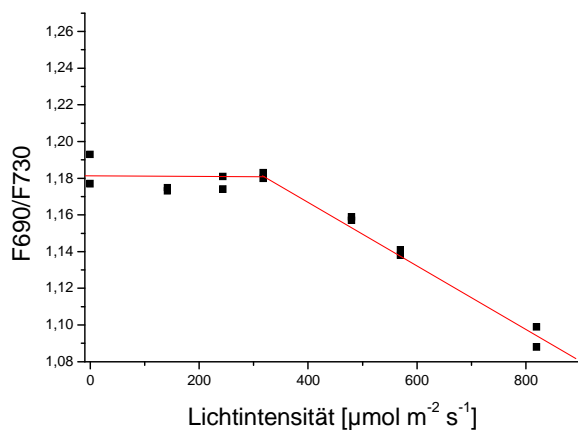


Abbildung 3.6: Zusammenhang zwischen steigender Lichtintensität und dem Fluoreszenzverhältnis F_{690}/F_{730} , Weizen (BBCH 32), Klimakammerversuch

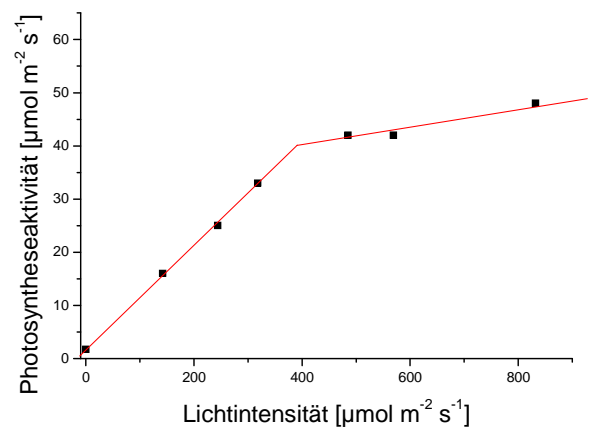


Abbildung 3.7: Zusammenhang zwischen steigender Lichtintensität und Photosyntheseaktivität von Weizenpflanzen (BBCH 32), Klimakammerversuch

3.4 Physikalische Modellierung

Um ein genaues Verständnis der zugrunde liegenden physikalischen und biologischen Mechanismen zu erhalten, wird die im bestrahlten Blatt der zu messenden Pflanze stattfindende Licht-Materie-Wechselwirkung genauer betrachtet.

Ein Blatt der Dicke D wird bestrahlt vom Sonnenlicht und von einem roten Laser. Im Blatt vorhandene Chlorophyllmoleküle werden angeregt, absorbieren Licht und emittieren einen Teil davon wieder als Fluoreszenzstrahlung mit einer gewissen Zeitverzögerung. Fluoreszenz wird immer mit längerer Wellenlänge (energieärmer) abgestrahlt als die absorbierte Strahlung. Die Fluoreszenzstrahlung wird detektiert bei 690 nm und bei 730 nm.

Die Abschwächung der Intensität von Licht auf seinem Weg durch Materie wird durch das Lambert-Beer-Gesetz beschrieben:

$$I(z) = I_0 e^{-kz} = I_0 e^{-(c\alpha_{\text{ex}} + \beta_{\text{ex}})z} \quad (3.1)$$

$I(z)$	=	einfallende Lichtintensität in Tiefe z
I_0	=	einfallende Lichtintensität in Tiefe 0
c	=	Konzentration des absorbierenden Materials
α_{ex}	=	Absorptionskoeffizient des Anregungslichtes
β_{ex}	=	Streukoeffizient des Anregungslichtes
k	=	$c\alpha_{\text{ex}} + \beta_{\text{ex}}$

[Günther et al., 1993] leiteten eine auf diesem Gesetz basierende Formel ab, die die Abhängigkeit des Verhältnisses F_{690}/F_{730} von der Chlorophyllkonzentration, den spezifischen Absorptionskoeffizienten, den Streukoeffizienten und der Blattdicke zeigt.

$$\left(\frac{F_{690}}{F_{730}} \right)_{\lambda_{\text{ex}}} = \frac{\phi_{690} (\beta_2 + c\alpha_2) \left(e^{-(\beta_1 + c\alpha_1)D} - 1 \right)}{\phi_{730} (\beta_1 + c\alpha_1) \left(e^{-(\beta_2 + c\alpha_2)D} - 1 \right)} \quad (3.2)$$

λ_{ex}	=	Anregungswellenlänge
ϕ_{690}	=	Fluoreszenzeffizienz bei 690 nm

ϕ_{730}	=	Fluoreszenzeffizienz bei 730 nm
c	=	Chlorophyllkonzentration
α_1	= $\alpha_{690} + \alpha_{ex}$;	α_{690} = Absorptionskoeffizient bei 690 nm
		α_{ex} = Absorptionskoeffizient bei Anregungswellenlänge
α_2	= $\alpha_{730} + \alpha_{ex}$;	α_{730} = Absorptionskoeffizient bei 730 nm
β_1	= $\beta_{690} + \beta_{ex}$;	β_{690} = Streukoeffizient bei 690 nm
		β_{ex} = Streukoeffizient bei Anregungswellenlänge
β_2	= $\beta_{730} + \beta_{ex}$;	β_{730} = Streukoeffizient bei 730 nm
D	=	Blattdicke

Diese Formel basiert auf der Annahme, dass die Fluoreszenzeffizienzen konstant über die Blattdicke sind.

Wir nehmen jedoch in Übereinstimmung mit **[Krause & Weis, 1991]** an, dass mit genügender Einstrahlung auf die Blattoberfläche die Fluoreszenzeffizienzen in den oberen Schichten des Blattes abnehmen, da das Photosynthesystem energetisch in Sättigung geht. Der Abfall der Fluoreszenzeffizienzen ist gekoppelt mit einer Änderung der Fluoreszenz-Quenching- (Absenkungs-) Mechanismen. Mit zunehmender Lichteinstrahlung werden die gesättigten photochemischen Quenching-Mechanismen (q_P) durch nichtphotochemisches Quenching (q_N) ergänzt. Diese nichtphotochemischen Quenching-Mechanismen wandeln überschüssige Anregungsenergie in Wärme um. Es wurden zwei Schutzmechanismen des nichtphotochemischen Quenchings unter Starklichtbedingungen identifiziert **[Krause & Weis, 1991; Horton & Hague, 1988]**. Der erste Mechanismus, das „energieabhängige“ Quenching (q_E), wird zurückgeführt auf den Aufbau eines transmembranen pH-Gradienten in den Thylakoid-Membranen unter Verwendung von H^+ aus dem wasserspaltenden System der Photosynthese **[Weis & Berry, 1987; Fernyhough et al., 1984]**. Falls die Lichtintensitäten die Schwelle der energetischen Sättigung der photosynthetischen CO_2 -Assimilation überschreiten und q_E ebenfalls gesättigt ist, wird q_E durch einen zweiten Mechanismus, das „photoinhibitorische“ Quenching (q_I), ergänzt, der vermutlich durch eine Modifikation von Reaktionszentren hervorgerufen wird, die zwar weiterhin als Energiesenken wirken, aber nicht mehr die normalen photochemischen Reaktionen durchführen können **[Cleland et al., 1986]**. Es wurde gezeigt, dass beide Quenching-Mechanismen linear mit dem Abfall der Quantenausbeute der Photosynthese korreliert sind **[Krause & Weis, 1991; Demmig & Björkman, 1987; Laasch, 1987; Briantais et al., 1979]**.

Das vom Laserstrahl des Sensors induzierte Fluoreszenzlicht stammt daher aus durchschnittlich tieferen Schichten des Pflanzenblatts, da die Fluoreszenzeffizienzen der oberen Blattschichten gegenüber dem ungesättigten Blatt reduziert sind. Da die Streuung des Fluoreszenzlichtes auf seinem Weg zur Blattoberfläche wellenlängenabhängig ist (siehe unten), sind die Streuverluste der detektierten Fluoreszenzstrahlung unterschiedlich für die zwei gemessenen Wellenlängen und abhängig von der Weglänge des Fluoreszenzlichtes im Pflanzenblatt. Die mittlere Weglänge wächst mit steigender energetischer Sättigung der oberen Blattschichten, da dann das Fluoreszenzlicht im Mittel aus tieferen Blattschichten stammt.

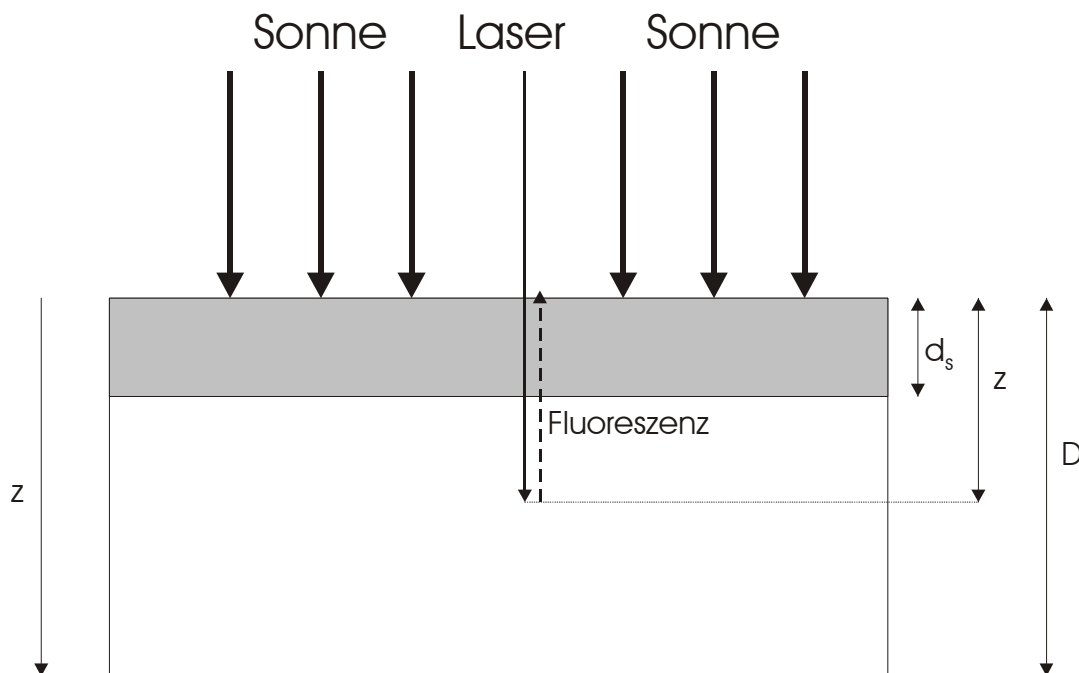


Abbildung 3.8: Modellquerschnitt eines Getreideblattes; d_s repräsentiert die Dicke der Schicht, in der das Photosynthesesystem bei starkem Sonnenlicht energetisch gesättigt ist; z symbolisiert die Tiefe, in der das Laserlicht des Sensors absorbiert wird und aus der die Fluoreszenzstrahlung emittiert wird; D repräsentiert die Blattdicke.

Abbildung 3.8 zeigt einen modellhaften Querschnitt durch ein Getreideblatt. Folgende Annahmen werden getroffen:

1. Das Laserlicht wird vollständig im Blatt absorbiert.
2. Bei starkem einfallenden Sonnenlicht findet in den oberen Blattschichten eine energetische Sättigung des Photosynthesesystems statt. Dies bewirkt eine Abnahme der Fluoreszenzeffizienzen in diesen Schichten.
3. Im Blatt findet Rayleigh- und Mie-Streuung der einfallenden Strahlung sowie der Fluoreszenzstrahlung statt. Die Stärke des Effekts ist umgekehrt proportional zur 4. Potenz (Rayleigh-Streuung) und bis zur 2. Potenz (Mie-Streuung) der Wellenlänge. Das

bedeutet, dass die Fluoreszenz der Wellenlänge 690 nm stärkerer Streuung unterliegt als die der Wellenlänge 730 nm.

Die Intensität der laserinduzierten Fluoreszenzstrahlung, die aus der Tiefe z stammt, wird auf ihrem Weg zur Blattoberfläche abgeschwächt durch Absorption und Streuung:

$$f(z) = \phi_{\lambda} I(z) c \alpha_{ex} e^{-k'z} \quad (3.3)$$

- $f(z)$ = Fluoreszenzintensität aus Tiefe z
- Φ_{λ} = Fluoreszenzeffizienz bei Wellenlänge λ
- k' = $c\alpha_{\lambda} + \beta_{\lambda}$
- α_{λ} = Absorptionskoeffizient bei Wellenlänge λ
- β_{λ} = Streukoeffizient bei Wellenlänge λ

Anwendung des Lambert-Beer-Gesetzes (3.1) ergibt

$$f(z) = \phi_{\lambda} I_0 c \alpha_{ex} e^{-z(k+k')} \quad (3.4)$$

Wir definieren eine Sättigungs-Lichtintensität I_S , ab der eine energetische Sättigung des Photosynthesesystems beginnt. Falls die Intensität des einfallenden Lichts I_0 größer als I_S ist, tritt eine Sättigung bis zu einer Tiefe d_S von der Blattoberfläche aus auf, in der die Lichtintensität gleich I_S ist. Durch erneute Anwendung von Formel (3.1) erhalten wir

$$d_S = -\frac{1}{\beta_{ex} + c\alpha_{ex}} \ln\left(\frac{I_S}{I_0}\right) \quad \text{für } I_0 \geq I_S \quad (3.5a)$$

und

$$d_S = 0 \quad \text{für } I_0 < I_S. \quad (3.5b)$$

Wir nehmen einen linearen Anstieg der Fluoreszenzeffizienz $\phi_{\lambda S}$ mit abnehmender Lichtintensität von der Blattoberfläche bis zu d_S an. Bei weiter zunehmender Tiefe bleibt die Fluoreszenzeffizienz ϕ_λ konstant, da in diesen Tiefen keine Sättigung des Photosynthesesystems aufgetreten ist:

$$\phi_\lambda = \text{const.} \quad \text{für } z > d_S \quad (3.6a)$$

und

$$\phi_{\lambda S} = \phi_\lambda - a(I(z) - I_S) = \phi_\lambda - a(I_0 e^{-kz} - I_S) \quad \text{für } z \leq d_S \quad (3.6b)$$

a = Stärke des Fluoreszenz-Quenchings

Die Gesamtmenge der Fluoreszenz bei gegebener Wellenlänge über die Blattdicke ist daher

$$F_\lambda = \int_0^D f(z) dz = I_0 c \alpha_{ex} \left(\int_0^{d_S} (\phi_\lambda + a I_S - a I_0 e^{-kz}) e^{-z(k+k')} dz + \phi_\lambda \int_{d_S}^D e^{-z(k+k')} dz \right) \quad (3.7)$$

$$F_\lambda = I_0 c \alpha_{ex} \left(\frac{1}{k+k'} (\phi_\lambda (1 - e^{-D(k+k')}) + a I_S (1 - e^{-d_S(k+k')})) - \frac{a I_0}{2k+k'} (1 - e^{-d_S(2k+k')}) \right) \quad (3.8)$$

Das Fluoreszenzverhältnis kann schließlich modelliert werden als

$$\frac{F_{690}}{F_{730}} = \frac{\frac{1}{\beta_1 + c\alpha_1} (\phi_{690} (1 - e^{-D(\beta_1 + c\alpha_1)}) + a I_S (1 - e^{-d_S(\beta_1 + c\alpha_1)})) - \frac{a I_0}{\beta_{ex} + c\alpha_{ex} + \beta_1 + c\alpha_1} (1 - e^{-d_S(\beta_{ex} + c\alpha_{ex} + \beta_1 + c\alpha_1)})}{\frac{1}{\beta_2 + c\alpha_2} (\phi_{690} (1 - e^{-D(\beta_2 + c\alpha_2)}) + a I_S (1 - e^{-d_S(\beta_2 + c\alpha_2)})) - \frac{a I_0}{\beta_{ex} + c\alpha_{ex} + \beta_2 + c\alpha_2} (1 - e^{-d_S(\beta_{ex} + c\alpha_{ex} + \beta_2 + c\alpha_2)})} \quad (3.9)$$

Verglichen mit Formel (3.2) wurden hier die neuen Parameter d_S (korreliert mit I_S nach Formel (3.5)) und a eingeführt, die die Dicke der gesättigten Blattschicht (korreliert mit der Sätti-

gungs-Lichtintensität) bzw. die Stärke des Fluoreszenz-Quenchings im Pflanzenblatt mit zunehmendem einfallenden Licht repräsentieren. Diese Parameter beeinflussen das Verhältnis F_{690}/F_{730} in Abhängigkeit von der Lichtintensität. Setzt man in Formel (3.9) $d_s=0$ (keine Sättigung), so erhält man Formel (3.2).

Anwendung des physikalischen Models

Wenn wir gemäß Formel (3.9) den Einfluss des Lichtes auf das Verhältnis F_{690}/F_{730} berechnen, erhalten wir das in Abbildung 3.9 dargestellte Ergebnis. Die Intensität des einfallenden Sonnenlichts wurde zwischen den dargestellten Kurven linear erhöht. Dies führt zu einer linearen Abnahme von F_{690}/F_{730} .

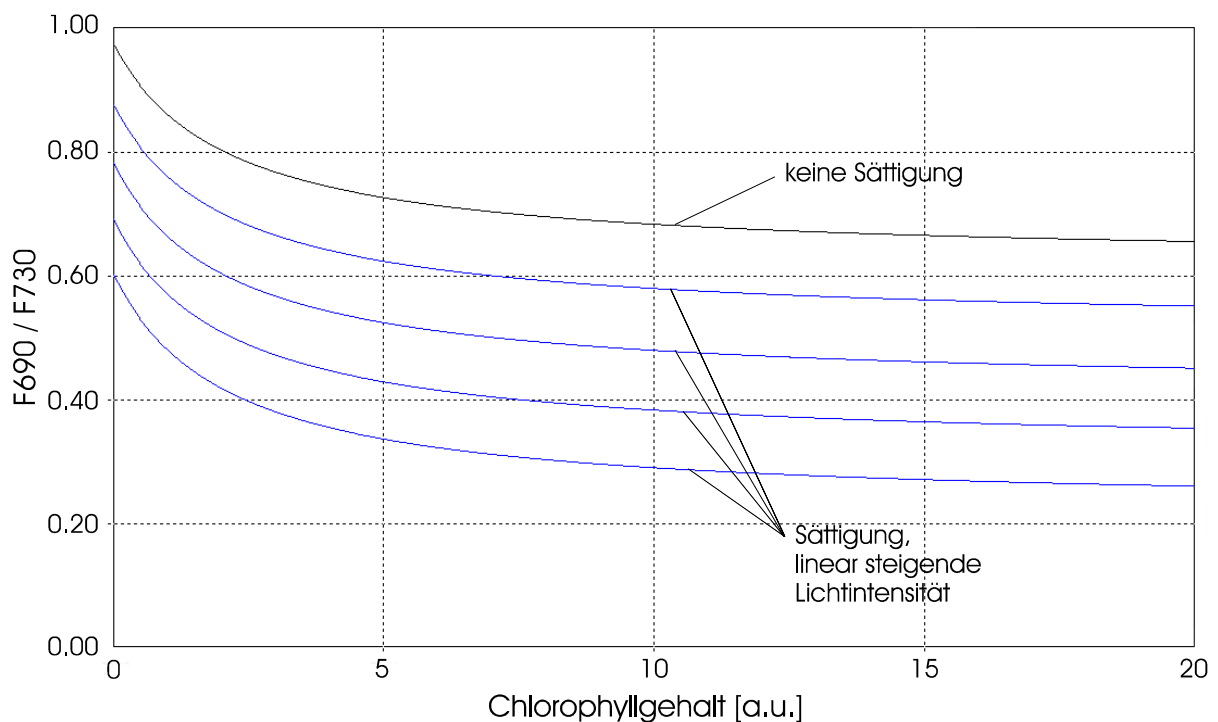


Abbildung 3.9: Ergebnisse der Computersimulation nach Formel (3.9). Diese zeigen den Einfluss von linear steigender, auf die Blattoberfläche auftreffender Lichtintensität. Mit steigender Lichtintensität sinkt das Verhältnis F_{690}/F_{730} linear.

Mit ansteigender mittlerer Tiefe der Fluoreszenz-Emission, verursacht durch reduzierte Fluoreszenzeffizienzen in der gesättigten Schicht mit Tiefe d_s , steigt die mittlere Weglänge der Fluoreszenzstrahlung durch das Blatt zur Blattoberfläche. Aufgrund der Rayleigh- und Mie-

Streuung ergibt sich durch den längeren Weg zur Oberfläche ein stärkerer Abfall der Fluoreszenzintensität bei kürzeren Wellenlängen (umgekehrt proportional bis zur 4. Potenz der Wellenlänge). Dieses Verhalten entspricht den mit dem Sensor erzielten Messergebnissen.

3.5 Diskussion der Ergebnisse

Das physikalische Modell der Effekte der energetischen Sättigung des Photosynthesesystems in den oberen Schichten des Pflanzenblattes lässt den Grund des Abfalls des Quotienten F_{690}/F_{730} unter starkem, direktem Sonnenlichteinfluss erkennen. Unter diesen Bedingungen sorgt die aufgrund der Rayleigh- und Mie-Streuung unterschiedlich starke Streuung der zwei gemessenen Wellenlängen des Fluoreszenzlichtes von den Chlorophyllmolekülen, die Fluoreszenz aus im Mittel tieferen Blattschichten aussenden, auf dem Weg zur Blattoberfläche für das reduzierte Fluoreszenzverhältnis.

Wie die Messergebnisse zeigen, findet eine Sättigung des Photosynthesesystems nur statt, wenn das zu messende Blatt dem direkten Sonnenlicht, d.h. Licht vorzugsweise aus einer Richtung, ausgesetzt ist. Bei Vorhandensein von diffusem Licht, wie z.B. bei bewölktem Himmel oder nur einer einzelnen Wolke, welche die Sonne verdeckt oder einem Blatt, das nicht direktem Sonnenlicht ausgesetzt ist, reicht die Lichtintensität nicht aus, um eine Sättigung der angeregten Chlorophyllmoleküle in den obersten Blattschichten zu bewirken.

Der gemessene Schwellenwert der Lichtintensität für Weizen, gemessen in der Klimmakammer, ab welcher die energetische Sättigung des Photosynthesesystems in den oberen Schichten des Pflanzenblattes beginnt (ungefähr $350 - 400 \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} = 350 - 400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), stimmt gut überein mit Werten aus der Literatur [**Lichtenthaler & Rinderle, 1988**], in welcher eine beginnende Lichtsättigung ebenfalls bei ungefähr $350 - 400 \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ für die Blätter vieler Pflanzen angegeben ist.

Eine Lichtabhängigkeit für das Verhältnis F_{690}/F_{730} wurde qualitativ in [**Agati et al., 1995; Valentini et al., 1994**] beschrieben. Während diese Autoren einen direkten Einfluß von Lichtstresseffekten in der Photosynthese wie Chloroplastenbewegung oder strukturelle Umänderung im Blatt [**Valentini et al., 1994**] oder verschiedene Schädigungsgrade der Photosysteme I und II [**Agati et al., 1995**] auf das Fluoreszenzemissionsverhältnis annehmen, geht

unser Modell lediglich von einer Wirkung des bekannten, wellenlängenunabhängigen Fluoreszenz-Quenching-Effekts unter Berücksichtigung des wellenlängenabhängigen Streuverhaltens von Licht im Pflanzenblatt aus.

In [Günther et al., 1994] konnte kein Einfluss der Lichtintensität auf den Quotienten F_{690}/F_{730} bei der Messung des Blattwerks von Eichenbäumen gefunden werden. Dieses Ergebnis könnte eine oder beide der folgenden Ursachen haben: Der Himmel war bei der Messung zumindest zeitweise gering bewölkt, was wiederum schattige Bedingungen bedeutet, selbst wenn eine hohe Globalstrahlung zum Messtermin vorhanden war. Ferner könnte die Messung an Teilen der Pflanzen durchgeführt worden sein, die nicht dem direkten Sonnenlicht ausgesetzt waren.

In [Stober & Lichtenthaler, 1993] wurde ein Einfluss des Lichtes auf das Verhältnis F_{690}/F_{730} beobachtet. Die Autoren nahmen aber nur einen geringen Einfluss auf die Messergebnisse an.

[Bredemeier, 2005; Bredemeier & Schmidhalter, 2001] fanden nahezu keinen Einfluss der Lichtbedingungen auf das Verhältnis von F_{690}/F_{730} bei ihren Messungen in der Phytokammer, obwohl die Lichtintensitäten analog zu denen im Rahmen dieser Arbeit von 0 bis ungefähr $800 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ variiert wurden. Dieses Verhalten kann darauf zurückgeführt werden, dass die Messung von F_{690}/F_{730} horizontal in der Mitte einzelner Pflanztöpfe (Mitscherlichgefäße) mit einem anderen als dem von uns verwendeten Messgerät aus einer Entfernung von 17 cm erfolgte. Der Lichteinfall in der Klimakammer erfolgte senkrecht. Die mittleren Pflanzenteile, die horizontal gemessen wurden, wurden von den oberen Pflanzenteilen teilweise bedeckt. Die tatsächliche Lichtintensität in der gemessenen Pflanzenregion war demzufolge wesentlich niedriger als die der senkrecht einfallenden Strahlung. Durch die so durchgeführte Schattensmessung wird die tatsächliche Lichtintensität vermutlich unterhalb von $350 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ gelegen haben.

3.6 Anwendung des Modells zur Erklärung der Temperaturabhängigkeit

Eine Temperaturabhängigkeit des Fluoreszenzverhältnisses F_{690}/F_{730} wird von [Agati et al., 2000; Agati et al., 1997; Agati et al., 1996] sowie von [Bredemeier, 2005] beschrieben, wobei der Quotient F_{690}/F_{730} bei Temperaturerhöhungen von 5 bis 25 °C stetig anstieg. Messungen wurden an verschiedenen Pflanzenarten [Agati et al., 2000; Agati et al., 1997; Agati et al., 1996] sowie an *Ficus benjamins* und Weizen [Bredemeier, 2005] durchgeführt.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten LICF-Messungen zur Temperaturabhängigkeit vom Weizen und deren Ergebnisse sind der Abbildung 3.10 zu entnehmen. Angaben zur Versuchsdurchführung sind im Teil Material und Methoden unter 3.2 zum Weizen aufgeführt.

Wie in Abbildung 3.10 gezeigt, steigt der Quotient F_{690}/F_{730} linear mit der Temperatur an, um dann bei 23 °C konstant zu bleiben. Diese Ergebnisse stimmen mit Agati et al. und Bredemeier überein, wobei unsere Messungen auch über 25 °C hinaus bis zur Temperatur von 33 °C durchgeführt wurden. Somit kann neben der linearen Abhängigkeit des Quotienten F_{690}/F_{730} von der Temperatur (im Bereich von 8 bis 23 °C) auch ein konstanter Bereich des Quotienten F_{690}/F_{730} beschrieben werden, bei dem dieser unabhängig von der Temperatur bleibt (Temperatur im Bereich von 23 bis 33 °C).

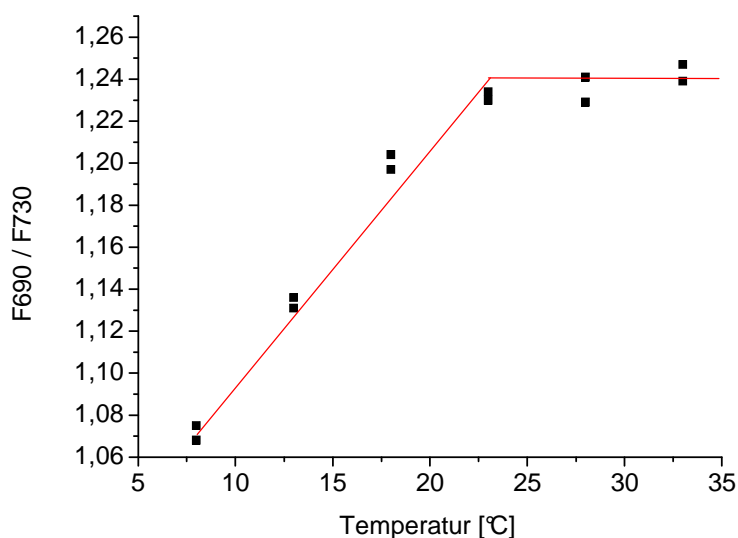


Abbildung 3.10: Zusammenhang zwischen steigender Temperatur und dem Fluoreszenzverhältnis F_{690}/F_{730} , Weizen (BBCH 25-30), Klimakammerversuch

[Agati et al., 1997; Agati et al., 1996] führten diesen Effekt zunächst auf unterschiedliche Temperaturprofile von Photosystem I und Photosystem II zurück. Später zeigten [Agati et al., 2000] einen vergleichbaren Einfluß der Temperatur auf die Fluoreszenz beider Photosysteme I und II. Da die meisten Fluoreszenz-Quenchingmechanismen mit Photosystem II gekoppelt sind, vermuteten sie einen auf dem Zustandsübergang zwischen den Photosystemen basierenden Mechanismus. Jedoch kann auch der Einfluss der Temperatur unabhängig von den Photosystemen (wie durch vergleichbare Temperaturabhängigkeiten beider Photosysteme zu vermuten ist) mit Hilfe des physikalischen Modells der Licht-Materie-Wechselwirkung im Pflanzenblatt beschrieben und erklärt werden:

Die Nettphotosyntheserate A (entspricht Energieverbrauch des Photosyntheseapparates) eines offenen Systems ist:

$$A = (\Delta C * F) / B$$

$$\Delta C = \text{CO}_2\text{-Aufnahme } (\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1})$$

$$F = \text{Luftstrom } (\text{mol s}^{-1})$$

$$B = \text{Blattoberfläche } (\text{m}^2)$$

Bei gegebener Blattoberfläche (B) und konstantem Luftaustausch (F) ist A nur noch abhängig von ΔC .

Die Netto-Photosyntheserate ist abhängig von der Temperatur [Häder, 1999] und erreicht bei den C_3 -Pflanzen eine Sättigung bei Temperaturen um die 23°C , was auch in Abbildung 3.10 zu sehen ist. Getreide sowie Bohnen gehören zu den C_3 -Pflanzen.

Damit kann bei konstanter ausreichender Energiezufuhr zur Photosynthese (= konstantes Lichtangebot) mit sinkender Temperatur nur ein geringer werdender Teil der zugeführten Energie für die Photosynthese verwendet werden. Dies bedeutet einen geringeren „Energieabfluss“ aus den Reaktionszentren in Richtung Photosynthese.

Um Schaden am Photosynthesesystem zu verhindern, tritt nichtphotochemisches Quenching auf (siehe oben). Dies führt zu einer Verminderung der Fluoreszenzeffizienzen. Erst ab Temperaturen um 23°C wird die energetische Sättigung des Photosynthesesystems temperaturunabhängig, da die Nettphotosyntheserate die Sättigung erreicht hat.

Bei Temperaturen unterhalb von 23°C erfolgt mit sinkender Temperatur die Fluoreszenzemission aus durchschnittlich tieferen Blattschichten, da die Fluoreszenzeffizienzen in den oberen Schichten abnehmen. Dies erfolgt aufgrund der abnehmenden Nettphotosyntheserate bei ausreichendem Lichtangebot und der damit verbundenen Sättigung der Photochemie in

zunehmender Tiefe in den oberen Blattschichten. Hier greift erneut der in diesem Kapitel beschriebene Effekt der wellenlängenabhängigen Streuung. Dies führt zu einem Absinken des Quotienten F_{690}/F_{730} mit sinkender Temperatur.

3.7 Schlussfolgerungen

Eine Lichtabhängigkeit des Verhältnisses F_{690}/F_{730} wurde unter bestimmten Lichtverhältnissen bei der Messung der laserinduzierten Fluoreszenz in Getreidebeständen beobachtet. Das Auftreten eines energetischen Sättigungseffektes des Photosynthesystems in den oberen Blattschichten von Pflanzenblättern, die direktem Sonnenlicht ausgesetzt sind, führt zu reduzierten Fluoreszenzeffizienzen und damit zu größeren mittleren Tiefen der Fluoreszenzemission. Dies führt aufgrund der wellenlängenabhängigen Lichtstreuung zu einem Abfall des durch den Laserstrahl eines Sensorsystems induzierten und vom Sensorsystem gemessenen Chlorophyllfluoreszenzverhältnisses F_{690}/F_{730} . Dieser Abfall erfolgt linear mit steigender Lichtintensität. Diese Lichtabhängigkeit konnte erfolgreich modelliert werden.

Dieser lineare Effekt tritt nur dann auf, wenn Pflanzenblätter, die vom Sensorsystem gemessen werden, direktem, ungehindertem Sonnenlicht ausgesetzt sind. Nur unter diesen Bedingungen müssen die Messwerte im Hinblick auf den Einsatz dieses Messverfahrens zur teilflächenspezifischen N-Düngung korrigiert werden. Die Korrektur kann einfach erfolgen, wenn zusätzliche Lichtsensoren die Intensität des Sonnenlichtes in derselben und der gegenüberliegenden Richtung der Fluoreszenzmessung erfassen. Diese zwei Lichtsensoren erlauben die Erkennung von direktem Sonnenlicht und eine Korrektur des Messwertes F_{690}/F_{730} auf der sonnenbeschienenen Seite.

Der beschriebene energetische Sättigungseffekt liefert auch eine Erklärung für die beobachtete Temperaturabhängigkeit des induzierten Chlorophyllfluoreszenzverhältnisses unterhalb von 23 °C. Hier ist ein linearer Anstieg des Verhältnisses mit der Temperatur beobachtbar. Dieses Verhalten ist auf die ansteigende Nettophotosyntheserate von C₃-Pflanzen bis 23 °C zurückführbar. Der Abfluss der Anregungsenergie aus den Reaktionszentren in Richtung Photosynthese ist unterhalb dieser Temperatur reduziert. Dies führt zu reduzierten Fluoreszenzeffizienzen durch nichtphotochemische Quenchingmechanismen in den oberen Blattschichten bereits bei niedrigeren Gesamtlichtintensitäten.

Durch Messung der Umgebungstemperatur lässt sich auch dieser lineare Effekt einfach korrigieren.

4 N-Gehalts- und Biomassebestimmungen von Raps mit Hilfe der laserinduzierten Chlorophyllfluoreszenz im Feldversuch

Schlageinheitliche N-Düngung kann auf heterogenen Schlägen zu lokaler Über- und Unterversorgung führen. Für die variable, bedarfsgerechte N-Düngung werden geeignete Sensorsysteme benötigt. Bisher in der Praxis eingesetzte Sensorlösungen basieren auf Messungen der Reflexion von Pflanzenbeständen.

Ein alternatives Messverfahren, die laserinduzierte Chlorophyllfluoreszenz (LICF), ist im Feldversuch geprüft worden. Ein wesentlicher Vorteil der LICF ist darin zu sehen, dass der Boden kein Störsignal liefert, da die zu messenden Signale nur von chlorophyllhaltigen Pflanzengewebe ausgesendet werden.

Ziel der vorliegenden Untersuchung war, die LICF als eine Messmethode zur Bestimmung des N-Gehaltes und erstmalig zur Bestimmung der Biomasse im Feldbestand zu prüfen und die Genauigkeit dieser Messmethode zu bewerten. Vergleichende Untersuchungen, wie Bestimmung des chemischen N-Gehaltes, Trockenmassebestimmung und Reflexionsmessungen, wurden in einem unterschiedlich mit N gedüngten Rapsbestand durchgeführt.

Die LICF spiegelt mit dem Parameter F_{690}/F_{730} sehr gut den N-Gehalt ($R^2=0,98$) und mit dem Parameter BDI_{LICF} die Biomasse ($R^2=0,98$) des Pflanzenbestandes wider. Im Vergleich zu Messverfahren auf Basis der Reflexion konnte mit Hilfe der laserinduzierten Chlorophyllfluoreszenz eine bessere Auflösung bei höheren N-Gehalten erreicht werden. Auch die Biomasse wird durch die LICF besser widerspiegelt und diese erlaubt im Gegensatz zur Reflexionsmessung eine messtechnisch unabhängige Bestimmung des N-Gehalts (F_{690}/F_{730}) und der Biomasse (BDI_{LICF}).

4.1 Einführung

Ackerschläge sind durch eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Heterogenität des Bodens und des Reliefs gekennzeichnet. Auf Ackerschlägen mit einer stark ausgeprägten Heterogenität, das heißt starker kleinräumiger Variabilität, ist eine teilflächenspezifische N-Düngung der schlageinheitlichen N-Düngung vorzuziehen, da sich die kleinräumige Variabilität des Standortes auf die Ertragsbildung und auf die Nährstoffaufnahme der angebauten Kultur auswirkt.

Positive ökonomische und ökologische Effekte können durch die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung auf diesen Standorten erzielt werden [Ancev et al., 2005; Schmerler & Jürschik, 1997; Malzer et al., 1996; Swinton & Ahmad, 1996; Reetz & Fixen, 1995], die sich aus Ertrags- und Qualitätssteigerungen sowie reduziertem N-Einsatz ergeben.

Geeignete Sensorlösungen zur teilflächenspezifischen N-Düngung werden daher benötigt, die es während des Düngevorganges ermöglichen, den Stickstoffbedarf der Pflanzen kleinräumig zu erfassen.

Bisher in der Praxis erfolgreich eingesetzte Methoden beruhen auf der Basis von Reflexionsmessungen. Diese weisen allerdings die Problematik auf, dass sie ein Mischsignal zwischen Boden und Pflanze [Reusch, 1997] darstellen. Ebenso verändern sich die Reflexionseigenschaften eines Bestandes durch Variation des Bodentyps, durch Vorhandensein von Steinen, Kluten und organischen Materialien in Form von Mulchauflagen [Nagler et al., 2000; Daughtry et al., 1995]. Das spielt gerade bei geringen Bodenbedeckungsgraden der Pflanzen zu frühen Pflanzenstadien oder in dünnen Beständen zu späteren Pflanzenwachstumsstadien eine wesentliche Rolle. Der Blattflächenindex muss eine Mindestgröße von 3 im sichtbaren Bereich oder von 6 im Nahinfrarotbereich haben [Guyot, 1990], damit der Boden keinen Einfluss mehr auf das Reflexionsmesssignal nimmt. Problematisch kann sich daher die Messung in dünnen oder in stark wechselnden Beständen mit starker Variation der Bestandesdichte erweisen. Aber genau diese wechselnden Bestände sind Gegenstand der variablen Stickstoffdüngung.

Die laserinduzierte Chlorophyllfluoreszenz (LICF) eröffnet hier neue viel versprechende Perspektiven. Ein großer Vorteil der LICF ist darin zu sehen, dass Fluoreszenzsignale nur von den Pflanzen selber ausgehen und der Boden keinen Einfluss auf das Messsignal nimmt. Die Chlorophyllfluoreszenz ist eine Reaktion des Photosyntheseapparates, bei der aufgenommene überschüssige Energie, die nicht in die photochemische Reaktion eingeht oder als Wärmestrahlung abgegeben wird, von der Pflanze als Fluoreszenzlicht abgestrahlt wird [Lichtenhaler, 1986]. Mit dem Messverfahren der LICF kann die N-Versorgung im Feldbestand sowohl im Nahbereich der Pflanzen [Schächtl et al., 2005] als auch im entfernten Bereich der Pflanzen (Abstand Pflanzen und Messsystem ca. 3-4 m) gemessen werden [Bredemeier & Schmidhalter, 2005]. Die Messung des N-Gehaltes der Pflanze erfolgt wie bei der Refle-

xionsmessung indirekt über die Messung des Chlorophyllgehaltes der Pflanze. Das Verhältnis der Fluoreszenzsignale bei 690 nm und 730 nm ist ein Maß für den Chlorophyllgehalt der Pflanzen [Lichtenthaler & Rinderle, 1988; Chappelle et al., 1984a]. Das Absorptionsmaximum von Chlorophyll-a für Licht liegt bei ca. 670 nm [Häder, 1999] und die Fluoreszenzmaxima bei ca. 680 - 730 nm [Häder, 1999]. Diese beiden Maxima liegen eng beieinander, die Banden überlappen sich. Je mehr Chlorophyll vorhanden ist, desto stärker kann die emittierte Fluoreszenzstrahlung wieder von benachbarten, nicht angeregten Chlorophyllmolekülen reabsorbiert werden. Das Fluoreszenzsignal wird dabei stärker bei 690 nm reabsorbiert als bei 730 nm. Das bedeutet, dass eine Erhöhung des Chlorophyllgehaltes den Quotienten F_{690}/F_{730} absinken lässt. Da N der Hauptbestandteil von Chlorophyll ist, kann mit Hilfe der LICF der N-Gehalt der Pflanze bestimmt werden [Bredemeier & Schmidhalter, 2005; Schächtl et al., 2005; Chappelle et al., 1984b].

Da nur fluoreszierende Gewebe Signale liefern, kann man durch die Messung und die statistische Auswertung der Fluoreszenzsignale den zusätzlichen Parameter Biomasse bzw. Bestandesdichte (BDI_{LICF}) gewinnen. Die Möglichkeit, Biomasse basierend auf der LICF flächig im Felde zu bestimmen, wurde in dieser Arbeit erstmalig untersucht.

Ziel der vorliegenden Untersuchungen war es, den Parameter F_{690}/F_{730} mittels laserinduzierter Chlorophyllfluoreszenz im Hinblick auf die Bestimmung des N-Gehaltes im Feldbestand zu prüfen. Ebenfalls wurde der neu gewonnene Parameter BDI_{LICF} auf die Genauigkeit im Hinblick auf die Bestimmung der vorliegenden Biomasse im Feldversuch bewertet. Messungen mittels LICF werden vergleichend zur Reflexion dargestellt und bewertet. Die Feldmessungen erfolgten zu Raps zum Zeitpunkt der 2. N-Gabe.

4.2 Material und Methoden

Pflanzenmaterial

Winterraps (*Brassica napus L.*) wurde im September 2003 auf dem Versuchsfeld der Versuchsstation Dürnast in Freising (TU München) in gleichmäßiger Saatstärke ausgesät. Im Herbst desselben Jahres bekam der Raps eine Startergabe von 40 kg N/ha, um die Entwicklung des Raps zu beschleunigen, damit er gut entwickelt in den Winter gehen konnte.

Zum Zeitpunkt der ersten N-Gabe zu Vegetationsbeginn (Ende Blattentwicklung: BBCH 19) im März 2004 wurde der Raps unterschiedlich mit N behandelt. Die Andüngung erfolgte mit 4 N-Düngungsvarianten in je 4-facher Wiederholung in randomisierter Anlage. Die Düngungsvarianten wurden wie folgt festgelegt: 0, 50, 100 und 150 kg N/ha, wobei 100 kg N der ortsüblichen N-Düngung entsprach. Die Länge einer Parzelle betrug 50 m und der Fahrgassenabstand 16 m.

Die N_{\min} -Analyse im Frühjahr ergab einen Restgehalt von 10 kg N/ha.

Die Messungen der N-Gehalte (chemisch, Reflexionsmessung (S1 [Lammel et al., 2001]), Fluoreszenzmessung (F_{690}/F_{730})) und der Biomassegehalte (gravimetrische Bestimmung, Reflexionsmessung (S2 [Lammel et al., 2001]), Fluoreszenzmessung (BDI_{LICF})) erfolgte zum Zeitpunkt der zweiten N-Gabe (BBCH 39) am 13.04.2004. Definitionen zum BBCH-Code sind in [Aufhammer, 1998] beschrieben.

Messmethoden

a) Messung der laserinduzierten Chlorophyllfluoreszenz

Die Versuche wurden mit dem Laser-N-Detektor, einem Fluoreszenzsensorsystem der Firma Planto (Leipzig, Germany), durchgeführt. Das System ist auf dem Traktordach montiert. Die Messung erfolgt in den Beständen zu beiden Seiten des Traktors.

Das von einer Laserdiode im Sensor abgestrahlte Licht der Wellenlänge 630 nm regt zusätzlich zum Sonnenlicht die Chlorophyllmoleküle in den Pflanzenblättern an und erzeugt somit zusätzliches Fluoreszenzlicht, das im Sensor durch eine spezielle Teleskopoptik mit Strahlteilern und Filtern in den Wellenlängen 690 nm und 730 nm nachgewiesen wird. Der gepulste Laserstrahl erlaubt hierbei eine Trennung der laserinduzierten von der sonnenlichtinduzierten Fluoreszenz. Aufgrund dieses aktiven Messprinzips ist eine Messung in der Dämmerung und in der Dunkelheit möglich. Es werden 10.000 Messwerte pro Sekunde aufgenommen und ausgewertet.

Das Messsystem wurde auf dem Traktordach so montiert, dass beide Sensoren im Winkel von 45° zur Horizontalen zu beiden Seiten des Traktors in den Pflanzenbestand gerichtet waren. Der Messabstand Sensor - Pflanze betrug 3 bis 4 m. Ein Novum der verwendeten Technik stellt die Scanfunktion des Sensorsystems dar, die ein flächiges Abtasten eines Streifens (mit einer Breite von etwa 0,75 m) beidseitig im Bestand bei einer Auflösung im mm-Bereich er-

laubt. Aufgrund dieses flächigen Ab tastens des Feldbestandes wird neben der Bestimmung der N-Versorgung der Pflanzen über den Parameter F_{690}/F_{730} auch die Bestimmung der Biomasse über den Parameter BDI_{LICF} möglich. Der Messstreifen mit einer Breite von jeweils 75 cm befand sich ca. 2 m von der Fahrspur entfernt im Bestand. Die Fahrgeschwindigkeit des Traktors betrug bei der Messung 6 km/h.

Der N-Gehalt der Pflanzen wird über das Verhältnis der Fluoreszenzintensitäten von 690 nm und 730 nm bestimmt.

Neuartig ist, dass mit der verwendeten Messtechnik ein neuer Parameter, nachfolgend als BDI_{LICF} bezeichnet, abgeleitet werden kann, der die Biomasse bzw. die Bestandesdichte im Feldbestand widerspiegelt. BDI_{LICF} wird statistisch über die Auswertung der Anzahl der fluoreszierenden Signale berechnet.

F_{690}/F_{730} und BDI_{LICF} stellen aufgrund der unterschiedlichen Auswertelgorithmen messtechnisch unabhängige Messgrößen dar.

b) Messung der Reflexion

Die Messung der Reflexion erfolgte mit einem tragbaren Feldspektrometer [Reusch, 1997]. Kernstück der Messtechnik bilden 2 Spektrometer, die zusammen mit der Stromversorgung in einem Gehäuse untergebracht sind. Die Spektrometer sind über je einen Lichtleiter mit den Einkoppeloptiken verbunden, die sich am Ende eines 1,5 m langen Auslegers befinden. Dieser Ausleger ist im Winkel von 60° zur Senkrechten nach vorn von der Person weggerichtet. Die Optiken messen auf diese Art und Weise ca. 2 m über dem Boden. Ein Spektrometer misst die Globalstrahlung, ist also gen Himmel gerichtet, und ein Spektrometer misst die Reflexion des Pflanzenbestandes, ist also gen Boden bzw. gen Pflanzenbestand gerichtet. Die Globalstrahlung muss zusätzlich gemessen werden, weil sich die Reflexion des Pflanzenbestandes in Abhängigkeit von der Globalstrahlung ändert und der Messwert daher lichtkorrigiert werden muss. Der spektrale Messbereich eines derartigen Feldspektrometers erstreckt sich von 450-900 nm [Reusch, 1997]. Das Sichtfeld beträgt ca. $0,4 \text{ m}^2$ Boden- bzw. Pflanzenfläche bei einem Blickfeld von 20° aus einer Höhe von 2 m.

Die Parzellen wurden von allen 4 Ecken aus vermessen. Der Stichprobenwert pro Parzelle, der für alle 4 Wiederholungen aufgenommen wird und in die Berechnung des Mittelwertes der unterschiedlichen N-Düngungsstufen eingeht, wird als Mittelwert aus diesen 4 Eckmess-

werten gewonnen. Aufgezeichnet und ausgewertet wurden die Reflexionswerte S1 und S2. Der Reflexionswert S1 wird im sichtbaren Wellenlängenbereich, speziell bei der Wellenlänge um ca. 670 nm, bestimmt [Lammel et al., 2001]. Neben der Biomasse wird der Reflexionswert S1 auch durch die Absorption des Chlorophylls beeinflusst. Daher wird dieser Wert S1 als Maß für den N-Gehalt pro Flächeneinheit angenommen.

Da der Reflexionswert S2 im Nahinfrarotbereich um 810 nm gemessen wird [Lammel et al., 2001], wirkt sich hier die Chlorophyllabsorption nicht mehr aus, so dass der Wert S2 lediglich von der Biomasse beeinflusst wird.

c) Trockenmasse- und N-Gehaltsbestimmung

Die Bestimmung der Biomasse und des N-Gehaltes erfolgte über die Beerntung eines 10 x 1,5 Meter langen Streifens aus der Parzelle mit einer Beerntungsmaschine mit integrierter Wiegeeinrichtung. Die gesamte geerntete Frischmasse wurde gewogen. Eine Mischprobe wurde entnommen, eingewogen, im Trockenschrank bei 65 °C drei Tage lang getrocknet und dann für die Trockenmassebestimmung zurückgewogen. Für die N-Analyse erfolgte das Aufbereiten der getrockneten Biomasse durch maschinelles Mahlen bei 0,7 mm Siebdurchmesser. Die Bestimmung von N erfolgte mit dem Makro-N-Analyser (N-Analyser, Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Germany). Die N-Aufnahme wurde bestimmt über die Multiplikation von Trockenmasse und N-Gehalt in der Trockenmasse.

d) Statistische Methoden

Vier Stichprobenwerte, d. h. je ein Stichprobenwert pro Wiederholung, fließen in die Berechnung des Mittelwertes ein. Die Fehlerbalken stellen den Fehler des Mittelwertes dar. Bei dem durchgeführten Signifikanztest handelt es sich um einen Ein-Weg ANOVA-Test. Die berechneten Signifikanzen sind für jeden der 4 Mittelwerte, zusammengesetzt aus je 4 Einzelstichproben, berechnet worden, so dass genaue Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit und die Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Grundgesamtheit getroffen werden können. P gibt die Irrtumswahrscheinlichkeit an, mit der die Annahme der Signifikanz gilt. Ist $P > 0,1$ wird die Hypothese, dass sich 2 Mittelwerte signifikant unterscheiden, verworfen. Ist $P < 0,1$ sind die Unterschiede statistisch gesichert.

4.3 Messergebnisse

Zum Zeitpunkt der zweiten N-Gabe (BBCH 39) waren die Stickstoffunterschiede visuell gut wahrnehmbar. Die nicht oder nur wenig gedüngten Varianten waren in der Grünfärbung heller als die mit hohen N-Gaben gedüngten Varianten. Auch die Bestandesdichte differenzierte visuell mit der N-Düngung. Die Nullvariante ließ geringere Bestandesdichten und niedrigere Wuchshöhen erkennen als die mit 50, 100 und 150 kg gedüngten Varianten. Von dem verabreichten N wurden die in Tabelle 4.1 aufgeführten Mengen aufgenommen. In der N-Aufnahme ist neben der ersten N-Gabe zu Vegetationsbeginn auch die Starter-N-Gabe vom Herbst enthalten.

Tabelle 4.1: N-Düngung zur ersten N-Gabe (BBCH 19) und die entsprechenden N-Aufnahmen, bestimmt zum Zeitpunkt kurz vor der zweiten N-Gabe (BBCH 39)

N-Düngungsvariante [kg N/ha] zur ersten N-Gabe (BBCH 19)	N-Aufnahme [kg N/ha] kurz vor der zweiten N-Gabe (BBCH 39)
0	48
50	87
100	100
150	116

Anhand der N-Aufnahme ist zu sehen, dass die erste N-Gabe zu Vegetationsbeginn eine deutliche Differenzierung bewirkt hat. Die hohe N-Gabe von 150 kg N konnte allerdings nicht vollständig aufgenommen werden.

N-Gehaltsbestimmungen

Die Ergebnisse der chemischen N-Analyse sind in Abbildung 4.1 dargestellt. In dieser Abbildung wurden die Messwerte der chemischen N-Analyse gegenüber der N-Düngungsvariante aufgetragen. Eine höhere N-Düngung zu Vegetationsbeginn bewirkte höhere N-Gehalte in der Trockenmasse der Rapspflanzen. Obwohl sich die Fehlerbalken aller Mittelwerte der N-Analysen nicht überlappen, zeigte der durchgeführte Signifikanztest, der Ein-Weg ANOVA, dass sich nur die N-Gehalte der 0, 50 und 100 kg N gedüngten Varianten signifikant unter-

scheiden ($P \leq 0,1$). Die N-Gehalte der 100 und 150 kg N-Variante unterscheiden sich nicht mehr ganz so deutlich bzw. signifikant ($P \leq 0,16$) voneinander.

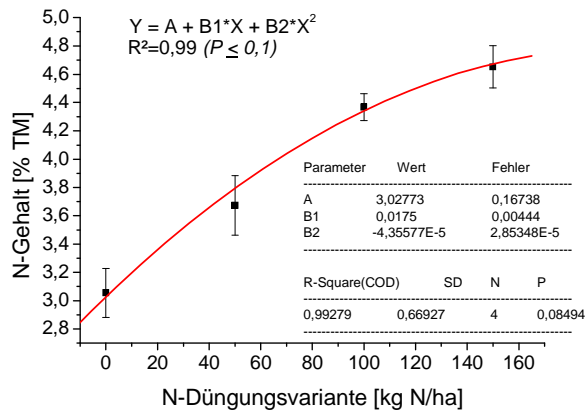


Abbildung 4.1: Chemisch bestimmter N-Gehalt zur zweiten N-Gabe (BBCH 39) in Abhängigkeit zur variierten ersten N-Gabe (EC 19) zu Raps

In Abb. 4.2 sind die N-Gehaltsbestimmungen mit Hilfe der Reflexion, die durch die Messwerte S1 beschrieben werden, den Ergebnissen der chemischen N-Analyse gegenübergestellt.

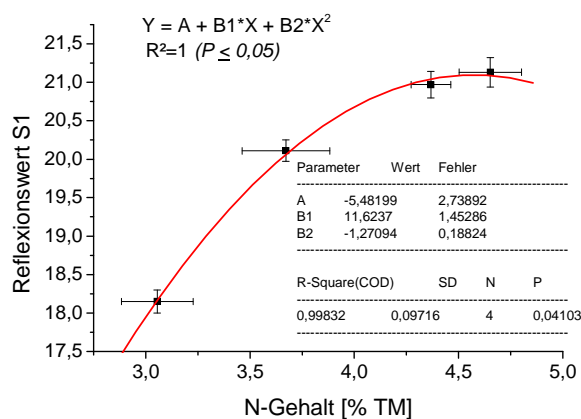


Abbildung 4.2: Reflexionswert S1 in Abhängigkeit zum chem. bestimmten N-Gehalt im Feldversuch zu Raps zur 2. N-Gabe (BBCH 39)

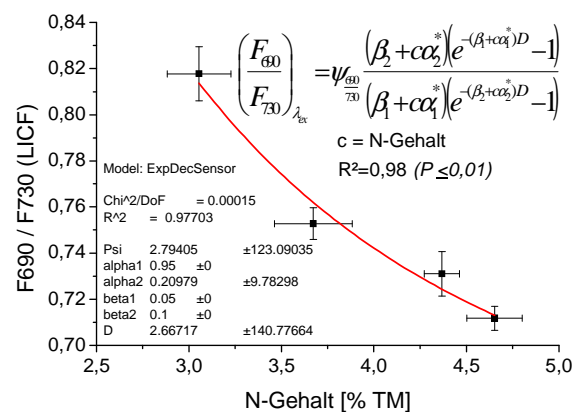


Abbildung 4.3: F₆₉₀/F₇₃₀ (LICF) in Abhängigkeit zum chem. bestimmten N-Gehalt im Feldversuch zu Raps zur 2. N-Gabe (BBCH 39)

Da in der Literatur bisher keine aus physikalischen Grundlagen hergeleitete Funktion für den Zusammenhang zwischen Chlorophyllgehalt bzw. N-Gehalt und Reflexionsmesswert be-

schrieben ist, wurde eine Kurve durch Wahl eines Polynom 2. Grades angenähert. Auf Basis dieser Funktion konnte eine enge Korrelation ($R^2=1$) zwischen dem Reflexionswert S1 und dem chemisch bestimmten N-Gehalt ermittelt werden. Mit der Annahme einer polynomischen Funktion 2. Grades, kann zwischen den N-Gehalten von 3,1 %, 3,7 % und 4,4 % mittels Reflexionswert S1 gut bzw. signifikant unterschieden werden ($P \leq 0,1$), jedoch nicht mehr zwischen den N-Gehalten von 4,4 % und 4,7 % N in der Trockenmasse ($P \leq 0,55$). Mit einer Wahrscheinlichkeit von 55 % entstammen die Reflexionsmesswerte S1 der N-Gehalte von 4,4 und 4,7 (bzw. der 100 und der 150 kg N gedüngten Variante) aus derselben Grundgesamtheit und können nicht mehr unterschieden werden. Das bedeutet, dass in den höheren N-Behandlungsstufen die Auflösung der Reflexionsmessung nicht mehr hoch genug ist.

In der Abbildung 4.3 werden die N-Gehaltsbestimmungen mittels laserinduzierter Chlorophyllfluoreszenz, beschrieben durch die Messwerte F_{690}/F_{730} , den Ergebnissen der chemischen N-Analyse gegenübergestellt. Die in dieser Abb. 4.3 zugrunde gelegte Formel ist in [Günther et al., 1993] aus physikalischen Grundlagen hergeleitet worden. Zwischen F_{690}/F_{730} und dem chemisch bestimmten N-Gehalt konnte auf Basis dieser Funktion ebenfalls eine enge Korrelation ($R^2=0,98$) bestimmt werden.

Obwohl sich die Fehlerbalken nicht überlappen, kann nur signifikant zwischen den N-Gehalten von 3,1 %, 3,7 % und 4,4 % mittels LICF unterschieden werden ($P \leq 0,1$). Zwischen den N-Gehalten von 4,4 % und 4,7 % N in der Trockenmasse kann mittels LICF nicht mehr ganz so deutlich bzw. signifikant unterschieden werden ($P \leq 0,13$). Das entspricht einer ähnlichen Wahrscheinlichkeit, die für das Messverfahren der chemischen N-Bestimmung ermittelt wurde ($P \leq 0,16$). Das Messverfahren der LICF ist also auch in den hohen N-Behandlungsstufen gut auflösend. F_{690}/F_{730} spiegelt somit sehr gut den N-Gehalt der Rapspflanzen im Feldbestand wider.

Biomassebestimmung

Neben den N-Gehalten wurden ebenfalls die Biomassen im Rapsbestand bestimmt. Die Messwerte der gravimetrischen Trockensubstanzbestimmung sind im Folgenden gegenüber der N-Düngungsvariante aufgetragen (Abb. 4.4). Zu vermuten wäre, dass durch erhöhte N-Gaben die Biomassen im Raps stetig ansteigen, wie das beim chemisch bestimmten N-Gehalt der Fall war. Diese Vermutung trifft so nicht zu.

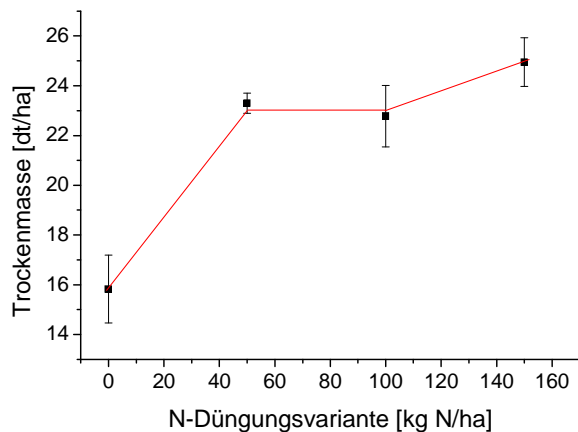


Abbildung 4.4: Trockenmassegehalte zur zweiten N-Gabe (BBCH 39) in Abhängigkeit zur variierten ersten N-Gabe (BBCH 19) zu Raps

Die Nullvariante und die 50 kg N gedüngte Variante unterscheiden sich signifikant ($P \leq 0,01$) voneinander. Die 50 kg N und die 100 kg N gedüngte Variante unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($P \leq 0,70$), beide Varianten bilden ähnlich hohe Biomassen. Die Mittelwerte der Biomassen zwischen der 100 kg N und der 150 kg N Variante unterscheiden sich zwar in der Grafik, jedoch sind die Unterschiede nicht mehr ganz so deutlich bzw. signifikant ($P \leq 0,21$).

In der Abbildung 4.5 werden die Biomassebestimmungen mittels Reflexion, die durch die Messwerte S2 beschrieben werden, den Ergebnissen der gravimetrischen Trockensubstanzbestimmung gegenübergestellt. Zwischen S2 und der gravimetrischen Trockenmassebestimmung besteht eine Korrelation von $R^2=0,90$. Der Zusammenhang kann mit einer linearen Funktion beschrieben werden. Die Biomassebestimmung mittels Reflexion, beschrieben durch S2, unterscheidet hier signifikant ($P \leq 0,01$) zwischen den ersten 3 Düngungsvarianten (0, 50 und 100 kg N), aber nicht zwischen der 100 und der 150 kg N-Düngungsvariante ($P \leq 0,35$). Die Reflexionsmessung mittels S2 unterscheidet hier also andere Biomasseniveaus als die gravimetrische Trockenmassebestimmung. In der Grafik ist zusätzlich das Vertrauens- bzw. Konfidenzintervall angegeben, innerhalb dessen Grenzen wir den Mittelwert der Population einigermaßen sicher (Gesamtwahrscheinlichkeit von 90 %) vermuten können. Dieses Vertrauensintervall zeigt, dass der Reflexionswert S2 nicht gut geeignet ist, die Biomasse vertrauenswürdig wiederzuspiegeln.

In der Abbildung 4.6 werden die Biomassebestimmungen mittels laserinduzierter Chlorophyllfluoreszenz, beschrieben durch die Messwerte BDI_{LICF} , den Ergebnissen der konventionellen Biomassebestimmung durch Trocknung gegenübergestellt.

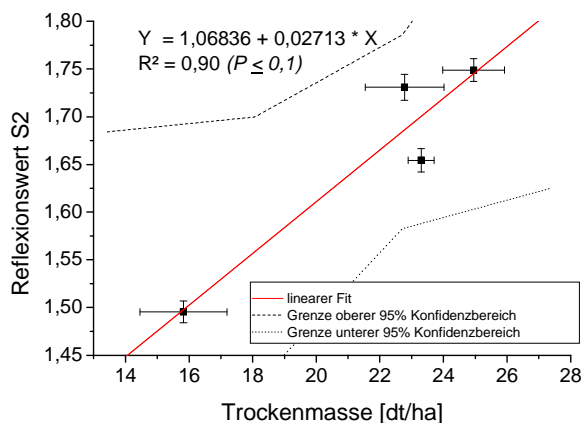


Abbildung 4.5: Reflexionswert S2 in Abhängigkeit zur konventionell bestimmten Biomasse durch Trocknung im Feldversuch zu Raps zur 2. N-Gabe (BBCH 39)

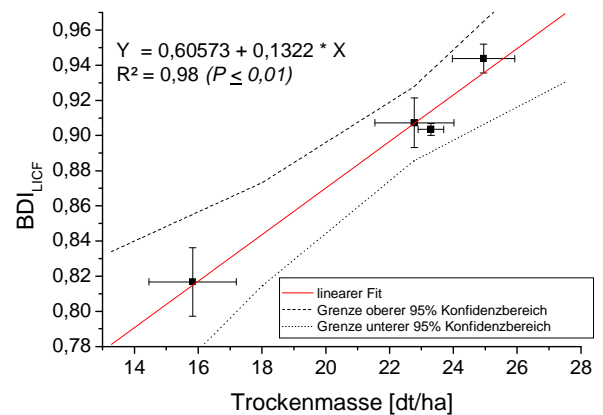


Abbildung 4.6: BDI_{LICF} in Abhängigkeit zur konventionell bestimmten Biomasse durch Trocknung im Feldversuch zu Raps zur 2. N-Gabe (BBCH 39)

Abbildung 4.6 zeigt die sehr enge Korrelation ($R^2=0,98$) zwischen BDI_{LICF} und der konventionellen Biomassebestimmung. Es ist zu sehen, dass die Biomassebestimmung mittels LICF im Gegensatz zur Reflexionsmessung ähnliche N-Düngungsniveaus unterscheidet wie die konventionelle Biomassebestimmung durch Trocknung. Die Biomasse mittels LICF unterscheidet hier 3 signifikante Düngenniveaus, das der Nullvariante, das gemeinsame der 50 bis 100 kg N-Variante und das der 150 kg N-Variante. Zwischen der Nullvariante und der 50 kg N-Variante kann signifikant ($P \leq 0,01$) unterschieden werden. Die Biomassen der 50 und 100 kg N Variante unterscheiden sich nicht ($P \leq 0,80$) und die Biomassen der 50 bzw. 100 und die der 150 kg N-Variante unterscheiden sich signifikant mit ($P \leq 0,1$). Das Vertrauens- bzw. Konfidenzintervall zeigt, dass mit einer Gesamtwahrscheinlichkeit von 90 % der Mittelwert der Population in dem angegebenen Bereich zu vermuten ist. Die Grenzen des Vertrauens- bzw. Konfidenzintervall sind recht schmal, so dass die Biomassen mittels LICF recht vertrauenswürdig widerspiegelt werden können. Zwischen BDI_{LICF} und Biomasse besteht aufgrund der statistischen Auswertelgorithmen ein linearer Zusammenhang.

N-Gehalts- und Biomassebestimmungen

Die Beziehung zwischen dem chemisch bestimmten N-Gehalt und der gravimetrischen Trockensubstanzbestimmung ist in Abb. 4.7 dargestellt. Höhere N-Gaben zu Raps bewirken höhere N-Gehalte, aber nicht in allen Fällen höhere Biomassegehalte, wie Abb. 4.7 zeigt.

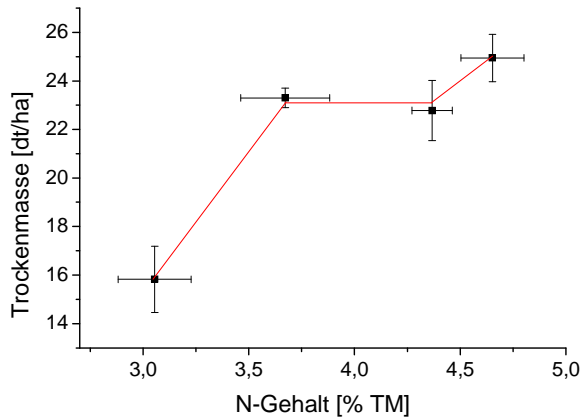


Abbildung 4.7: Beziehung zwischen dem Trockenmassegehalt und dem chemisch bestimmten N-Gehalt von Raps zur zweiten N-Gabe (BBCH 39)

Setzt man die Bestandesdichte in Beziehung zum N-Gehalt, so erhält man bei der Reflexionsmessung einen linearen Zusammenhang (Abb. 4.8), während sowohl die Messung auf Basis der LICF (Abb. 4.9) als auch die konventionelle Bestimmung (Abb. 4.7) ein vergleichbares, nicht lineares Verhalten aufweisen.

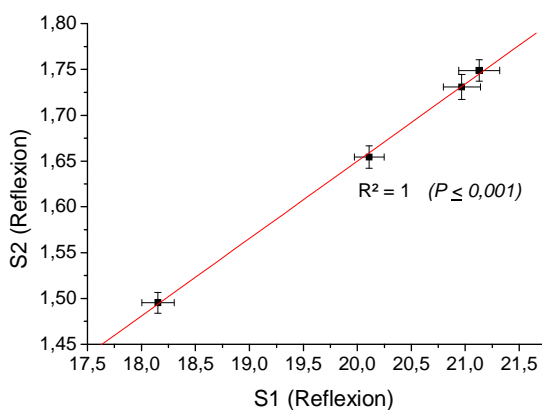


Abbildung 4.8: Reflexionswert S1 in Abhängigkeit von Reflexionswert S2 im Feldversuch zu Raps zur 2. N-Gabe (BBCH 39)

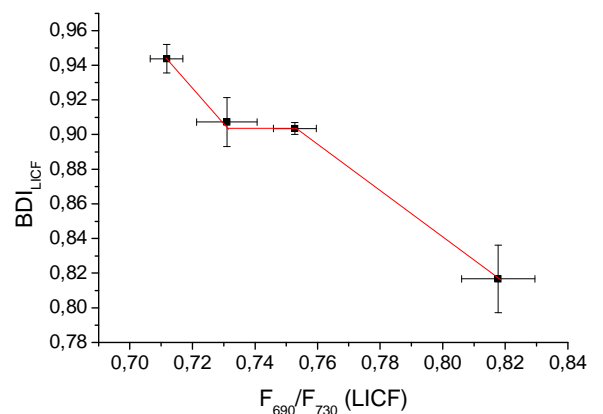


Abbildung 4.9: F_{690}/F_{730} in Abhängigkeit vom BDI_{LICF} (LICF-Messwerte) im Feldversuch zu Raps zur 2. N-Gabe (BBCH 39)

Bei der Reflexionsmessung fällt auf, dass sich die Reflexionswerte S1 (N-Gehalt) und die Reflexionswerte S2 (Biomassegehalt) nahezu identisch verhalten (siehe Abbildung 4.8).

Die Unabhängigkeit der Biomasse- und der N-Gehaltsmessung scheint daher bei der Reflexionsmessung nicht gegeben zu sein.

4.4 Diskussion der Ergebnisse

Ziel der Untersuchungen war es, die LICF als Werkzeug zur Bestimmung des N-Gehaltes und der Biomasse bzw. Bestandesdichte im Feldversuch zu prüfen. Vergleichende Untersuchungen mit N-Gehaltsbestimmungen, gravimetrischen Trockensubstanzbestimmungen und erstmalig mit Reflexionsmessungen dienten der Beurteilung. Da die Reflexionsmessung das einzige bisher in der Praxis einsetzbare Messverfahren im Hinblick auf die variable N-Düngung zur 2. N-Gabe im Raps ist, lag ein Schwerpunkt dieser Arbeit in der vergleichenden Darstellung von Reflexionsmessung und LICF. Dabei wurde bewusst auf kritische Messbedingungen im Hinblick auf die Reflexion, wie Messungen zu sehr zeitigen Pflanzenstadien (erste N-Gabe zu Raps) und Messungen bei wenig Umgebungslicht, verzichtet.

Die laserinduzierte Chlorophyllfluoreszenz spiegelt mit dem Messwert F_{690}/F_{730} den chemisch bestimmten N-Gehalt sehr gut wider. R^2 beträgt 0,98 und zeigt somit eine sehr enge Korrelation zwischen dem chemisch bestimmten N-Gehalt und F_{690}/F_{730} . Auch bei den höheren N-Gehalten von 4,4 und 4,7 % N in der Trockenmasse (TM) ist die Bestimmung von F_{690}/F_{730} mittels LICF sehr gut auflösend und zeigt ein ähnliches Verhalten wie bei der chemischen Analyse. Ähnliche Unterscheidungswahrscheinlichkeiten dieser 2 Niveaus (chemische Analyse $P \leq 13$, LICF $P \leq 16$) konnten ermittelt werden.

Die Sensormessungen mittels Reflexion, beschrieben durch S1, spiegeln ebenfalls recht gut die N-Gehalte wider. Das Bestimmtheitsmaß beträgt sogar 1. Aber die hohen N-Gehalte von 4,4 % und 4,7 % können nicht mehr gut auflösend wiedergegeben werden, die Unterschiede sind zu gering ($P \leq 0,553$). Es zeigt sich, dass bei den N-Gehalten von 4,4 % N in der TM die Reflexionsmessung mit S1 schon in die Sättigung geht und auch höhere N-Gehalte nicht mehr unterschieden werden können.

Vergleicht man die Bestimmtheitsmaße der LICF (F_{690}/F_{730}) und der Reflexionsmessung (S1) mit dem chemisch bestimmten N-Gehalt, so ist die Korrelation der Reflexion geringfügig enger. An dieser Stelle muss aber bemerkt werden, dass das ermittelte Bestimmtheitsmaß zwi-

schen F_{690}/F_{730} und dem chemisch bestimmten N-Gehalt aus einer auf physikalischen Grundlagen hergeleiteten Funktion [Günther et al., 1993] beruht. Bei der Reflexionsmessung gibt es keine aus physikalischen Grundlagen hergeleitete Funktion. In diesem Fall haben wir eine Kurve durch willkürliche Wahl eines Polynom 2. Grades angenähert.

Die Biomasse wird durch die laserinduzierte Chlorophyllfluoreszenz mit BDI_{LICF} besser wiedergegeben als durch die Reflexionsmessung (S2). Die Korrelation zwischen Biomasse durch Trocknung und BDI_{LICF} ist mit $R^2=0,98$ wesentlich besser als im Falle der Reflexion mit S2 ($R^2=0,90$). Die Reflexionsmessung unterscheidet nicht dieselben Biomasseniveaus wie die der Biomassebestimmung durch Trocknung. Im Gegensatz dazu unterscheidet die laserinduzierte Chlorophyllfluoreszenz mit BDI_{LICF} dieselben Biomasseniveaus wie die der Biomassebestimmung durch Trocknung, so sind zum Beispiel die Biomassen der 50 und der 100 kg N-Variante in beiden Fällen gleich groß. Ein Vergleich der Vertrauensintervalle der BDI_{LICF} -Bestimmung und der Reflexionsbestimmung mittels S2 lässt erkennen, dass die Bestimmung der Biomassen mittels LICF wesentlich zuverlässiger ist.

Die Zusammenhänge zwischen der gravimetrischen Trockensubstanzbestimmung und der Reflexionsbestimmung S2 sowie der BDI_{LICF} -Bestimmung können mit linearen Zusammenhängen beschrieben werden. Daher sind die Bestimmtheitsmaße zweier gleicher Funktionen auch direkt vergleichbar. Aber es ist anzumerken, dass bei noch höheren Biomassenbereichen $>> 25$ dt TM/ha die linearen Funktionen der Reflexionsmessung (S2) und die der LICF-Messung (BDI_{LICF}) irgendwann in die Sättigung gehen und ab diesem Punkt nicht mehr differenzieren. Die Bestimmung von BDI_{LICF} bewegt sich z.B. von 0 bis 1, noch höhere Biomassen können dann nicht weiter aufgelöst werden. Diese Sättigung ist bei der Reflexionsbestimmung von S2 schon früher zu beobachten, wie die Ergebnisse zeigen.

Darüber hinaus zeigt diese Arbeit, dass sich die Reflexionswerte S1 und S2 völlig identisch verhalten (Abb. 4.8). Bei einem N-Steigerungsversuch, wie er hier durchgeführt worden ist, wäre es auch zu vermuten, dass Biomasse und N-Gehalt gleich beeinflusst werden. Aber die Biomassebestimmung zeigte, dass die Biomassen trotz N-Steigerungen nicht gleichmäßig ansteigen müssen (Abb. 4.7). Die LICF unterstützt diese Aussage (Abb. 4.9). Es stellt sich die Frage, ob es sich bei den Reflexionswerten S1 und S2 wirklich um unabhängige Messgrößen handelt. Es ist anzunehmen, dass die verschiedenen Wellenlängen der Reflexionswerte S1 und S2 nicht unabhängig sind und ein Mischsignal aus Biomasse und N-Gehalt darstellen.

Das könnte auch die Ursache für die Tatsache sein, dass die engsten Korrelationen zwischen Reflexionswerten und der N-Aufnahme zu verzeichnen sind und nicht zum N-Gehalt und/oder zur Biomasse [**Schächtl, 2004**]. Die N-Aufnahme stellt ein Produkt aus N-Gehalt in der Trockenmasse und der Trockenmasse dar. Dieses Verhalten der Reflexion kann auch systembedingt erklärt werden, weil die Messung der Reflexion integral über eine Fläche bestimmt wird. Viel Biomasse und wenig N-Gehalt bzw. wenig Biomasse und viel N-Gehalt dürften bei einer integralen Messung ähnliche Ergebnisse aufzeigen. Das ist bei der von uns vorgestellten Messtechnik mittels LICF nicht der Fall. Biomasse und N-Gehalt können getrennt dargestellt werden. F_{690}/F_{730} und BDI_{LICF} bilden unabhängige Messgrößen. Das wird aufgrund der unterschiedlichen Auswertelgorithmen ermöglicht. F_{690}/F_{730} stellen Intensitätsmessungen zweier Wellenlängen dar, BDI_{LICF} hingegen beruht rein auf statistischer Auswertung von Messsignalen der beiden Wellenlängen (690 und 730 nm).

Die unabhängige Bestimmung des N-Gehaltes und der Biomasse bzw. Bestandesdichte im Feldbestand ist Voraussetzung für die Entwicklung eines Düngelalgorithmus zur variablen Stickstoffdüngung. So ist es zum Beispiel wichtig, zwischen guter Stickstoffversorgung bei wenig Biomasse und wenig N bei viel Biomasse zu unterscheiden. Das spielt gerade bei Fraßschäden, Fehlstellen, Trockenstress in Folge von Wassermangel, Staunässe und Verdichtungen im Boden eine wesentliche Rolle. Hier kann es durch eine ungenaue Unterscheidung zwischen N-Gehalt und Biomasse zu Fehlentscheidungen bei der Düngung kommen. Bei wassergestressten Pflanzen hat man beobachtet, dass diese einen hohen N-Gehalt aufweisen können, dafür aber mit geringen Biomassen bzw. Bestandesdichten reagieren [**Barraclough & Kyte, 2001**]. Das bedeutet aber für die N-Düngung, dass eine Mehrdüngung aufgrund der geringen Bestandesdichte keinen zusätzlichen Effekt erzielen würde, im Gegenteil würde der zusätzliche Stickstoff von den Pflanzen nicht mehr aufgenommen und verbliebe im Boden, was dann längerfristig zu Auswaschung und somit zur ökologischen Belastung der Umwelt beitragen würde. Ist die Ursache für die geringen Bestandesdichten und die hohen N-Gehalte auf Wassermangel zurückzuführen, dann ließen sich die wassergestressten Pflanzen über einen entsprechenden Auswertelgorithmus in der Software mit der von uns eingesetzten Technik erkennen. Eine präzise Unterscheidung zwischen Biomasse und N-Gehalt ermöglicht somit eine präzise Anpassung der N-Düngung an gegebene Standortbedingungen.

4.5 Schlussfolgerungen

Weiterführende Untersuchungen sind im Hinblick auf die Eignung der LICF zur variablen Verabreichung der ersten N-Gabe zu Raps notwendig, da der Großteil der Gesamt-N-Düngermenge nicht zur zweiten N-Gabe sondern zur ersten N-Gabe verabreicht wird.

Der Parameter BDI_{LICF} lässt sich auch bei sehr geringen Bestandesdichten messen, da der Boden bei der LICF-Messung kein Störsignal darstellt. Die Bestandesdichte wird in der konventionellen schlageinheitlichen N-Düngung zu Raps zur ersten N-Gabe in Form von Zu- und Abschlägen berücksichtigt. Das bedeutet, dass die Bestandesdichtedichtemessung grundsätzlich geeignet ist, um die erste N-Gabe zu Raps variabel zu verabreichen. Andere Messverfahren zur Bestimmung des N-Bedarfs, wie die Reflexionsmessung oder der Pendelsensor, sind hier gänzlich ungeeignet, da die zu Vegetationsbeginn vorherrschenden Bestandesdichten zu gering sind.

5 Biomasse- und Bestandesdichtemessungen mit Hilfe der laserinduzierten Chlorophyllfluoreszenz in Raps- und Getreidebeständen zu sehr frühen Pflanzenstadien

Auf stark heterogenen Schlägen ist eine teilflächenspezifische N-Düngung einer schlageinheitlichen N-Düngung vorzuziehen, um lokale Über- und Unterversorgung mit N zu vermeiden. Online-Sensoren ermöglichen es, zeitgleich zur N-Düngung bestehende Unterschiede in der N-Versorgung zu detektieren und die N-Düngermenge entsprechend anzupassen.

Bisher gibt es in der landwirtschaftlichen Düngepraxis nur Sensorlösungen, die die teilflächenspezifische N-Düngung erst ab bestimmten Vegetationsstadien zulassen (Blattflächenindex >3), z.B. zu Getreide und Raps ab zweiter N-Gabe. Eine variable sensorgeführte N-Düngung zu sehr frühen Wachstumsstadien der Pflanzen, z.B. zu Getreide und Raps zur ersten N-Gabe zu Vegetationsbeginn, ist zur Zeit noch nicht möglich.

Die laserinduzierte Chlorophyllfluoreszenz (LICF) eröffnet hier neue Perspektiven, da die gemessenen Fluoreszenzsignale nur von den Pflanzen ausgesendet werden und der Boden keine Störsignale aussendet. Uns ist es erstmalig gelungen, zu sehr frühen Pflanzenstadien die Bestandesdichte im Feldbestand mit Hilfe der LICF exakt abzubilden. Die Bestandesdichte erscheint als ein geeigneter Parameter zur teilflächenspezifischen Regulierung der N-Menge, da diese auch schon im Rahmen der schlageinheitlichen N-Düngung über bestimmte Zu- und Abschläge berücksichtigt wird.

5.1 Einführung

Stickstoff ist der ertragsrelevanteste Produktionsfaktor, der wesentlich die Qualität der pflanzlichen Produkte beeinflusst, andererseits aber auch zu beträchtlichen Belastungen der Hydro- und Atmosphäre führt. Eine nachhaltige Landbewirtschaftung strebt hohe Erträge und Qualitäten bei minimalen Belastungen der Umwelt an. Die Präzisionslandbewirtschaftung mit der teilflächenspezifischen N-Düngung zielt deshalb darauf ab, auf heterogenen Flächen die kleinräumige Variabilität des Bodens bzw. des Pflanzenwachstums zu berücksichtigen und die N-Düngermenge darauf hin abzustimmen. Pflanzen sind die besten Indikatoren, die die N-Verfügbarkeit aus verschiedenen N-Quellen kumulativ innerhalb der Vegetationszeit anzeigen

[**Olfs et al., 2005**]. Geeignete Sensorlösungen, die den Stickstoffbedarf der Pflanzen kleinräumig während des Düngevorganges erfassen können, um die N-Düngermenge individuell an das Pflanzenwachstum und an den N-Bedarf der Pflanzen anzupassen, sind daher notwendig. Sie ermöglichen eine schnelle Anpassung der N-Düngestrategie während der Vegetationszeit, vorausgesetzt, dass die N-Düngerstrategie nicht auf einer Einmal-Applikation beruht, sondern dass die N-Düngermenge auf mehrere Teilgaben verteilt wird [**Olfs et al., 2005**]. Positive ökonomische und ökologische Effekte können durch die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung auf heterogenen Standorten erzielt werden [**Ancev et al., 2005; Schmerler & Jürschik, 1997; Malzer et al., 1996; Swinton & Ahmad, 1996; Reetz & Fixen, 1995**], die sich aus Ertrags- und Qualitätssteigerungen sowie reduziertem N-Einsatz ergeben.

Es gibt heute bereits erste Sensorlösungen, die erfolgreich Eingang in die Praxis gefunden haben. Zum einen handelt es sich um Sensoren, die auf dem Messprinzip der Sonnenlichtreflexion an Pflanzen beruhen [**Reusch, 1997**]. Diese Sensorlösungen können aber erst ab bestimmten Bodenbedeckungsgraden (Blattflächenindex > 3) eingesetzt werden. Bei niedrigen Bodenbedeckungsgraden wirkt der Boden als Störgröße, das Pflanzensignal kann hier nur unter speziellen Randbedingungen vom Bodensignal getrennt werden [**Flowers et al., 2003**]. Diese Sensoren können aus diesem Grund bei Getreide erst sinnvoll mit Abschluss der Bestockungsphase eingesetzt werden.

Zum anderen handelt es sich um einen Sensor zur Erfassung der Pflanzendichte, das Crop Meter (Pendelsensor). Dieser misst mechanisch über den Auslenkwinkel eines durch einen Pflanzenbestand bewegten pendelnd aufgehängten zylindrischen Körpers die Pflanzenmasse-dichte im Feldbestand. Dieses Messprinzip kann jedoch nur bei genügend vorhandener Biomasse eingesetzt werden. Der Pendelsensor kann aus diesem Grunde erst ab Mitte Schossen und nur zu Getreide eingesetzt werden [**Ehlert et al., 2004; Ehlert & Schmerler, 2001**].

Bis heute fehlen leistungsstarke Sensorlösungen, die die teilflächenspezifische N-Düngung schon zu sehr frühen Vegetationsstadien ermöglichen, z.B. bei Raps und Getreide ab erster N-Gabe. Gerade die teilflächenspezifische N-Düngung zu Vegetationsbeginn bietet ein großes Potential zur Schonung der Umwelt, weil zu Vegetationsbeginn ein höheres Auswaschungsrisiko des N durch erhöhte Frühjahrsniederschläge besteht. Die erste N-Gabe zu Raps fällt zudem auch höher aus als zur zweiten N-Gabe. Deshalb wäre eine teilflächenspezifische N-

Düngung gerade bei Raps schon zur ersten N-Gabe wünschenswert, um den N dort zu platzieren, wo er benötigt wird und dort einzusparen, wo der Bedarf der Pflanzen an N geringer ist. Ein neues Messverfahren, die laserinduzierte Chlorophyllfluoreszenz (LICF), ist von uns in Feldversuchen geprüft worden und bietet für die teilflächenspezifische N-Düngung neue Perspektiven. Ein großer Vorteil der LICF ist darin zu sehen, dass Fluoreszenzsignale nur von den Pflanzen ausgesendet werden und der Boden keinen Einfluss auf das Messsignal nimmt. Diese Tatsache erlaubt grundsätzlich Messungen auch schon zu zeitigen Vegetationsstadien.

Die Chlorophyllfluoreszenz ist eine Reaktion des Photosyntheseapparates, bei der aufgenommene überschüssige Energie, die nicht in die photochemische Reaktion eingeht, entweder als Wärmestrahlung abgegeben oder von der Pflanze als Fluoreszenzlicht abgestrahlt wird.

Zwei Pflanzenparameter lassen sich mit Hilfe der LICF erfassen. Zum einen handelt es sich um den N-Gehalt der Pflanzen pro Blattflächeneinheit, der indirekt über den Chlorophyllgehalt der Blätter bestimmt wird. Dieser Parameter wird über das Verhältnis der Fluoreszenzsignale bei Wellenlängen von 690 nm und 730 nm bestimmt [**Lichtenthaler & Rinderle, 1988; Chappelle et al., 1984b**]. Da N der Hauptbestandteil von Chlorophyll ist, kann mittels der LICF der N-Gehalt der Pflanze bestimmt werden [**Bredemeier, 2005; Adams et al., 1990; Chappelle et al., 1984b**].

Mit der von uns verwendeten Sensorlösung zur Messung der LICF lässt sich erstmalig auch ein zweiter wesentlicher Pflanzenparameter im Feldbestand darstellen: die Bestandesdichte. Das wird möglich, weil der Pflanzenbestand über eine Entfernung von ca. 3-4 m vom Traktordach aus gescannt wird. Dabei handelt es sich nicht, wie bei der Reflexionsmessung, um eine integrale Messung über eine Fläche, sondern um eine Messung einer Fläche mit Ortsauflösung der Messsignale von wenigen Millimetern. Die Fluoreszenzsignale werden nur von den Pflanzen im Bestand ausgestrahlt. Der Boden fluoresziert bei den verwendeten Wellenlängen nicht. Deshalb können die empfangenen Fluoreszenzsignale statistisch ausgewertet werden. Ein dünnerer Bestand liefert zeitaufgelöst weniger Fluoreszenzsignale als ein kräftiger Bestand. Die gemessene Bestandesdichte mittels LICF wird nachfolgend BDI_{LICF} genannt. Es handelt es sich bei diesen beiden Pflanzenparametern (F_{690}/F_{730} und BDI_{LICF}) um voneinander unabhängige Messgrößen.

Die N-Gehalte der Pflanzen differenzieren häufig erst im Laufe der Vegetation. N-Gehaltsmessungen sind daher erst ab zweiter N-Gabe zu Getreide und zu Raps sinnvoll.

Die Bestandesdichte im Feld variiert jedoch schon zu zeitigen Pflanzenstadien. Ursachen dafür sind z.B. Aussaatfehler, unterschiedlicher Feldaufgang, unterschiedliche Auswinterungen der Pflanzen, Unterschiede in der Geländetopologie, differenzierte Bodenbeschaffenheit usw. In der herkömmlichen konventionellen schlageinheitlichen N-Düngung wird die Bestandesdichte deshalb schon zur ersten N-Gabe berücksichtigt. Dünne Bestände erhalten im Rahmen der konventionellen schlageinheitlichen N-Düngung zu Vegetationsbeginn (z.B. 1. N-Gabe zu Getreide und zu Raps) etwas mehr N als Pflanzenbestände mit mittleren Bestandesdichten [Schilling, 2000], kräftigere Bestände entsprechend weniger N. Für die Ableitung des N-Bedarfs der Pflanzen im Rahmen der teilflächenspezifischen ersten N-Gabe zu Getreide und zu Raps kann daher die Bestandesdichte im Feld erfolgreich herangezogen werden.

Die vorliegenden Versuche konzentrieren sich deshalb auf die Messungen von Bestandesdichten zu sehr frühen Pflanzenstadien. Es sollte geprüft werden, ob mit der vorliegenden Messtechnik auf Basis der LICF frühzeitige Bestandesdichteunterschiede im Feld zuverlässig abgebildet werden.

5.2 Material und Methoden

Zwei Versuche wurden durchgeführt. Zum einen handelt es sich um einen Versuch mit variierten Bestandesdichten zu Raps und zu Getreide, der in Großpflanzgefäßen im Gewächshaus angezogen und zu frühen Entwicklungsstadien der Pflanzen (Blattentwicklung bis Schossen) unter freiem Himmel gemessen wurde. Bei dem zweiten Versuch handelt es sich um einen Feldversuch mit unterschiedlichen Aussaatstärken zu Getreide, der zum Zeitpunkt der ersten N-Gabe (BBCH 21) zu Vegetationsbeginn im Feldbestand gemessen wurde.

Pflanzenmaterial

Großpflanzgefäßversuch

Dieser Versuch wurde im Gewächshaus der TU München in Freising (Versuchsstation Dürnast) Anfang 2004 in größeren Pflanzgefäßen (0,8 x 1,20 m) mit verschiedenen Bestandesdichten zu Getreide und Raps angelegt.

Die Aussaat erfolgte in allen Gefäßen mit gleicher Aussaatstärke von 360 Körnern pro m². Nach einer Woche wurden die auflaufenden Pflanzen vereinzelt. Die Staffelung der Bestandesdichte bei Raps betrug 60, 150, 240 und 300 Rapspflanzen pro m² und bei Weizen 120,

180, 240 und 300 Weizenpflanzen pro m². Es wurde mit Absicht auf Wiederholungen der einzelnen Varianten verzichtet, da einerseits die Anzahl der Pflanzen in den Großgefäßen ausreichend groß war und andererseits die Anzahl der Pflanzen konstant gehalten wurde.

Die Bestandesdichte bei Raps ist unter dem Gesichtspunkt der Vergleichbarkeit unter Praxisbedingungen in der Spanne von optimal bis sehr dicht einzuschätzen. Bestandesdichten über 120 Rapspflanzen/m² sind nicht praxisüblich. Optimale Bestandesdichten von Raps bewegen sich in einer Spanne von 30 – 120 Rapspflanzen/m² [Aufhammer, 1998]. Die Bestandesdichten für Weizen sind in der Spanne von optimal bis sehr dünn anzusehen, da Keimdichten von 355 Winterweizenpflanzen/m² als optimal gelten [Aufhammer, 1998].

Da die Gefäßversuche im Gewächshaus durchgeführt wurden und hier relativ konstante Temperaturen herrschten, erfolgte keine Veränderung der Bestandesdichte über die Zeit des Versuches.

Die Messungen mit dem N-Sensor erfolgte unter freiem Himmel. Gemessen wurde vom Traktordach aus, während der Traktor seitlich an den Pflanzgefäßen entlangfuhr. Als Messtermine wurden sehr zeitige Entwicklungsstadien gewählt, bei Raps BBCH 11, 12 bis 32 und bei Weizen BBCH 13, 21 bis 31. Zum letzten Messtermin wurden die Pflanzgefäße abgeerntet und die Biomasse bestimmt.

Feldversuch

Im Herbst 2004 wurde Winterweizen mit 4 unterschiedlichen Saatstärken, mit 210, 270, 330 und 390 Körnern/m², ausgesät. Die Anlage dieses Versuches erfolgte in Streifenform in 4-facher Wiederholung. Insgesamt wurden 16 Streifen angelegt. Im Frühjahr 2005 zur ersten N-Gabe erfolgte die Messung der Bestandesdichte mit einem Stickstoff-Sensor der Firma Planto, der auf Basis der LICF arbeitet. Zusätzlich wurde der Feldaufgang mit einem Zählrahmen (Größe 60 cm x 70 cm) ausgezählt. Die Auszählung mittels Zählrahmen erfolgte 8 mal pro angelegtem Streifen.

Messmethode

Die Versuche wurden mit dem Laser-N-Detektor, einem Fluoreszenzensorsystem der Firma Planto, durchgeführt. Das System ist auf dem Traktordach montiert.

Das von einer Laserdiode im Sensor abgestrahlte Licht der Wellenlänge 630 nm regt zusätzlich zum Sonnenlicht die Chlorophyllmoleküle in den Pflanzenblättern an und erzeugt somit zusätzliches Fluoreszenzlicht, das im Sensor durch eine spezielle Teleskopoptik mit Strahl-

teilern und Filtern in den Wellenlängen 690 nm und 730 nm nachgewiesen wird. Der gepulste Laserstrahl erlaubt hierbei eine Trennung der laserinduzierten von der sonnenlichtinduzierten Fluoreszenz. Aufgrund dieses aktiven Messprinzips ist eine Messung in der Dämmerung und in der Dunkelheit möglich. Es werden 10.000 Messwerte pro Sekunde aufgenommen und ausgewertet. Ein Novum der verwendeten Technik stellt die Scanfunktion des Sensorsystems dar, die ein flächiges Abtasten eines Streifens (mit einer Breite von etwa 0,75 m) beidseitig im Bestand bei einer Auflösung im mm-Bereich erlaubt. Aufgrund dieses flächigen Abtastens des Feldbestandes wird die Bestimmung der Biomasse bzw. der Bestandesdichte über den Parameter BDI_{LICF} , möglich. Die Messwerte werden zur Bestimmung der Bestandesdichte statistisch ausgewertet.

Großpflanzgefäßversuch

Die Pflanzgefäße wurden zum jeweiligen Messtermin auf dem Hof der Versuchsstation aufgestellt und mit dem Laser-N-Detektor der Firma Planto vermessen.

Ein mit diesem Laser-N-Sensor ausgestatteter Traktor fuhr an den aufgestellten Gefäßen an der Längsseite entlang. Der Sensor wurde auf dem Traktordach im Winkel von 45° zur Senkrechten montiert und in der Höhe so eingestellt, dass die Messentfernung Sensor und Pflanzen ca. 3-4 m betrug. So sind die Ergebnisse dieses Großpflanzgefäßversuches vergleichbar zu den Feldmessungen. Da die Pflanzgefäße nur eine Größe von 0,8 x 1,2 m aufweisen, wurde eine wesentlich niedrigere Traktorgeschwindigkeit als in den Feldversuchen gewählt. Die Geschwindigkeit des Traktors betrug 0,25 km/h. Auf diese Art und Weise konnte eine Messdauer von ca. 5 s pro Pflanzgefäß erreicht werden.

Feldversuch

Die Messung mit dem Laser-N-Detektorsystem erfolgt in den Beständen zu beiden Seiten der jeweiligen Fahrspur.

Das Messsystem wurde auf dem Traktordach so montiert, dass beide Sensoren im Winkel von 45° zur Senkrechten zu beiden Seiten des Traktors in den Pflanzenbestand gerichtet waren.

Der Messabstand Sensor - Pflanze betrug 3 bis 4 m. Der Messstreifen mit einer Breite von jeweils 75 cm befand sich ca. 1-2 m vom Rand der Fahrspur entfernt im Bestand. Die Fahrgeschwindigkeit des Traktors betrug bei der Messung einheitlich 6 km/h. Höhere praxisrelevante Fahrgeschwindigkeiten sind ebenfalls möglich.

5.3 Messergebnisse

Großgefäßversuch

Die Ergebnisse der Bestandesdichtemessungen in den Großgefäßen zu den 3 Messterminen sind für Raps in Abb. 5.1 und für Weizen in Abb. 5.2 dargestellt.

Die Bestandesdichtemessung mittels LICF (BDI_{LICF}) ist in den beiden Abbildungen gegenüber den Pflanzen/m² aufgetragen.

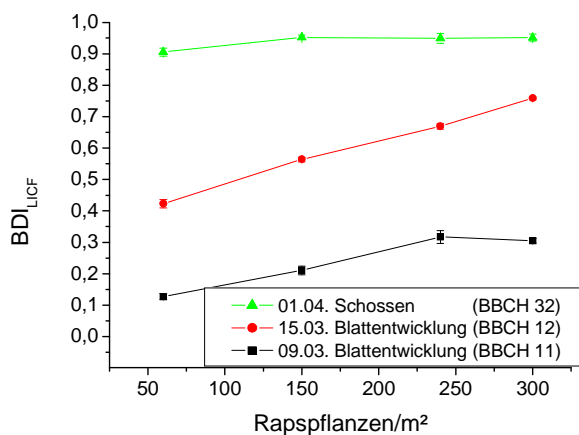


Abbildung 5.1: BDI_{LICF} -Messung im Raps zu BBCH 11-32, Großgefäßversuch

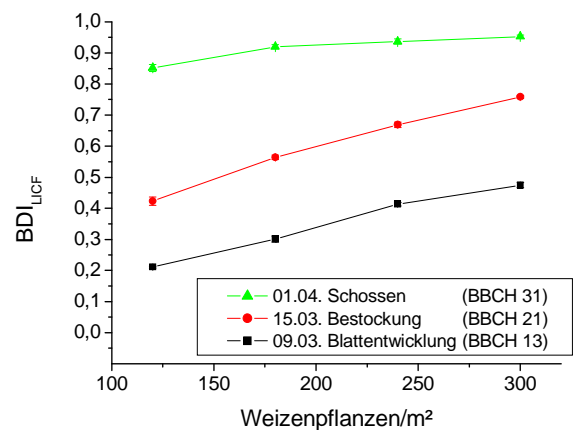


Abbildung 5.2: BDI_{LICF} -Messung im Weizen zu BBCH 13-31, Großgefäßversuch

Anhand der beiden Grafiken ist zu erkennen, dass die Bestandesdichte sowohl beim Raps als auch beim Weizen in sehr zeitigen Entwicklungsstadien (frühe Blattentwicklung) erfolgreich mit Hilfe der LICF gemessen werden kann. Der Parameter BDI_{LICF} zeigt sowohl beim Raps als auch beim Weizen, dass die Bestandesdichten bzw. Biomassen von Messtermin zu Messtermin deutlich zunehmen. Zum gleichen Messtermin zeigen die einzelnen Bestandesdichten ebenfalls eine deutliche Differenzierung des Parameters BDI_{LICF} . Zum ersten Messtermin überwiegt der Anteil des Bodens im Verhältnis zum Pflanzenmaterial. Zum Zeitpunkt des Schossens dagegen ist die Bodenbedeckung schon beträchtlich gestiegen. Die Blattmasse beim Raps ist in den Gefäßen so stark angewachsen, dass zum Zeitpunkt des Schossens nur noch Blattmasse detektiert werden konnte. Daher ist dann auch der Bestandesdichteindex BDI_{LICF} ab Rapspflanzendichten von >150 Rapspflanzen/m² bzw. Frischmassen >9,4 t/ha (siehe Abbildung 5.3) bzw. Trockenmassen >1,1 t/ha nicht mehr weiter messtechnisch differenzierbar.

Frischmassen von 9,4 bzw. Trockenmassen von 1,1 t/ha beim Raps sind als keine hohen Biomassen zu bewerten. Die Tatsache, dass speziell in diesem Gefäßversuch ab diesen Biomassen mittels BDI_{LICF} keine weitere Differenzierung zu höheren Biomassen möglich ist, ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass Rapspflanzendichten von >150 Stück/m² in der Praxis untypisch sind und diese untypischen Bestandesdichten auch untypische Wuchsformen und einen untypischen Wuchshabitus der Pflanzen bedingen. Aufgrund der sehr hoch gewählten Bestandesdichte von >150 Pflanzen/m² überlappten sich die Blätter der Rapspflanzen zu BBCH 32 im Gefäß deutlich, obwohl die Gesamtpflanzen insgesamt wesentlich filigraner ausgebildet waren als die der Rapspflanzen im Feld.

Separate Feldmessungen zu Raps zur zweiten N-Gabe (BBCH 39) mit typischen Bestandesdichten von ca. 40 - 60 Pflanzen/m² haben jedoch gezeigt, dass sehr gute Differenzierungen zwischen niedrigen und hohen Bestandesdichten erreicht werden konnten (siehe Kapitel 4). Die Biomasserträge lagen dabei in einer Spanne von 1,4 bis 2,8 t Trockenmasse/ha bzw. 8 – 22 t/ha Frischmasse. Zwischen BDI_{LICF} und Biomasse konnte in dem Feldversuch ein Bestimmtheitsmaß von 0,98 ermittelt werden.

Beim Weizen sind zum Zeitpunkt des Schossens im Gefäßversuch die Bestandesdichteunterschiede gut detektierbar (Abbildung 5.4).

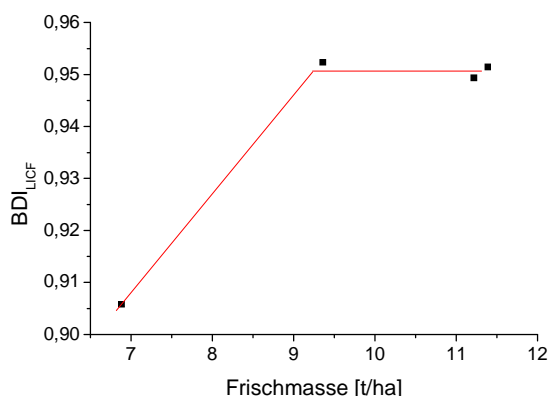


Abbildung 5.3: Zusammenhang zwischen Frischmasseertrag und BDI_{LICF} , Raps im Entwicklungsstadium BBCH 32

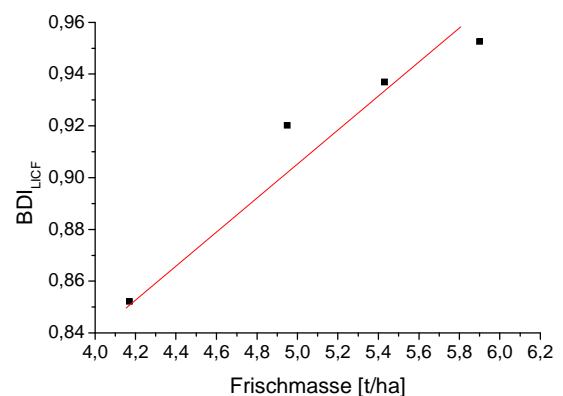


Abbildung 5.4: Zusammenhang zwischen Frischmasseertrag und BDI_{LICF} , Weizen im Entwicklungsstadium BBCH 31

Feldversuch

Die Ergebnisse der Bestandesdichtemessungen im Feldversuch zur ersten N-Gabe zu Getreide (BBCH 21) sind der Abbildung 5.5 zu entnehmen. BDI_{LICF} wurde hier gegen den Feldaufgang (Pflanzen/m², ausgezählt mit einem Zählrahmen) aufgetragen.

Die Ergebnisse zeigen, dass im Feldversuch die Bestandesdichten zu BBCH 21 mittels LICF exakt abgebildet werden konnten. Zwischen der Anzahl der Pflanzen/m² und dem BDI_{LICF} besteht ein positiver linearer Zusammenhang. Es konnte ein Bestimmtheitsmaß von 1 zwischen BDI_{LICF} und Pflanzen/m² ermittelt werden. Der durchgeführte Signifikanztest, Ein-Wege-ANOVA, besagt, dass sich die Anzahl der Pflanzen/m² (ausgezählt mit einem Zählrahmen) untereinander durchgängig signifikant unterscheiden ($P \leq 0,05$).

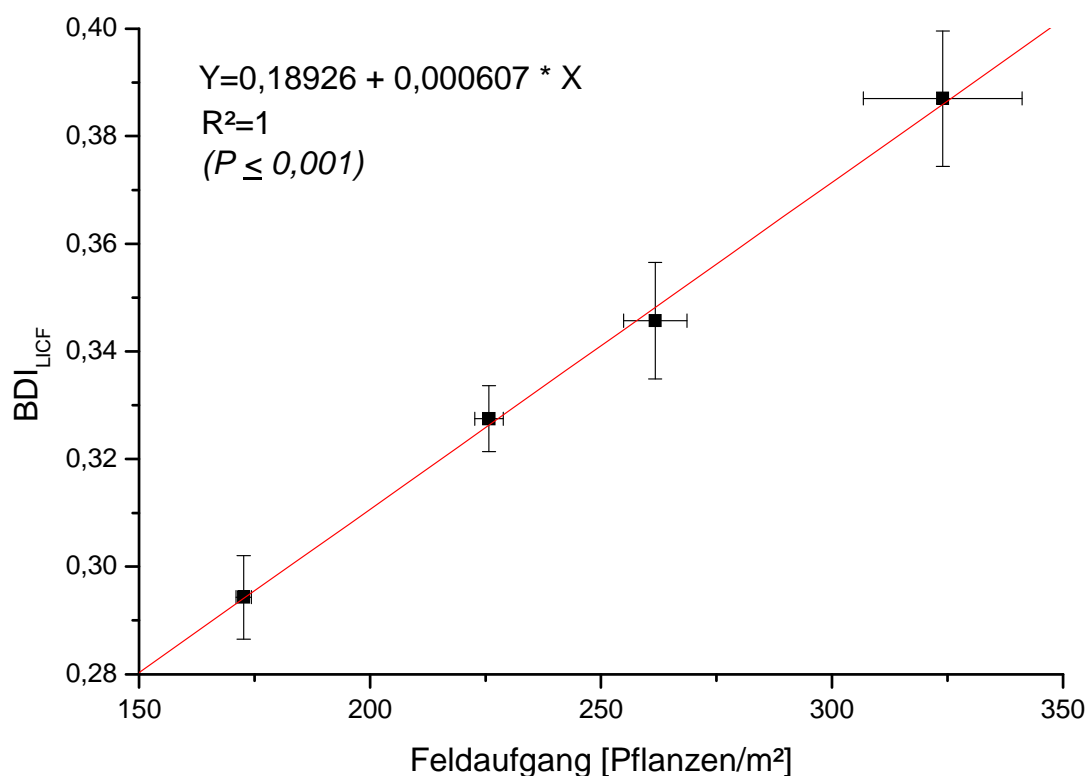


Abbildung 5.5: Zusammenhang zwischen Anzahl von Weizenpflanzen/m² (Mittel 173 – 324) und gemessener Bestandesdichte mittels LICF (BDI_{LICF}) im Feldversuch zu Vegetationsbeginn (BBCH 21)

Bei der Bestimmung von BDI_{LICF} unterscheiden sich die Mittelwerte mit der geringsten Bestandesdichte signifikant von denen der zweitgeringsten Bestandesdichte ($P \leq 0,05$). Die Mittelwerte der zweitgeringsten Bestandesdichte unterscheiden sich nicht mehr ganz so deutlich bzw. signifikant von den Mittelwerten der zweithöchsten Bestandesdichte ($P \leq 0,19$). Die Mittelwerte der zweithöchsten und der höchsten Bestandesdichte unterscheiden sich jedoch wieder deutlich bzw. signifikant ($P \leq 0,05$).

5.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Großgefäßversuches und des Feldversuches zeigen, dass die Bestandesdichte mit Hilfe der LICF zu sehr frühen Pflanzenstadien sowohl beim Raps als auch bei Getreide erfolgreich gemessen werden kann. Die Bestandesdichte kann mit Hilfe der LICF in einer weiten Spanne von nicht vorhandener Biomasse bis zu hohen Biomassen dargestellt werden (BDI_{LICF} messbar zwischen 0 und 1).

Anhand der Messergebnisse ist weiterhin zu sehen, dass die Biomasse bzw. Bestandesdichte nur bis zu einem bestimmten Schwellenwert im Feld gemessen werden kann. Dieser Schwellenwert wird dann erreicht, wenn der Fluoreszenzsensor eine geschlossene Pflanzendecke erfasst. Die Ergebnisse der Bestandesdichtemessung im Großgefäßversuch verleiten zu der Aussage, dass ab dem Zeitpunkt des Schossens ab Trockenmassen von 1,1 t/ha oder Frischmassen von 9,4 t/ha bei Raps keine Bestandesdichteunterschiede mehr erfasst werden können. Das ist nicht der Fall. In gesonderten Feldversuchen zu Raps zum Zeitpunkt der zweiten N-Gabe (BBCH 39) konnte die Bestandesdichte im Feldbestand in einer Spanne von 1,4 t Trockenmasse/ha bis 2,6 t Trockenmasse/ha sehr gut abgebildet werden ($R^2 = 0,98$). Die Ursache für dieses unterschiedliche Verhalten ist in der unterschiedlichen Ausprägung der Pflanzen im Feld- und im Gefäßversuch zu suchen. Der Gefäßversuch belegt, dass Bestandesdichtemessungen schon in frühen Pflanzenstadien zuverlässig messbar sind.

Der Feldversuch spiegelt Getreidebestände unter Praxisbedingungen wider. Es konnte gezeigt werden, dass zum Zeitpunkt der ersten N-Gabe (BBCH 21) zu Vegetationsbeginn Bestandesunterschiede mit dem Laser-N-Detektor sehr gut darstellbar sind. Niedrige Bestandesdichten zu Vegetationsbeginn mit durchschnittlich 173 Pflanzen/m² werden mit der Sensortechnik genauso gut erkannt wie hohe Bestandesdichten mit durchschnittlich 324 Pflanzen/m².

Somit steht für die teilflächenspezifische N-Düngung erstmals ein Sensorsystem zur Verfügung, welches schon zur ersten N-Gabe eingesetzt werden kann. Die Festlegung der ersten N-Gabe auf Basis von Bestandesdichteunterschieden im Feld bietet gerade für Getreide und für Raps ein gutes Potential, um N bedarfsabhängig räumlich zu platzieren.

Die erste N-Gabe zu Vegetationsbeginn im Frühjahr fördert bei den Getreidearten in artspezifischem Umfang die Bestockung. In Abhängigkeit von der vorherrschenden Bestandesdichte trägt eine zu niedrige N-Düngung zu einer unzureichenden Bestockung und eine zu hohe N-Düngung zu einer unproduktiven Bestockung bei. Eine ausreichende Bestockung kann auf heterogenen Schlägen mit dem Einsatz des von uns verwendeten Sensorsystems auf Basis der LICF erreicht werden. Ertragsvorteile und ökologische Vorteile sind hieraus ableitbar.

Die erste N-Gabe zu Vegetationsbeginn im Frühjahr fördert bei Raps vor allem das vegetative Wachstum. Über den Winter hinweg reduzierte Assimilationsflächen werden durch die erste N-Gabe über eine erneute Blattbildung regeneriert. Eine zu niedrige N-Düngung zu Vegetationsbeginn führt zu kleinen Blattflächen. Diese können weniger zur Photosynthese beitragen und führen außerdem zu einem geringeren Unkrautunterdrückungsvermögen. Eine zu niedrige N-Düngung zur ersten N-Gabe geht zu Lasten des Ertrages. Eine zu hohe N-Düngung zu Vegetationsbeginn ist ebenfalls zu vermeiden, da sie zu umfangreichem Wachstum, anhaltender Neuanlage und langer Lebensdauer von vegetativen Pflanzenteilen beiträgt. Dies führt zu steigendem Wasserverbrauch der Bestände und kann in späteren Abschnitten zur Wasserknappheit führen. Eine Über- und Unterversorgung mit Stickstoff zu Vegetationsbeginn zu Raps setzt das Ertragspotential herab und kann zu unnötigen Belastungen der Umwelt führen. Daher ist der Einsatz eines von uns beschriebenen Sensorsystems auch für Raps zur teilflächenspezifischen N-Düngung zur ersten N-Gabe gerade auf heterogenen Schlägen vorteilhaft.

5.5 Schlussfolgerungen

Das Laser-N-Detektorsystem kann selbstverständlich nicht nur zur variablen N-Düngung zu Vegetationsbeginn eingesetzt werden. Auch zur zweiten und zur dritten N-Gabe zu Getreide und zu Raps bietet das Laser-N-Detektorsystem ein sehr gutes Potential, N teilflächenspezifisch zu regulieren. Ab der zweiten N-Gabe ist neben einer zuverlässigen Biomasse- bzw. Bestandesdichtebestimmung im Feld über den Parameter BDI_{LICF} auch eine N-

Gehaltsbestimmung über den Parameter F_{690}/F_{730} der Feldbestände sinnvoll und zuverlässig möglich. Spezielle Feldversuche konnten zeigen, dass beide Parameter unabhängig gemessen werden können (Kapitel 4). Somit kann mit Hilfe des Laser-N-Detektorsystems eine bessere Anpassung an gegebene Standortbedingungen erreicht werden.

Inwieweit der N-Gehalt der Pflanzen schon zur ersten N-Gabe differenziert und für die variable erste N-Gabe herangezogen werden kann, ist mit gesonderten Versuchen zu klären. Möglicherweise könnte für Raps der N-Gehalt über den Parameter F_{690}/F_{730} schon in zeitigen Pflanzenstadien gemessen und in der ersten N-Gabe berücksichtigt werden.

6 Messung der LICF in Getreidebeständen zur 2. und 3. N-Gabe und Vergleich mit N-Tester und Nitratschnelltest

Der Getreideanbau mit der Hauptfrucht Weizen weist weltweit im Vergleich zu anderen Ackerbaukulturen den größten Anbauumfang auf. Daher und durch die Tatsache, dass Getreide, speziell Weizen, hohe Gesamt-N-Gaben und über die Vegetation hinweg verteilte N-Düngungsgaben erhält, gebührt dieser Feldfrucht besonderer Stellenwert bezüglich einer teilflächenspezifischen N-Düngung.

Aus diesem Grunde wurden umfangreiche LICF-Messungen in Getreidebeständen durchgeführt. In diesem Kapitel sind Ergebnisse der LICF-Messungen zur zweiten und zur dritten N-Gabe in Getreidebeständen beschrieben. Für deren Beurteilung erfolgte ein qualitativer Vergleich mit pflanzenanalytischen Messmethoden in Form vom Nitratschnelltest und vom N-Tester.

LICF-Messungen zur zweiten N-Gabe (BBCH 32) zeigen sehr gut unterschiedliche N-Versorgungen in Getreidebeständen an, wobei die LICF-Messungen qualitativ bessere Ergebnisse zeigen als Messungen mit dem N-Tester. Auch zum Zeitpunkt der dritten N-Gabe (BBCH 45) werden Defizite der N-Versorgung mittels LICF-Messmethode gut erkannt.

6.1 Einführung

Ziel der vorliegenden Gesamtarbeit sollte es sein, die LICF als Messinstrument zur Erkennung der N-Versorgung und der Bestandesdichte im Hinblick auf eine teilflächenspezifische Regulierung der N-Düngung zu testen und zu bewerten.

Für die Untersuchungen wurden aus diesem Grunde zwei Kulturpflanzen mit unterschiedlicher Anatomie des Blattes, des Organs, wo die Photosynthese stattfindet, gewählt. Zum einen handelt es sich um einen Vertreter der dikotylen Pflanzen, dem Raps, zum anderen um Getreidepflanzen, die zu den monokotylen Pflanzen gehören. Der Blattaufbau der Blattoberseite und der Blattunterseite dieser beiden Pflanzenarten unterscheiden sich deutlich voneinander. Die Blattoberseite weist bei den dikotylen Pflanzen eine höhere Chlorophylldichte auf als auf der Blattunterseite. Deshalb wurde von [Tartachnyk et al., 2003] kritisch darauf hingewie-

sen, dass Chlorophyllfluoreszenzmessungen an dikotylen Pflanzen in Feldbeständen zur Bestimmung von N-Differenzen möglicherweise weniger geeignet sein könnten als an monokotylen Pflanzen mit gleich hohen Chlorophylldichten auf der Blattober- und auf der Blattunterseite. Diese Vermutung wird jedoch durch die Ergebnisse dieser Arbeit nicht unterstützt (siehe Kapitel 4). Bei monokotylen Pflanzen, wie Getreide, kann postuliert werden, dass diese aufgrund des einfacheren Blattaufbaus unproblematisch mittels LICF zu messen sind.

In Kapitel 4 wurden Messungen der LICF in Rapsbeständen dargestellt und diese mit chemischen N-Analysen, Biomassebestimmungen und Reflexionsmessungen verglichen. Die LICF-Messungen zu Raps zeigen sehr gute Korrelationen zum chemisch bestimmten N-Gehalt ($R^2=0,98$) und zur Biomasse ($R^2=0,98$) zum Zeitpunkt der zweiten N-Gabe. Zum Zeitpunkt der ersten N-Gabe konnte in weiteren Versuchen gezeigt werden, dass mittels LICF-Methode die Bestandesdichte in Rapsbeständen und Getreidebeständen sehr gut abgebildet werden kann (Kapitel 5). Deshalb erscheint die LICF-Methode eine geeignete Methode zur teilflächenspezifischen N-Bemessung der ersten und zweiten N-Gabe besonders zu Raps. Die Eignung der LICF-Methode im Hinblick auf die teilflächenspezifische Regulierung der ersten N-Gabe zu Getreide konnte im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls abgeleitet werden (Kapitel 5).

In diesem Kapitel wird spezifisch die Eignung von LICF-Messungen zur Erfassung des N-Status und der Biomasse von Getreidebeständen zum Zeitpunkt der zweiten und dritten N-Gabe beschrieben.

Die Ergebnisse der LICF-Messungen zu Getreide zur zweiten und zur dritten N-Gabe wurden mit pflanzenanalytischen Methoden wie N-Testermessungen und Nitratschnelltestmessungen verglichen und bewertet. Es handelt sich beim Nitratschnelltest [**Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2002**] um eine Methode, die den Nitratgehalt in der Pflanzenbasis misst. Der N-Tester [**Hydro Agri, 2002**] bestimmt mit Hilfe einer Absorptionsmessung am eingeklemmten Pflanzenblatt die N-Versorgung über den Chlorophyllgehalt der Pflanze. Beide Methoden, Nitratschnelltest und N-Tester, erlauben einen qualitativen Vergleich mit der LICF-Messung.

Darüber hinaus wurde der Zusammenhang zwischen dem Chlorophyllgehalt zum Zeitpunkt der 3. N-Gabe und den zur Ernte bestimmten Kornerträgen abgeleitet. Versuche dieser Art

wurden in den Jahren 2001 und 2002 an mehreren Standorten durchgeführt und lieferten ähnliche Ergebnisse.

Ergebnisse der Messung der LICF an Getreidepflanzen zur 2. und zur 3. N-Gabe sind ebenfalls in den Veröffentlichungen von [Bredemeier & Schmidhalter, 2005] und [Bredemeier, 2005] beschrieben worden.

6.2 Material und Methoden

Ein Stickstoffsteigerungsversuch zu Winterweizen (WW), Sorte Tarso, wurde in Seehausen (Sachsen, Deutschland), ehemalige Versuchsstation der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, im Herbst 2001 angelegt und im Frühjahr 2002 untersucht. Ausgesät wurde mit einheitlicher Saatstärke. Im Frühjahr wurde der Versuch parzelliert. Jede Parzelle wies eine Länge von 12 m und eine Breite von 3 m auf. Die Fahrspur verlief mitten durch die Parzelle. 32 Parzellen wurden angelegt, um 8 Varianten mit 4 Wiederholungen in randomisierter Anlage zu erhalten. Zum Zeitpunkt der ersten N-Gabe wurden die Varianten unterschiedlich mit Kalkammonsalpeter angedüngt (siehe Tabelle 6.1).

Die 115 kg N/ha der ersten N-Gabe wurden mit Hilfe der Stickstoffbedarfsanalyse (SBA), eines Düngungsberatungssystems in Sachsen-Anhalt, aufgrund von N_{\min} -Untersuchungen des Bodens ermittelt. 70 kg N/ha galt auf diesem Standort als durchschnittliche N-Düngermenge zu Getreide zur ersten N-Gabe über die Jahre. Somit gab es zum Zeitpunkt der zweiten N-Gabe 3 Düngungsvarianten: eine Nullvariante, eine optimale Variante (115 kg N/ha) und eine reduzierte Variante von 70 kg N/ha.

Kurz vor der zweiten N-Gabe (DC 32) wurden die Testparzellen mit dem LICF-Sensorsystem vermessen. Gleichzeitig wurden die Parzellen mit dem N-Tester und mit dem Nitratschnelltest (NST) getestet. Für die Messung mittels N-Tester wurden 30 Pflanzen pro Parzelle beprobt, und zwar die letzten vollständig ausgebildeten Blätter. Die Düngempfehlungen wurden aus den dazugehörigen Tabellen des N-Testers aus dem Jahre 2002 abgeleitet [Hydro Agri, 2002].

Für den Nitratschnelltest wurden 10 Pflanzen aus jeder Parzelle entnommen und 1 cm über dem Boden ca. 1-2 cm Länge der Halmbasis abgeschnitten. Von den 10 Proben wurde der Pflanzensaft ausgequetscht. Der Pflanzensaft wurde mit Merck-Nitratteststreifen [Merck, Mer-

ckoquant, Nitrattest, Analysestäbchen 10-500 mg/l NO₃] beprobt. Die N-Düngung nach Nitratschnelltest wurde aus den Düngetabellen der jeweiligen Länder, in diesem Falle dem „Merkblatt zur Durchführung des Nitratschnelltestes mit Nitratteststäbchen zur Ermittlung des N-Bedarfs von Wintergetreide für die 2. und von Winterweizen für die 3. N-Gabe“, [Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2002] abgeleitet.

Tabelle 6.1: N-Düngungsvarianten zu Getreide zur 1., 2. und 3. N-Gabe in kg N /ha

Versuchsglied	1. N-Gabe (Vegetationsbeginn)	2. N-Gabe (DC 32)	3. N-Gabe (DC 45)	Summe
1	0	0	0	0
2	70	0	0	70
3	70	60	0	130
4	70	60	65	195
5	115 ¹⁾	0	0	115
6	115 ¹⁾	45	0	160
7	115 ¹⁾	45	55	215
8	115 ¹⁾	80	0	195

¹⁾ unterteilt in zwei Gaben von 60 kg N/ha und 55 kg N/ha

Die Düngungsvarianten der zweiten N-Gabe wurden nach Nitratschnelltest sowie N-Tester berechnet. Die Varianten 3 und 4 mit 60 kg N/ha entsprechen dem Mittelwert der Düngeempfehlungen nach Nitratschnelltest und N-Tester. Die Empfehlungen beider Tests waren gleich hoch. Die Varianten 6 und 7 mit 45 kg N/ha wurden aus dem Mittelwert der N-Düngeempfehlungen von Nitratschnelltest mit 40 kg N/ha und dem N-Tester mit 50 kg N/ha abgeleitet. Die Variante 8 mit 80 kg N/ha wurde extra hoch gewählt, und zwar mit doppelter Düngeempfehlung nach Nitratschnelltest. Die Messung der Auswirkung der 2. N-Gabe er-

folgte mit dem LICF-Sensorsystem, mit N-Tester und Nitratschnelltest zu DC 45 zum Zeitpunkt der dritten N-Gabe.

Die N-Düngevariante 4 (65 kg N/ha) der dritten N-Gabe wurde aus dem Mittelwert aus den N-Düngeempfehlungen nach NST (60 kg N/ha) und N-Tester (70 kg N/ha) berechnet. Die N-Düngevariante 7 mit 55 kg N/ha der dritten N-Gabe wurde in Anlehnung an die N-Düngeempfehlungen nach NST mit 50 kg N/ha festgelegt. 70 kg N/ha nach N-Düngeempfehlung des N-Testers erschien zu hoch bemessen für diesen Standort.

Die Fahrgeschwindigkeit bei den LICF-Messungen betrug einheitlich 6 km/h.

Zum Zeitpunkt der Ernte wurde für jede Parzelle der Kornertrag bestimmt. Die gemessenen Erträge wurden auf einheitliche Trockenmassen von 86 % umgerechnet.

6.3 Messergebnisse

LICF-Messung zur zweiten N-Gabe (DC 32)

Die Ergebnisse der N-Gehaltsmessungen mit dem Laser-N-Detektor zum Zeitpunkt der zweiten N-Gabe (DC 32) mittels Parameter F_{690}/F_{730} sind in Abb. 6.1 und die Bestandesdichten mittels Parameter BDI_{LICF} in Abb. 6.2 angegeben.

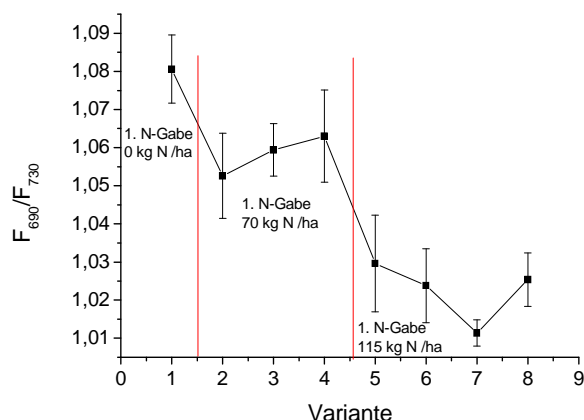


Abbildung 6.1: F_{690}/F_{730} zu WW (DC 32) zur 2. N-Gabe, unterhalb der Kurve ist die Menge an N zur ersten N-Gabe angegeben

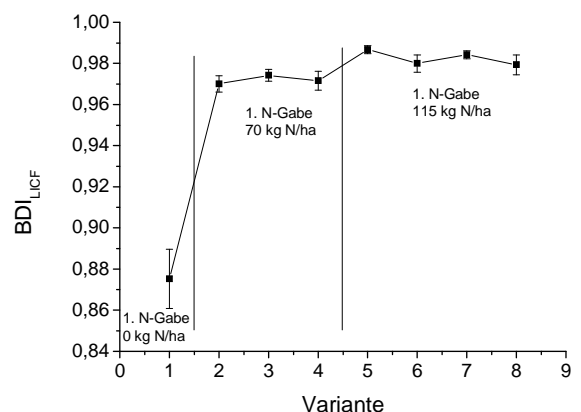


Abbildung 6.2: BDI_{LICF} zu WW (DC 32) zur 2. N-Gabe, unterhalb der Kurve ist die Menge an N zur ersten N-Gabe angegeben

Messung der LICF in Getreidebeständen zur 2. und 3. N-Gabe und Vergleich mit N-Tester und Nitratschnelltest

In den Abbildungen 6.3 und 6.4 sind die Ergebnisse der N-Testermessung und des Nitratschnelltestes dargestellt. Die entsprechenden Düngeempfehlungen wurden in diesen Abbildungen über der Kurve angegeben.

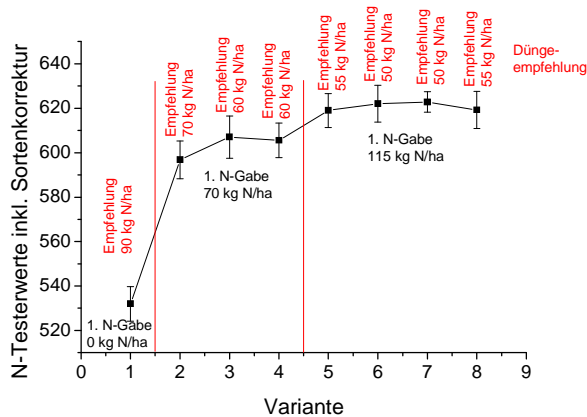


Abbildung 6.3: N-Tester zu WW (DC 32) zur 2. N-Gabe, unterhalb der Kurve ist die Menge an N zur ersten N-Gabe angegeben, oberhalb der Kurve ist die Düngeempfehlung nach N-Tester angegeben

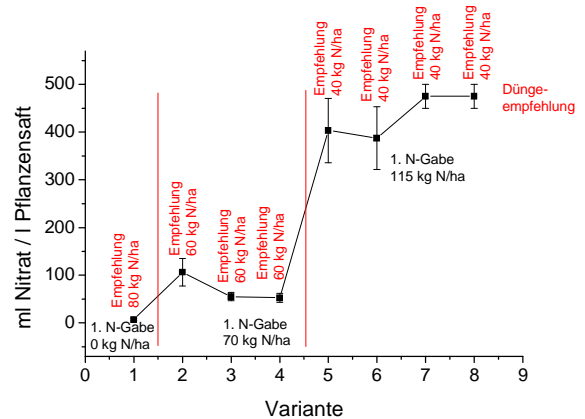


Abbildung 6.4: Nitratschnelltest zu WW (DC 32) zur 2. N-Gabe, unterhalb der Kurve ist die Menge an N zur ersten N-Gabe angegeben, oberhalb der Kurve ist die Düngeempfehlung nach NST angegeben

Jede Variante der Abbildungen 6.1 - 6.4 enthält 4 Wiederholungen, die sich in den Fehlerbalken der einzelnen Varianten widerspiegeln. Zusätzlich sind die Varianten 2, 3 und 4 sowie die Varianten 5, 6, 7 und 8 wiederholt. Alle Varianten wurden jedoch getrennt dargestellt, um Aussagen zur Genauigkeit der Messmethoden abzuleiten.

In Tabelle 6.2 sind die berechneten Wahrscheinlichkeiten für die Annahme einer Signifikanz der einzelnen Varianten jeder Messmethode der N-Gehaltsbestimmung (LICF, N-Tester und NST) mittels Ein-Weg ANOVA zu DC 32 aufgeführt. Für Wahrscheinlichkeiten $P > 0,1$ gilt, dass sich die zwei betrachteten Varianten nicht signifikant (fett markiert) bzw. deutlich unterscheiden.

Tabelle 6.2: Berechnete Wahrscheinlichkeiten für die Annahme einer Signifikanz nach Ein-Weg ANOVA für die gemessenen Parameter F_{690}/F_{730} , BDI_{LICF} , N-Tester und Nitratschnelltest zur zweiten N-Gabe zu Winterweizen (DC 32)

Ein-Wege-ANOVA zweier Varianten								F_{690}/F_{730}	N-Tester	NST
V1	V2							0,087	0,001	0,014
V1		V3						0,097	9E-4	0,002
V1			V4					0,276	5E-4	0,003
	V2			V5				0,211	0,099	0,007
	V2				V6			0,088	0,078	0,008
	V2					V7		0,008	0,035	7E-5
	V2						V8	0,074	0,107	7E-5
		V3		V5				0,072	0,365	0,002
		V3			V6			0,017	0,282	0,002
		V3				V7		2E-4	0,188	4E-6
		V3					V8	0,009	0,372	4E-6
			V4	V5				0,093	0,263	0,002
			V4		V6			0,035	0,199	0,002
			V4			V7		0,003	0,105	4E-6
			V4				V8	0,028	0,274	4E-6

LICF-Messung zur dritten N-Gabe (DC 45)

Die Messungen mit dem Laser-N-Detektor zum Zeitpunkt der dritten N-Gabe sind im Hinblick auf die Bestimmung des N-Gehaltes über den Parameter F_{690}/F_{730} in der Abb. 6.5 und im Hinblick auf die Bestimmung der Bestandesdichte über den Parameter BDI_{LICF} in der Abb. 6.6 angegeben.

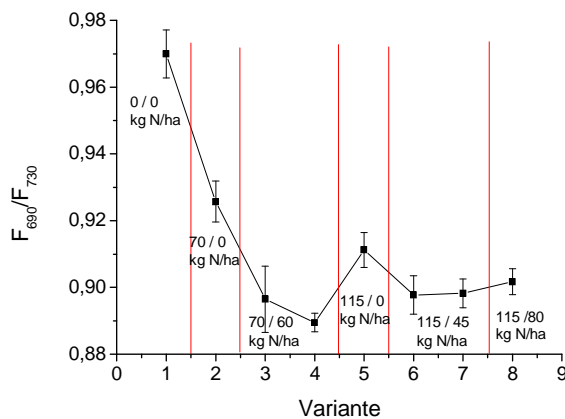


Abbildung 6.5: F_{690}/F_{730} zu WW (DC 45) zur 3. N-Gabe, unterhalb der Kurve ist die Menge an N zur ersten und zweiten N-Gabe angegeben

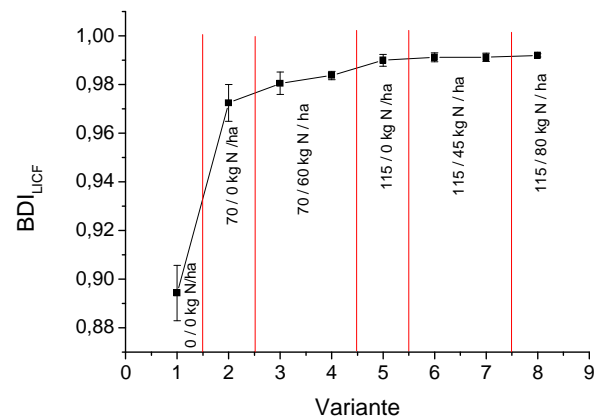


Abbildung 6.6: BDI_{LICF} zu WW (DC 45) zur 3. N-Gabe, unterhalb der Kurve ist die Menge an N zur ersten und zweiten N-Gabe angegeben

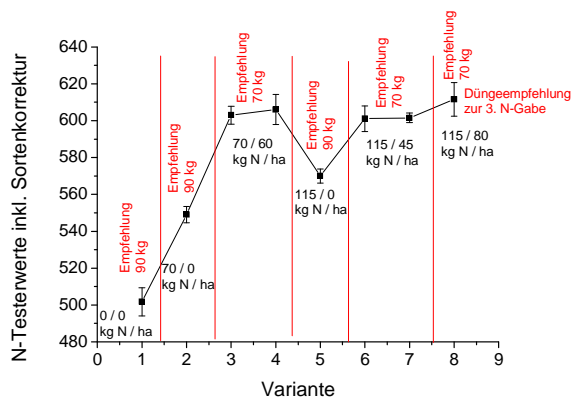


Abbildung 6.7: N-Tester zu WW (DC 45) zur 3. N-Gabe, unterhalb der Kurve ist die Menge an N zur ersten und zweiten N-Gabe dargestellt, oberhalb der Kurve ist die Düngempfehlung nach N-Tester dargestellt

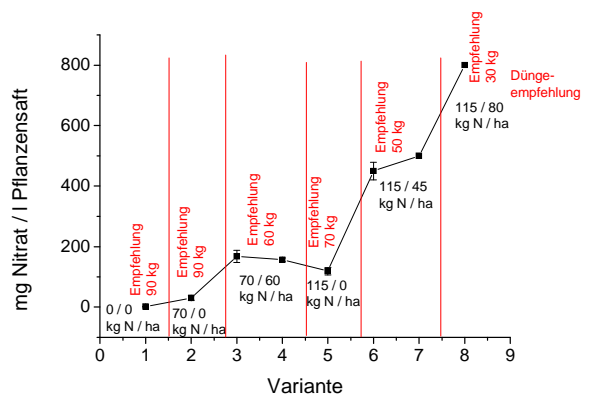


Abbildung 6.8: Nitratschnelltest zu WW (DC 45) zur 3. N-Gabe, unterhalb der Kurve ist die Menge an N zur ersten und zur zweiten N-Gabe dargestellt, oberhalb der Kurve ist die Düngempfehlung nach NST dargestellt

In den Abbildungen 6.7 und 6.8 sind die Ergebnisse der N-Testermessung und des Nitratschnelltestes zum Zeitpunkt der dritten N-Gabe angegeben. Die entsprechenden Düngempfehlungen sind ebenfalls dargestellt.

fehlungen sind ebenfalls in diesen Abbildungen angegeben und wurden über der Kurve in roter Schrift dargestellt.

Kornerträge

Die N-Düngung beeinflusst die Quantität und die Qualität des Erntegutes in erheblichen Umfang. Die richtige Bemessung der N-Düngung kann deshalb nur im Zusammenhang mit der Betrachtung der Ernteerträge abgeleitet werden. Abbildung 6.9 zeigt die nach der Ernte bestimmten Erträge, bezogen auf 86 % Trockensubstanz.

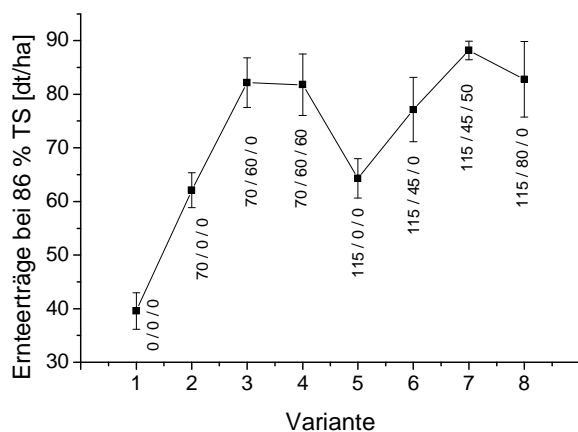


Abbildung 6.9: Kornerträge, unterhalb der Kurve ist die Menge an N zur ersten, zweiten und dritten N-Gabe angegeben

6.4 Diskussion der Ergebnisse

LICF-Messung zur zweiten N-Gabe (DC 32)

In der Tendenz werden von allen drei N-Nachweismethoden, der LICF, dem N-Tester und dem Nitratschnelltest, alle 3 N-Düngenniveaus, die Nullvariante, die 70 kg und die 115 kg Andüngung, zum Zeitpunkt der zweiten N-Gabe erkannt.

Dabei weisen gleich hohe Andüngungen der Varianten 2 bis 4 und der Varianten 5 bis 8 mehr oder weniger große Schwankungen auf. Die N-Gehalte zur zweiten N-Gabe sind trotz gleicher Andüngung zur ersten N-Gabe nicht gleich hoch. So finden sich in der Variante 2 beispiels-

weise mittels LICF - Messverfahren höhere N-Gehalte als in den Varianten 3 und 4. Die Variante 2 reagiert dafür aber mit leicht reduzierten Biomassen im Vergleich zu den Varianten 3 und 4 (Abb. 6.2). Der Nitratschnelltest zeigt ebenfalls, dass die N-Gehalte der Variante 2 geringfügiger höher ausfallen als die der Varianten 3 und 4. Der N-Test hingegen zeigt bei der Variante 2 im Durchschnitt erstaunlicherweise niedrigere N-Gehalte als die der Varianten 3 und 4.

Bei den Varianten 5 bis 8 scheint die Variante 7 die höchsten N-Gehalte aufzuweisen, wie das tendenziell alle Messverfahren mehr oder weniger zeigen. Allerdings sind die Unterschiede zwischen gleichen Varianten nicht sehr groß.

Vergleicht man die drei verschiedenen N-Düngerniveaus auf signifikante Unterschiede (Tabelle 6.2), so ergibt zeigt sich folgendes Bild: Der NST unterscheidet alle Varianten unterschiedlicher N-Düngeniveaus durchgängig signifikant. Bei der Bestimmung der N-Versorgung mittels LICF (F_{690}/F_{730}) unterscheiden sich alle Varianten unterschiedlicher N-Düngeniveaus mit Ausnahme von V1 zu V4 und V2 zu V5 signifikant untereinander. Mittels N-Tester zeigen 9 von 15 Vergleichen von Varianten unterschiedlicher N-Düngeniveaus keine signifikanten bzw. statistisch gesicherten Unterschiede.

Die einzelnen N-Steigerungen werden mittels NST am besten beschrieben. Der N-Tester spiegelt die N-Versorgungsstufen am schlechtesten wider. Die LICF hingegen scheint die N-Versorgungsstufen nicht ganz so deutlich wie der NST wiederzugeben, aber besser als der N-Tester darzustellen.

Diese unterschiedlichen Qualitäten der Bestimmungen der N-Versorgungen kann darauf zurückgeführt werden, dass es einen Gradienten der N- bzw. Chlorophyllgehalte in der Pflanze gibt (siehe Kapitel 7). Die Chlorophyll- bzw. N-Gehalte differenzieren am besten in den unteren Pflanzenteilen. In den obersten Pflanzenteilen sind die Unterschiede in der N-Versorgung nicht mehr so deutlich, da die Pflanzen bei Mangel Stickstoff aus den unteren Pflanzenpartien in die oberen Pflanzenteile umverlagern, um das Defizit in den oberen Pflanzenteilen auszugleichen. Der Nitratschnelltest misst in den unteren Partien der Pflanze, wo die N-Unterschiede am deutlichsten ausgeprägt sind. Der N-Tester wiederum misst den Chlorophyll- bzw. N-Gehalt in den obersten Pflanzenteilen, wo die N-Unterschiede nicht mehr so deutlich ausfallen. Der Laser-N-Detektor ist so ausgelegt, dass er die N-Unterschiede in den oberen bis mittleren Pflanzenpartien misst. In den mittleren Partien der Pflanze sind die Unterschiede nicht mehr so deutlich wie in den untersten Pflanzenpartien, aber deutlicher als in

den oberen Pflanzenpartien. Allerdings muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass bei deutlich dichteren Beständen, z.B. zur 3. N-Gabe, der Sensor auch immer weniger Pflanzenteile der mittleren Partien erfasst und somit in sehr dichten Pflanzenbeständen ebenfalls nur noch die oberen Pflanzenpartien erfasst (siehe Ergebnisse der dritten N-Gabe).

Es gibt einen weiteren deutlichen Unterschied in den drei Methoden. Der Nitratschnelltest misst den Gehalt an Nitrat, der in den Vakuolen der Pflanze gespeichert ist. Das bedeutet, dass zusätzlicher N, der von den Pflanzen aufgenommen wurde und der nicht reduziert wurde, mittels Nitratschnelltest erfasst werden kann. N-Tester und LICF messen den Anteil an N, der in das Chlorophyll der Pflanze eingebaut wurde. Der NST ist somit die genaueste aller drei Messmethoden zur Bestimmung der N-Versorgung der Pflanzen. Der Nitratschnelltest wie auch der N-Tester eignen sich jedoch nicht für die Durchführung der teilflächenspezifischen N-Düngung.

Im Hinblick auf die Kalibrierung des Sensorsystems und die Ableitung der richtigen N-Düngeempfehlung ist folgendes zu bemerken:

Die N-Düngeempfehlungen nach LICF können am besten in Anlehnung an die N-Düngeempfehlungen nach NST abgeleitet werden. Auch eine Kalibrierung nach den Empfehlungen des N-Testers ist möglich. Dabei sind die Düngeempfehlungen regionsspezifisch anzupassen. So hat sich beispielsweise der NST und dessen Düngeempfehlungen nur in den neuen Bundesländern durchsetzen können.

Der N-Tester ist für ganz Deutschland einheitlich kalibriert worden, obwohl hier zu beachten ist, dass die Ertragsniveaus regionsspezifisch unterschiedlich ausfallen können. Es ist deshalb in Betracht zu ziehen, abhängig vom Standort leichte Anpassungen der N-Empfehlungen vorzunehmen.

Die Höhe der Düngeempfehlungen nach N-Tester und NST fallen nicht immer exakt gleich hoch aus. In dem betrachteten Fall ist die Empfehlung nach N-Tester [**Hydro Agri, 2002**] im Gegensatz zur N-Empfehlung nach NST [**Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2002**] leicht höher ausgefallen, die Differenz beträgt ca. 10 – 15 kg N/ha. Im Jahre 2005 wurden neue N-Empfehlungen nach NST [**Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2005**] herausgegeben. Die neuen N-Empfehlungen stimmen in unserem Fall gut mit denen des N-Testers überein.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die LICF, gemessen zur zweiten N-Gabe zu Getreide die N-Unterschiede im Feld recht gut widerspiegelt.

Neben der N-Gehaltsbestimmung mittels LICF-Methode kann auch der Parameter Bestandesdichte zur teilflächenspezifischen Düngung herangezogen werden. Abbildung 6.2 zeigt, dass die BDI_{LICF} -Messung die einzelnen N-Düngeniveaus gut differenziert.

LICF-Messung zur dritten N-Gabe (DC 45)

Der Nitratschnelltest reagiert auf steigende N-Gaben zu DC 45, verabreicht zur ersten und zweiten N-Gabe, durchgängig mit steigenden Nitratgehalten in der Halmbasis der Getreidepflanzen. Sogar die Düngung oberhalb des Optimums wird vom Nitratschnelltest sehr gut angezeigt. Dementsprechend fallen auch die N-Düngeempfehlungen in einer weiten Spanne von 30 bis 90 kg N/ha nach NST aus.

Im Unterschied dazu lassen die Messungen nach LICF und N-Tester ein etwas anderes Bild erkennen. Hohe N-Gaben (oberhalb der optimalen N-Düngung) werden nach N-Tester und LICF nicht mehr genügend differenziert abgebildet. Dabei zeigen LICF und N-Tester gleiche Ergebnisse. Die Staffelung der verabreichten Gesamtstickstoffmenge, verabreicht zur ersten und zweiten N-Gabe, werden in den Varianten 1 bis 5 gut unterschieden, allerdings nicht mehr in den erhöhten Gesamt-N-Gaben der Varianten 6, 7 und 8. Die Varianten 3 und 4 (mit 70 und 60 kg N), 6 und 7 (mit 115 und 45 kg N) sowie 8 (mit 115 und 80 kg N) zeigen nach N-Tester und LICF mit F_{690}/F_{730} gleich hohe Chlorophyll- bzw. N-Gehalte an. Dieses Verhalten ist nicht verwunderlich, da überhöhte Mengen an N in den Vakuolen der Pflanzen gespeichert und nur bei Bedarf an N aus den Vakuolen abgerufen und in die entsprechenden Verbindungen, z.B. Chlorophyll, eingebaut werden. Somit kann zwar der NST die überhöhten N-Gaben von 115 kg N und 80 kg N erkennen, Messverfahren, die die N-Versorgung über den Chlorophyllgehalt der Pflanze ableiten, wie Reflexionsmessungen und Messung auf Basis der laserinduzierten Chlorophyllfluoreszenz, können nur die Mengen an N anzeigen, die bis dato in Chlorophyll umgesetzt wurden.

Die Bestandesdichtebestimmung mittels LICF unterscheidet die Varianten 3 und 4 mit jeweils 70 und 60 kg N von den Varianten 6 und 7 mit jeweils 115 und 45 kg N. Die Biomassen wer-

den nicht weiter differenziert zwischen den optimal gedüngten Varianten und der stark erhöhten Variante mit 115 kg N plus 80 kg N.

Auch hier kann angenommen werden, dass überhöhte N-Mengen, die in den Vakuolen gespeichert werden, zu diesem Zeitpunkt nicht mehr wesentlich zur Erhöhung der Biomasse beitragen.

Die LICF-Messung zur 3. N-Gabe lässt weiterhin erkennen, dass mit zunehmender Bestandesdichte nur noch die oberen Pflanzenpartien gemessen werden können. Die oberen Pflanzenpartien differenzieren jedoch bestehende Unterschiede im N-Gehalt nicht so gut wie untere Pflanzenpartien.

LICF-Messung zur dritten N-Gabe (DC 45) und Zusammenhang zu den Kornerträgen

Obwohl überhöhte N-Gaben an N, die in den Vakuolen gespeichert werden und noch nicht in das Chlorophyll eingebaut wurden, durch Messverfahren, die den N-Gehalt der Pflanze über den Chlorophyllgehalt messen und ableiten, nicht erkannt werden, besteht doch eine erstaunlich enge Korrelation ($R=0,95-0,97$) zwischen dem Chlorophyllgehalt und dem gemessenen Ertrag (Abb. 6.5, 6.7 und 6.9).

Das bedeutet, dass sich tatsächlich die erhöhten N-Gaben der Varianten 6 und 8, bestimmt zum Zeitpunkt kurz vor der dritten N-Gabe, nicht mehr in erhöhten Erträgen widerspiegeln. Offensichtlich trägt der zu diesem Zeitpunkt in den Vakuolen gespeicherte N nicht mehr zur Ertragsbildung bei. Nur die N-Gehalte im Korn können durch die Verlagerung des Stickstoffs aus den Vakuolen in die Getreidekörner positiv beeinflusst werden.

Eine Ausnahme bildet die Variante 7. Die statistisch gesicherten höheren Kornerträge der Variante 7 im Vergleich zu den Varianten 3, 4, 6 und 8 sind auf die N-Düngung zum Zeitpunkt der 3. N-Gabe zurückzuführen.

Die N-Düngung war bei den Varianten 6, 7 und 8 hinsichtlich des Ertrages eindeutig zu hoch bemessen. Schon die Bemessung der ersten N-Gabe nach NST (115 kg N/ha) wurde zu hoch veranschlagt und erzielt auf diesem Standort keinen Mehrertrag im Vergleich zur 70 kg An-düngung. Das wiederum erlässt erkennen, wie wichtig eine richtige Bemessung schon zur ersten N-Gabe ist.

6.5 Schlussfolgerungen

LICF-Messungen zu Getreide zum Zeitpunkt der zweiten N-Gabe zeigen recht gut unterschiedliche N-Versorgungen an. Die Ursache dafür scheint darin zu liegen, dass zu DC 32 der Pflanzenbestand noch nicht ganz geschlossen ist und somit die laserinduzierte Chlorophyllfluoreszenz auch aus den mittleren Partien der Getreidepflanze gemessen werden kann.

Eine unterschiedliche N-Versorgung zum Zeitpunkt der dritten N-Gabe wird von Chlorophyllmessverfahren nur in dem Maße wiedergegeben wie der aufgenommene Stickstoff in das Chlorophyll eingebaut wurde bzw. eingebaut wird. Stickstoff, der noch nicht ins Chlorophyll eingebaut, jedoch in den Vakuolen der Pflanze zwischengespeichert wird, kann nicht von Messverfahren, die über den Chlorophyllgehalt auf die N-Versorgung der Pflanze schließen, dargestellt werden. Das gilt für alle Messverfahren, die die N-Versorgung über die Bestimmung des Chlorophyllgehaltes ableiten, also auch für Reflexionsmessverfahren sowie für LICF-Messungen.

Zum Zeitpunkt der dritten N-Gabe besteht ein sehr enger Zusammenhang zwischen dem hier bestimmten Chlorophyllgehalt der obersten Pflanzenschichten und dem zu erwartenden Ertrag ($R=0,95-0,97$), wie die Ergebnisse der LICF-Messung und des N-Testers zeigen. Erhöhte N-Gaben, verabreicht zur ersten und zur zweiten N-Gabe, die sich zum Zeitpunkt der dritten N-Gabe noch nicht in erhöhten Chlorophyllgehalten der obersten Pflanzenschichten bemerkbar gemacht haben, setzten diese erhöhten N-Gaben nicht mehr in Ertrag um. Sie können lediglich zu erhöhten N-Gehalten im Korn beitragen.

Somit kann festgestellt werden, dass Messverfahren zur Chlorophyllmessung, wie die LICF-Messung, Defizite in der N-Versorgung recht gut widerspiegeln. Überversorgungen mit N werden jedoch von Messverfahren zur Messung des Chlorophylls nur unzureichend wiedergegeben.

7 Chlorophyll- und N-Verteilung in Getreidepflanzen

Das Messverfahren der laserinduzierten Chlorophyllfluoreszenz leitet den N-Status der Pflanze indirekt über die Messung des Chlorophyllgehaltes der Pflanze ab. Für das Verständnis dieses Messverfahrens ist es wichtig, die Verteilungsmuster von Chlorophyll in der Pflanze zu kennen.

Da der Fachliteratur wenig Aussagen bezüglich der Chlorophyllverteilung in der Pflanze zu entnehmen sind, wurden hierfür eigene Messungen in Form von Gefäß- und Feldversuchen zu Getreide mit differenzierter N-Düngung durchgeführt.

Die Ergebnisse lassen steigende Chlorophyllgehalte von den untersten Blattetagen bis zu den obersten Blattetagen erkennen. Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass bei N-Mangel eine Umverteilung an N in die obersten Blattetagen erfolgt, um eine optimale Ausnutzung der N-Ressourcen für die Photosynthese zu erreichen.

7.1 Einführung

Gradienten der N-Verteilung werden in [Connor et al., 1995; Shiraiwa & Sinclair, 1993; Hirose & Werger, 1987a] beschrieben. Der Hauptgrund für die höheren N-Gehalte in den oberen Pflanzenebenen und niedrigere N-Gehalte in den unteren Pflanzenebenen (vertikale N-Verteilung) ist in der Reaktion der Pflanze auf unterschiedliche Lichtverhältnisse innerhalb des Bestandes zu sehen [Rousseaux et al., 1999; Hirose & Werger, 1987b] und dient dazu, die Photosynthese zu optimieren. Neben unterschiedlichen Strahlungsbedingungen im Bestand wird dieser Gradient von der N-Versorgung beeinflusst [Dreccer et al., 2000].

Bei den von uns im Hinblick auf Relevanz für den Einsatz der LICF-Messung durchgeführten Untersuchungen liegt der Schwerpunkt auf der N-Versorgung von Pflanzenbeständen, die gleichen Lichtbedingungen ausgesetzt sind. Auf die Untersuchung des Zusammenhangs der Lichtverhältnisse mit den vertikalen N-Gradienten wurde aus diesem Grunde verzichtet.

In der Literatur wird wenig auf die Verteilung von Chlorophyll innerhalb der Pflanze eingegangen, obwohl Verteilungen des Stickstoffs innerhalb der Pflanze beschrieben werden. Es ist davon auszugehen, dass es einen engen Zusammenhang zwischen den N-Gehalten und den Chlorophyllgehalten [Bredemeier, 2005; Waskom et al., 1996; Filella et al., 1995; Shad-

china & Dmitrieva, 1995; Adams et al., 1990] gibt, dennoch bleibt grundsätzlich ungeklärt, ob die Verteilungen des Chlorophylls in den obersten Pflanzenebenen analog zum Stickstoff erfolgen oder ob hier z.B. Sättigungseffekte auftreten.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zur Chlorophyll- bzw. N-Verteilung fanden an Getreidepflanzen statt. Mit diesem Kapitel sollten vor allem folgende Fragen bezüglich der Anwendung der laserinduzierten Chlorophyllfluoreszenz im Rahmen der Messung der Chlorophyll- bzw. Stickstoffversorgung ganzer Getreidebestände geklärt werden:

- Welche Pflanzenebene spiegelt am besten die N-Versorgung im Pflanzenbestand wider?
- Welche Aussagen bezüglich der N-Versorgung liefern die obersten Pflanzenschichten?
- Treten in den obersten Pflanzenebenen Sättigungseffekte bezüglich des Chlorophyllgehaltes auf, wie man sie aus den Ergebnissen aus Kapitel 6 ableiten könnte?

Untersuchungen zur N-Verteilung bzw. Chlorophyllverteilung lassen sich am einfachsten im Gefäßversuch durchführen. Da im Gefäßversuch andere Lichtverhältnisse herrschen als im Feldbestand (das Lichtangebot ist in den unteren Pflanzenebenen im Gefäßversuch deutlich höher als in Feldbeständen, weil die Pflanzen im Feld von den Nachbarpflanzen stärker beschattet werden), die Hauptanwendung der LICF jedoch im Feldeinsatz zu sehen ist, wurde zusätzlich zur Chlorophyllverteilung im Gefäßversuch die Chlorophyllverteilung im Feldversuch betrachtet.

7.2 *Material und Methoden*

Feldversuch

Ein Feldversuch zu Winterweizen, Sorte Tarso, wurde mit unterschiedlicher Stickstoffversorgung angelegt. Dieser Versuch wurde auf dem Kühnfeld der Universität Halle-Wittenberg als Parallelversuch zum im Kapitel 6 beschriebenen Versuch im Jahre 2001 angelegt (siehe Tabelle 7.1). Die erste N-Gabe zu Vegetationsbeginn von 105 kg N/ha erfolgte nach Berechnung auf Basis der Stickstoffbedarfsanalyse (SBA) im Jahre 2002. 70 kg N wurde als leicht reduzierte N-Gabe zu Vegetationsbeginn gewählt. Die Menge an N zur zweiten N-Gabe der Vari-

anten 3 und 6 wurden mit Hilfe des Nitratschnelltestes ermittelt. 80 kg N der Variante 8 stellt eine stark übertersorgte Variante zur zweiten N-Gabe (DC 32) dar.

Tabelle 7.1: N-Düngungsvarianten zu Getreide zur 1., 2. und 3. N-Gabe in kg N/ha

Versuchs- glied	1. N-Gabe (Vegetationsbe- ginn)	2. N-Gabe (DC 32)	3. N- Gabe (DC 45)	Summe
1	0	0	0	0
2	70	0	0	70
3	70	60	0	130
6	105 ¹⁾	45	0	150
8	105 ¹⁾	80	0	185

¹⁾ unterteilt in zwei Gaben von 60 kg N/ha und 45 kg N/ha

Im Rahmen der Klärung der Verteilung des Chlorophylls in der Pflanze wurden Pflanzen der Varianten ohne 3. Stickstoffgabe (DC 45), nämlich der Varianten 1, 2, 3, 6 und 8 zum Zeitpunkt DC 60 geerntet und chemisch im Labor untersucht. Eine Mischprobe wurde aus 24 Pflanzen pro Variante (6 Pflanzen pro Variante in 4 facher Wiederholung) genommen, wobei die Pflanzen in zwei Teile separiert wurden, in Blätter der oberen Pflanzenschichten und in Blätter der unteren Pflanzenschichten, die im Labor getrennt auf die Menge an Chlorophyll-*a* untersucht wurden.

Eine Woche zuvor wurde dieser Versuch zu DC 45 mit dem Laser-N-Detektor gemessen.

Gefäßversuch

Ein Stickstoffsteigerungsversuch zu Getreide in dreifacher Wiederholung wurde im Jahre 2000 mit einer Sorte Gerste (Candesse) und drei Sorten Weizen angelegt und im Jahre 2001 mit dem Laser-N-Detektor gemessen. Die Getreidepflanzen (20 Stück) wurden für Gerste am

9.10.2000 und für Winterweizen am 23.10.2000 in Mitscherlichgefäßen in einem Substrat bestehend aus 6 kg reinem Quarzsand (WF 33), 0,5 kg Boden vom Julius-Kühn-Versuchsfeld der Universität Halle und 0,5 kg Quarzsand als Deckschicht gezogen. Der Boden und der Quarzsand erfuhren eine innige Mischung, und es wurden folgende Nährstoffe zugesetzt: 2,89 g $\text{CaHPO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ (= 0,52 g P) sowie 600 ml destilliertes Wasser mit 100 ml Nährlösung bestehend aus 2,94 g K_2SO_4 (= 1,32 g K), 3,04 g $\text{MgSO}_4 \times 7 \text{H}_2\text{O}$ (= 0,3 g Mg), 1ml 10%ige FeCl_3 -Lösung und 2 ml A-Z-Lösung nach Hoagland und Snyder [Schilling, 2000]. Ein Teil der Gefäße wurde zur Aussaat nicht mit N gedüngt. Ein anderer Teil wurde mit 0,3 g N pro Gefäß in Form von 0,9 g NH_4NO_3 versehen. Die nächste Differenzierung wurde mit 0,3 g N zu einem Zeitpunkt angelegt, als die 0,3 g Variante die ersten Mangelsymptome an den ältesten Blättern anzeigte, nämlich am 20.03.2001 (Zeitpunkt Bestockung). Die nächsten Mangelsymptome wurden am 10.05.2001 gezeigt (zum Zeitpunkt Schossen). An diesem Messtermin standen somit drei N-Steigerungen zur Verfügung, wobei die 0,6 g Variante leichte Mangelsymptome zeigte. Ende Mai (Ende Ährenschieben) standen 5 Steigerungen zur Verfügung: 0, 0,3, 0,6, 0,9 und 1,0 g N pro Gefäß.

Für die Messungen des Chlorophyllgehaltes mittels LICF-Messverfahren stand eine ältere Sensorgeneration des Laser-N-Detektors zur Verfügung, die mit einer Messfrequenz von lediglich 1 kHz arbeitete und die die Scanfunktion noch nicht beinhaltete. Zu diesem Zeitpunkt erfolgte noch keine Bestimmung von BDI_{LICF} .

Die Gefäße wurden zum jeweiligen Messtermin auf einen Drehteller gestellt. Dabei wurden die Gefäße mit dem Laser-N-Detektor aus einem Abstand von ca. 3,2 m zum Zeitpunkt Schossen in 2 bzw. zum Zeitpunkt Ende Ährenschieben in 3 Pflanzenebenen im Winkel von ca. 45° (siehe Abb. 7.1) gemessen.

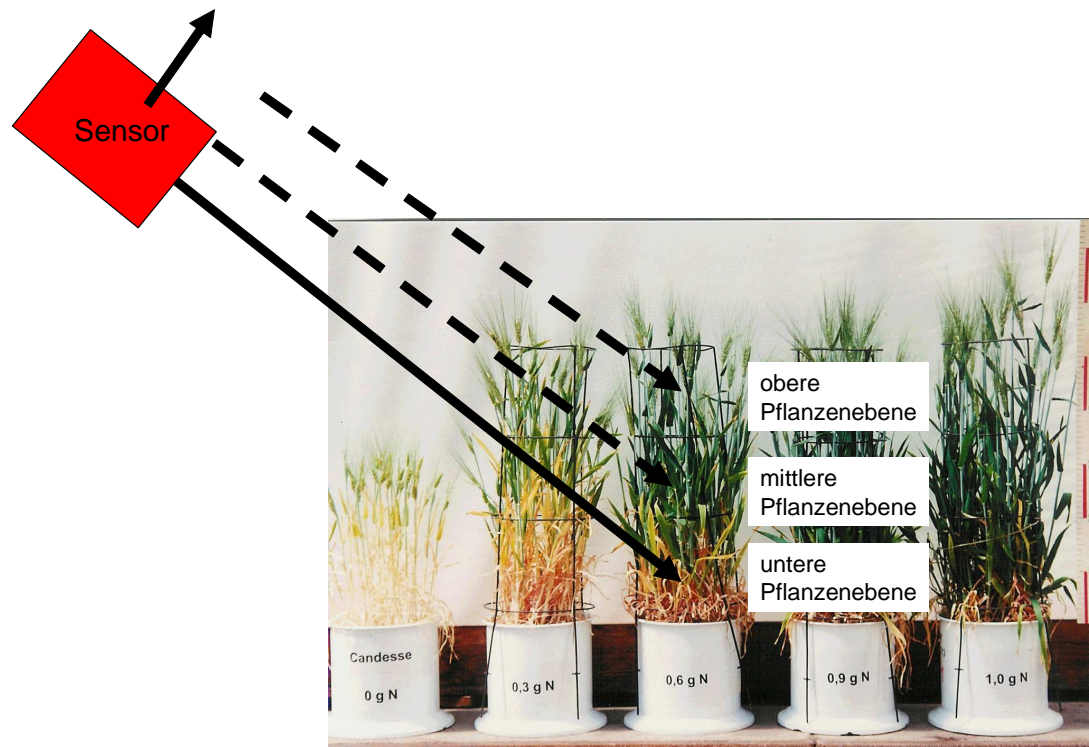


Abbildung 7.1: Messung der LICF mit dem Laser-N-Detektor in verschiedenen Pflanzenebenen (hier dargestellt Wintergerste Ende Ährenschieben)

Zum Zeitpunkt Schossen wurden die Pflanzen in den Höhen 14 cm über der Bodenfläche (untere Pflanzenebene) bzw. 34 cm über der Bodenfläche (obere Pflanzenebene) gemessen. Die Wuchshöhen der Weizenpflanzen mit Null kg N (Nullvarianten) betragen weniger als 34 cm, weshalb diese Messwerte in den einzelnen Abbildungen nicht dargestellt werden konnten. Zum Zeitpunkt Ende Ährenschieben wurde die LICF-Messung in folgenden Pflanzenhöhen durchgeführt: mit 14 cm über der Bodenfläche (untere Pflanzenebene), 34 cm über der Bodenfläche (mittlere Pflanzenebene) und 44 cm über der Bodenfläche (obere Pflanzenebene). Die Gesamtpflanzenhöhe betrug zu BBCH 55 ca. 47-50 cm Höhe. Die Messhöhe von ca. 44 cm stellt dabei ein Mittel aus dem Bereich von ca. 40 cm bis ca. 50 cm Wuchshöhe dar. Das gleiche gilt auch für die unteren und mittleren Pflanzenbereiche. Der untere Pflanzenbereich von ca. 14 cm über der Bodenfläche erstreckt sich von ca. 10 bis ca. 20 cm über der Bodenfläche und die mittlere Pflanzenebene von ca. 30 – 40 cm über der Bodenfläche.

Der Drehteller wurde mit einer einheitlichen Geschwindigkeit betrieben. Dies bewirkt eine Wanderung des Laserstrahls und damit des Messflecks über den Gefäßbestand. Hierdurch werden bestimmte Effekte, wie der Kautskyeffekt [**Lichtenthaler & Rinderle, 1988**], der auftritt, wenn der Laserstrahl permanent auf ein Pflanzenorgan strahlt, vermieden. Würde der Laserstrahl permanent auf dasselbe Pflanzenorgan gerichtet, würde der Quotient F_{690}/F_{730} mit der Zeit sinken. Auf dem Feld tritt der Kautskyeffekt nicht auf, weil der Traktor bei der Düngung in Fahrbewegung ist und hierdurch eine längere Bestrahlung desselben Pflanzenorgans vermieden wird.

7.3 Messergebnisse

Feldversuch

Abb. 7.2 zeigt die Ergebnisse der chemischen Chlorophyll-*a*-Bestimmung getrennt nach Blättern der unteren Pflanzenebenen und Blättern der oberen Pflanzenebenen zu DC 60. Dabei fällt auf, dass die unteren Blätter höhere N-Versorgungsstufen durchgängig gut widerspiegeln, die oberen Blätter hingegen nicht.

Eine Woche zuvor wurde zum Zeitpunkt der 3. N-Gabe (DC 45) der Versuch mit dem Laser-N-Detektor gemessen. Die Ergebnisse sind der Abb. 7.3 zu entnehmen. Die höheren N-Versorgungsstufen werden von der Chlorophyllbestimmung mittels LICF-Messung der oberen Blätter am 30.05.2002 zu DC 45 ebenso unzureichend widerspiegelt wie durch die Ergebnisse der chemisch bestimmten Chlorophyllgehalte der oberen Pflanzenschichten am 7.06.2002 zu DC 60.

In Abb. 7.4. sind die Kornerträge dieses Feldversuches dargestellt. Die Erträge zeigen, dass die erhöhten N-Gaben, die sich zum Zeitpunkt der dritten N-Gabe noch nicht in Chlorophyll widerspiegeln, auch nicht mehr ertragswirksam wurden. Die erhöhten N-Gaben können zu diesem Zeitpunkt nur noch zur Steigerung des Rohproteingehaltes beitragen. Ähnliche Ergebnisse zeigen die Messungen aus Kapitel 6.

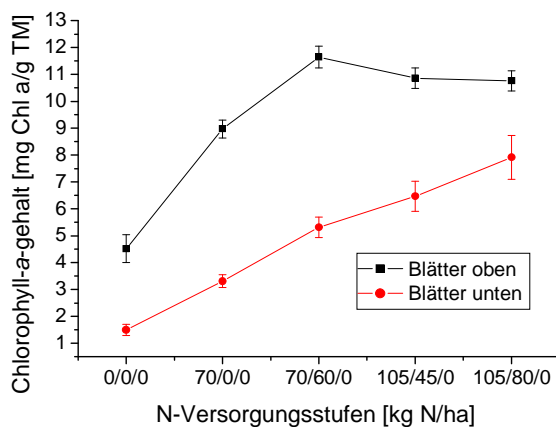


Abbildung 7.2: Chlorophyllverteilung der oberen und unteren Blätter im Feldbestand von Getreide zu Beginn Blüte (DC 60) am 07.06.02 in Abhängigkeit von der N-Versorgungsstufe, die die Menge an N zur ersten, zweiten und dritten N-Gabe widerspiegelt

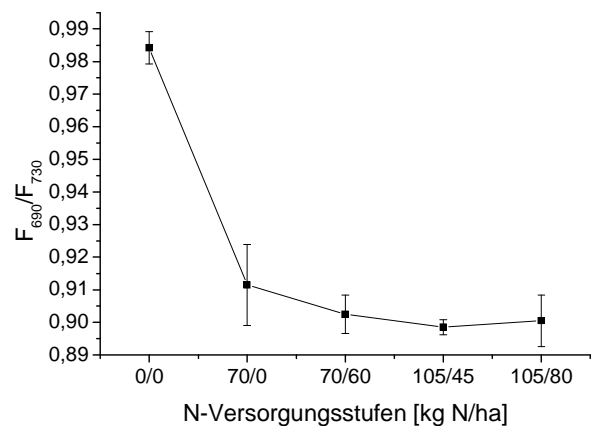


Abbildung 7.3: F_{690}/F_{730} der oberen Blätter im Feldbestand von Getreide zu DC 45 am 30.05.02 in Abhängigkeit von der N-Versorgungsstufe, die die Menge an N zur ersten und zweiten N-Gabe widerspiegelt

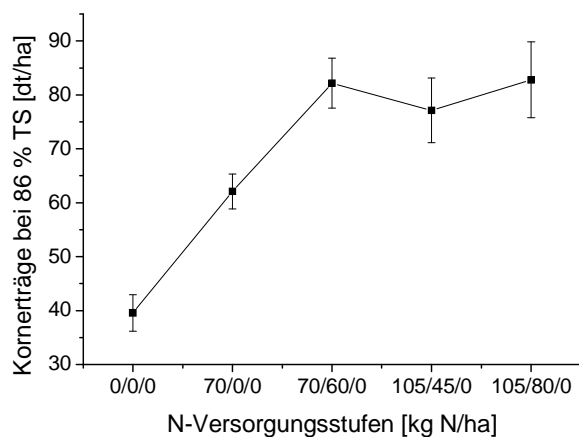


Abbildung 7.4: Kornträge des Feldversuches in Abhängigkeit von der N-Versorgungsstufe, die die Menge an N verabreicht zur ersten, zweiten und dritten N-Gabe widerspiegelt

Gefäßversuch

Ein mit unterschiedlichen N-Versorgungsstufen versehener Gefäßversuch zu Getreide (Winterweizensorten: Tarso, Novalis und Altos und Wintergerstensorte: Candesse) wurde zu verschiedenen Zeitpunkten (Schossen und Ende Ährenschieben) in verschiedenen Pflanzenhöhen mittels LICF-Methode gemessen. Die Ergebnisse sind den Abb. 7.5-7.12 zu entnehmen.

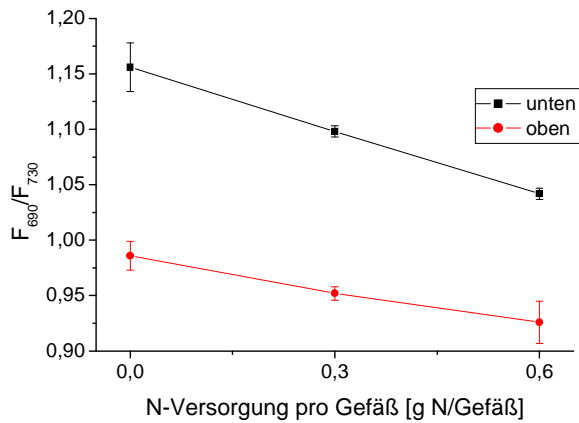


Abbildung 7.5: F_{690}/F_{730} in verschiedenen Pflanzenebenen gemessen, Gerste (Candesse) zum Schossen am 09.05.01, Gefäßversuch Halle

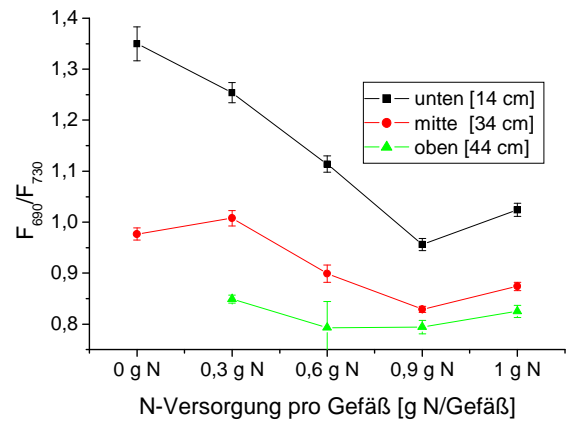


Abbildung 7.6: F_{690}/F_{730} in verschiedenen Pflanzenebenen gemessen, Gerste (Candesse) zum Ende Ährenschieben am 28.05.01, Gefäßversuch Halle

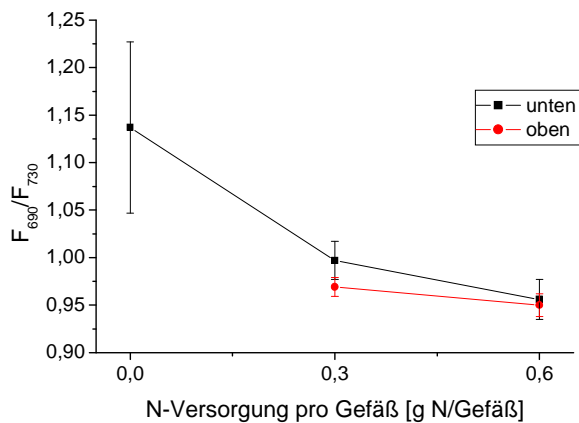


Abbildung 7.7: F_{690}/F_{730} in verschiedenen Pflanzenebenen gemessen, Weizen (Tarso) zum Schossen am 09.05.01, Gefäßversuch Halle

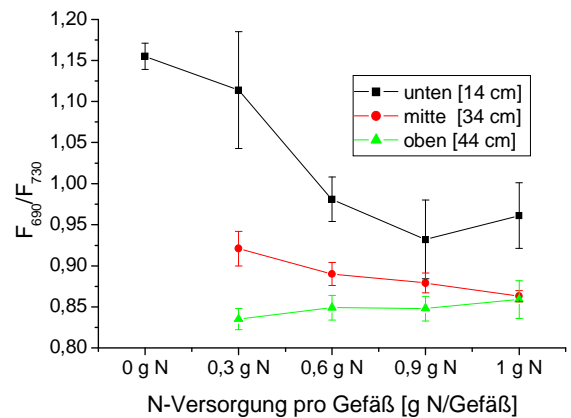


Abbildung 7.8: F_{690}/F_{730} in verschiedenen Pflanzenebenen gemessen, Weizen (Tarso) zum Ende Ährenschieben am 30.05.01, Gefäßversuch Halle

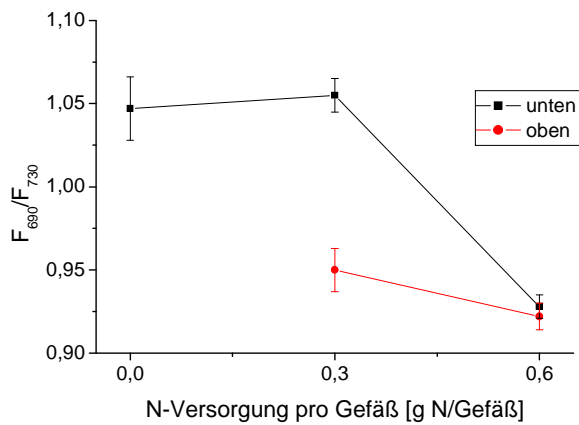


Abbildung 7.9: F_{690}/F_{730} in verschiedenen Pflanzenebenen gemessen, Weizen (Altos) zum Schossen am 09.05.01, Gefäßversuch Halle

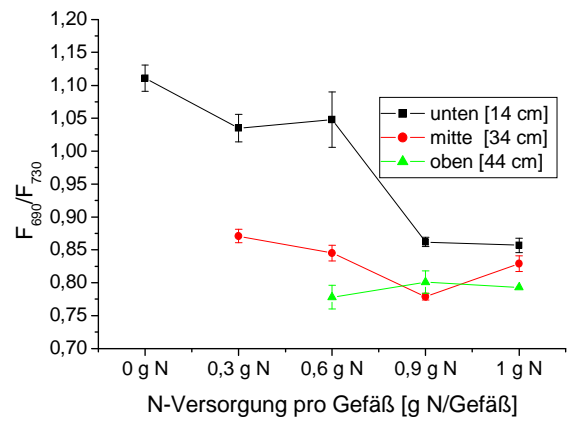


Abbildung 7.10: F_{690}/F_{730} in verschiedenen Pflanzenebenen gemessen, Weizen (Altos) zum Ende Ährenschieben am 28.05.01, Gefäßversuch Halle

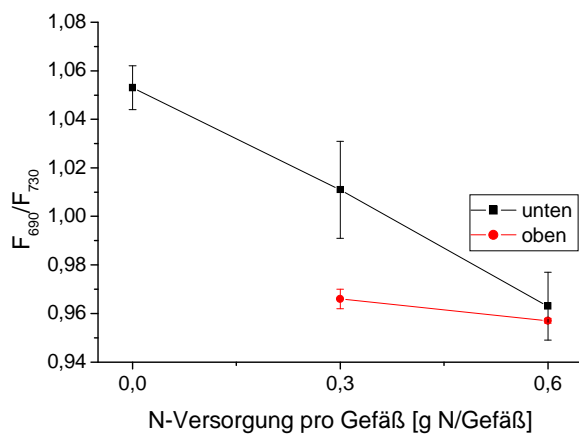


Abbildung 7.11: F_{690}/F_{730} in verschiedenen Pflanzenebenen gemessen, Weizen (Novalis) zum Schossen am 09.05.01, Gefäßversuch Halle

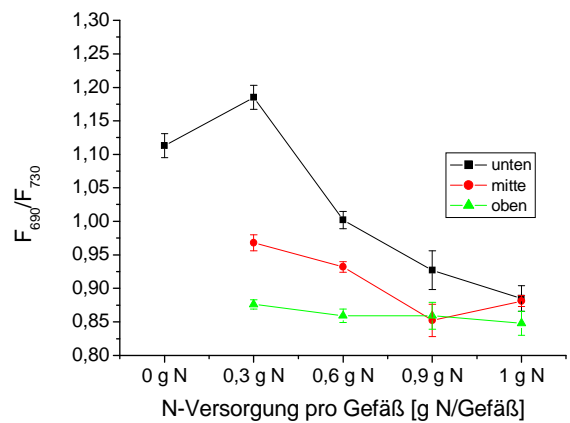


Abbildung 7.12: F_{690}/F_{730} in verschiedenen Pflanzenebenen gemessen, Weizen (Novalis) zum Ende Ährenschieben am 28.05.01, Gefäßversuch Halle

7.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Gefäß- bzw. des Feldversuches lassen, wie erwartet, einen Gradienten der Chlorophyll- bzw. der N-Verteilung in der Getreidepflanze erkennen. In den unteren Pflanzenebenen sind die Chlorophyllgehalte mengenmäßig am geringsten. In den obersten Pflanzenschichten sind die Chlorophyll- bzw. N-Gehalte mengenmäßig am höchsten. Die mittleren

Pflanzenpartien weisen mengenmäßig mittlere Chlorophyllgehalte auf. Die Menge an Chlorophyll nimmt somit von der Pflanzenbasis bis zur Pflanzenspitze in Getreidepflanzen zu. Dieser Gradient ist in Getreidepflanzen, wie die Ergebnisse zeigen, unabhängig vom jeweiligen Entwicklungsstadium vorzufinden.

Die Ergebnisse des Gefäß- bzw. des Feldversuches lassen weiterhin erkennen, dass die unteren Pflanzenblätter eine gestaffelte N-Versorgung besser widerspiegeln als die oberen Pflanzenblätter. Die mittleren Pflanzenblätter zeigen eine steigende N-Versorgung besser als die oberen Pflanzenblätter an, aber schlechter als die unteren Pflanzenblätter. Dieser Effekt scheint abhängig vom jeweiligen Entwicklungsstadium der Pflanze aufzutreten. Zum Zeitpunkt Schossen zeigen sowohl die untersten, als auch die obersten Pflanzenebenen durchgängig steigende N-Versorgungen an, obwohl die unteren Pflanzenebenen Differenzen in der N-Versorgung deutlicher zeigen können als die oberen Pflanzenschichten. Mit einer gut auflösenden Messtechnik sind also auch die obersten Pflanzenschichten zum Zeitpunkt Schossen geeignet, die jeweiligen N-Versorgungen aus den gemessenen Chlorophyllgehalten abzuleiten, wie das die Ergebnisse der LICF-Messung des Stickstoffsteigerungsversuches in Kapitel 6 zu DC 32 zeigen.

Zum Zeitpunkt Ende Ährenschieben, d.h. zum Zeitpunkt der dritten N-Gabe und später, spiegeln die obersten Pflanzenschichten die jeweilige N-Versorgung nur noch unzureichend wider, da die obersten Schichten eine relativ gute N-Versorgung in allen N-Versorgungsstufen erkennen lassen. Im Gegensatz dazu ist das Defizit der N-Versorgung in den unteren Bereichen der Pflanze gut zu sehen. Die Messergebnisse lassen sich folgendermaßen erklären: Bei Mangel an N lagert die Pflanze bevorzugt N aus den unteren Blätter in die oberen Blätter um. Diese Umverlagerung scheint bei hohem N-Defizit stärker stattzufinden als bei geringerem N-Mangel. Die Umverlagerung wird gestoppt, wenn eine Menge an Chlorophyll in den obersten Blattetagen erreicht wird, die optimal ist. Luxusmengen an Chlorophyll scheinen nicht gebildet zu werden (Vergleich Menge an 0,9 g N und 1,0 g N im Gefäßversuch). Somit wird nur soviel N in die obersten Blattetagen umverlagert, die zu diesem Zeitpunkt eine optimale Photosynthese ermöglichen und sich entsprechend im Ertrag niederschlagen.

7.5 **Schlussfolgerungen**

Für den Einsatz der LICF-Technik im Rahmen der teilschlagspezifischen N-Düngung lassen sich aus den Ergebnissen folgende Schlussfolgerungen ableiten.

Zum Zeitpunkt der zweiten bis frühen dritten N-Gabe zu Getreide (Schossen) werden die einzelnen N-Versorgungsstufen in den oberen Blattetagen recht gut wiedergespiegelt, auch wenn zu diesem Zeitpunkt die N-Versorgung noch besser von den untersten Blattetagen dargestellt wird. Mit einer gut auflösenden Messtechnik können die N-Versorgungsstufen zur zweiten N-Gabe bzw. zeitigen dritten N-Gabe über die Messung des Chlorophylls aus den obersten Blattschichten gut abgebildet werden.

Zum Zeitpunkt einer späten dritten N-Gabe spiegeln die obersten Blattetagen eine differenzierte N-Versorgung nicht mehr ausreichend genau wider, was auf Umverteilungseffekte an N in der Pflanze zurückzuführen ist. Die untersten Bereiche der Pflanze sind am besten geeignet, die N-Versorgung entsprechend gut abzubilden. Eine entsprechende Messtechnik, die die N-Versorgung in den unteren Pflanzenbereichen misst, wäre hier von Vorteil. Das trifft für alle Messverfahren, die die N-Versorgung über den Chlorophyllgehalt der obersten Pflanzenebenen ableiten, zu.

Allerdings ist eine Messtechnik, die die N-Versorgung an den untersten Pflanzenblättern misst, schwierig zu realisieren, da diese einige Probleme mit sich bringen würde. Zunächst müsste die Messtechnik durch den Bestand geführt werden. Das wiederum kann zu Bestandeszerstörungen führen. Auch würde die Messtechnik starken Verschmutzungen ausgesetzt sein. Optische Systeme sind für Schmutz jedoch empfindlich. Dies kann die Messergebnisse negativ beeinflussen, falls nicht ständig gereinigt wird. Weiterhin ist eine Bestandesdichtemessung, die parallel zur Messung von F_{690}/F_{730} durchgeführt werden kann, sinnvoller an den obersten Blattschichten durchzuführen. Eine Bestandesdichtemessung an der Pflanzenbasis durchzuführen, dürfte ungeeignet sein, da hier keine ausreichende Messstatistik über eine bestimmte Fläche erreicht werden kann.

8 Gesamtdiskussion

Die zunehmende Globalisierung unserer Märkte ist für die Landwirtschaft heute mehr denn je mit ökonomischen Zwängen verbunden, denn eine Produktion der landwirtschaftlichen Kulturen zu Weltmarktpreisen ist längerfristig unumgänglich. Bisherige Preisstützungen (prämienbegünstigte Kulturen waren bisher vor allem Getreide und Raps) werden deshalb sukzessiv EU-weit abgebaut [Jochimsen, 2004]. Hinzu kommen steigende Betriebsmittelpreise. Gerade im N-Düngemittelsektor sind die Weltmarktpreise auf Rekordniveau gestiegen [DLG Mitteilungen 10/04], die den ökonomischen Druck auf die Landwirtschaft noch verstärken.

Im Zuge des ökonomischen Drucks ist Precision Farming als ein wichtiger Baustein zur Optimierung von Ertrag und Betriebsmitteleinsatz anzusehen. Dieser Form der Landbewirtschaftung liegt der Gedanke zu Grunde, dass gerade sehr große Schläge keine einheitliche Bodenstruktur besitzen, sondern heterogen ausgeprägt sind bzw. kleinräumig variieren. Die kleinräumige Variabilität eines Standortes geht jedoch einher mit Unterschieden in der Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit der Böden, die sich auch auf die Ertragsstruktur der angebauten Kulturen kleinräumig auswirken. Nimmt man auf großen heterogenen Schlägen eine schlag-einheitliche Düngung vor, so würden Teilzonen, die schon besser als der Durchschnitt mit Stickstoff versorgt sind, überdüngt. Hier treten neben N-Düngerverschwendung und erhöhter Umweltbelastung auch wirtschaftliche Nachteile durch Lagerschäden und erhöhten Krankheitsdruck auf. Demgegenüber erhalten Teilzonen, die weniger Stickstoff als der Durchschnitt aufweisen, entsprechend zu wenig Dünger, Ertragsnachteile sind auch hier die Folge. Eine teilflächenspezifische N-Düngung ist somit auf heterogenen Standorten der schlageinheitlichen N-Düngung vorzuziehen.

Das in dieser Arbeit untersuchte Messverfahren der LICF hat sich im Rahmen dieser Arbeit als vielversprechende Alternative zu bisher in der teilflächenspezifischen N-Düngung eingesetzten Messverfahren erwiesen und bietet darüber hinaus neue Einsatzmöglichkeiten und Perspektiven.

8.1 Bewertung des Einsatzpotentials der LICF-Messung zur teilflächenspezifischen Regulierung der ersten N-Gabe

Ursachen für unterschiedliche Bestände zu Vegetationsbeginn können sein: Aussaatfehler, unterschiedlicher Feldaufgang, unterschiedliche Auswinterung aufgrund unterschiedlichen Mikroklimas, differenzierte Bodentopologie und Bodenbeschaffenheit usw.

Da die erste N-Gabe bei Wintergetreidearten die Bestockung fördert, kann eine unzureichende N-Gabe zu Vegetationsbeginn im Frühjahr zu einer unzureichenden Bestockung und eine zu hohe N-Gabe zu einer unproduktiven Bestockung beitragen. Eine ausreichende Bestockung könnte mit Hilfe der hier eingesetzten Sensorik erreicht werden. Ökonomische und ökologische Vorteile lassen sich daraus ableiten.

Die erste N-Gabe zu Winterraps fördert die Regeneration der über den Winter hinweg zerstörten Assimilationsflächen. Auch hier ist eine richtige Bemessung der N-Gabe unter Berücksichtigung der Bestandesdichte sinnvoll. Eine zu niedrige Bemessung der ersten N-Gabe führt zu kleinen Blattflächen, die weniger zur Photosynthese beitragen können und außerdem zu unzureichender Unkrautunterdrückung. Eine zu hohe Bemessung der ersten N-Gabe ist ebenfalls zu vermeiden, da sie zu umfangreichem vegetativen Wachstum, anhaltender Neuanlage und langer Lebensdauer von vegetativen Pflanzenteilen führt. Die richtige Bemessung der ersten N-Gabe unter Berücksichtigung der vorherrschenden Bestandesdichte erscheint bei Winterraps daher sinnvoll. Da die erste N-Gabe zu Vegetationsbeginn zu Winterraps hoch ausfällt, bietet diese Kultur reichliches Einsparungspotential an Stickstoff, wenn die Bestandesdichte ausreichend Berücksichtigung findet.

Die N-Gehalte der Pflanzen können zur ersten N-Gabe noch nicht herangezogen werden, da sie erst im Laufe der Vegetation, bei Wintergetreide erst zur zweiten N-Gabe, ausreichend differenzieren.

Zur Regulierung der teilflächenspezifischen N-Menge der ersten N-Gabe erscheint die Bestandesdichte ein geeigneter Parameter, da diese auch in der schlageinheitlichen N-Düngung bei Wintergetreide und Winterraps über bestimmte Zu- und Abschläge (+/- 20 kg N) Berücksichtigung findet [Schilling, 2000]. Inwieweit die Zu- bzw. Abschläge der schlageinheitlichen N-Düngung für die Regulierung der teilflächenspezifischen N-Düngung der ersten N-Gabe

übernommen werden können oder ob die entsprechenden Zu- und Abschläge modifiziert werden müssen, können nur gesonderte Versuche zu den entsprechenden Kulturen zeigen.

Mit Hilfe der LICF steht erstmalig ein geeignetes Messverfahren zur Verfügung, welches im Rahmen der teilschlagspezifischen N-Düngung schon ab der ersten N-Gabe eingesetzt werden kann. Die Möglichkeit zur teilflächenspezifischen Regulierung der ersten N-Gabe besteht weder bei Messverfahren auf Basis von Reflexionsmessungen des Lichtes noch bei Kontaktmessungen an Pflanzen, bei denen die Auslenkung eines Pendelkörpers mechanisch gemessen wird. Auch eine auf dem Messprinzip der laserinduzierten Chlorophyllfluoreszenz beruhende Technik [Schächtl et al., 2005] dürfte aufgrund einer unzureichenden flächigen Messung des Bestandes (Messung erfolgt hier im Nahbereich der Pflanze auf oberstem Blattniveau) keine Messungen der Bestandesdichte erlauben.

Ein ganz entscheidender Vorteil des hier eingesetzten Messverfahrens besteht darin, dass bei der LICF die gemessenen optischen Signale nur von den Pflanzen stammen und der Boden in den von uns betrachteten Wellenlängen nicht fluoresziert. Somit fungiert der Boden bei diesem Messverfahren nicht als Störgröße, was als ein entscheidender Vorteil zu anderen Messverfahren, wie z.B. der Reflexionsmessung, angesehen werden kann. Dieses Verhalten ermöglicht Messungen schon zu sehr frühen Pflanzenstadien. Mit Hilfe der verwendeten Sensortechnik, die eine flächige Messung im Pflanzenbestand erlaubt, konnte im Zuge dieser Arbeit neben dem bisher in der Literatur beschriebenen Parameter F_{690}/F_{730} , der über den Chlorophyllgehalt ein Maß für die N-Versorgung des Pflanzenbestandes darstellt, erstmals ein neuer zuverlässiger Parameter ermittelt werden. Dieser neue Parameter spiegelt sehr gut die Bestandesdichte bzw. die Biomasse im Pflanzenbestand wider und wird als BDI_{LICF} bezeichnet.

Bestandesdichtemessungen auf Basis der LICF (BDI_{LICF} -Messungen) wurden zu frühen Pflanzenstadien an Winterraps- und Wintergetreidepflanzen durchgeführt. Zwischen der Anzahl der Pflanzen und BDI_{LICF} konnte in einem Getreidebestand mit unterschiedlicher Bestandesdichte zur ersten N-Gabe (BBCH 21) eine sehr enge Korrelation von $R^2=1$ ermittelt werden. Die Ergebnisse an Getreide- und Rapsbeständen zeigen, dass Bestandesdichtemessungen in einer breiten Spanne von keiner Biomasse bis hoher Biomasse durchgeführt werden können.

Für die praktische Anwendung des Messverfahrens der LICF im Rahmen der teilflächenspezifischen ersten N-Gabe kann dieses Messverfahren nicht losgelöst von bisherigen Arbeitsschritten zur schlageinheitlichen N-Düngung gesehen werden. Eine Ermittlung der durchschnittlich zu düngenden N-Menge des gesamten Schlages auf Basis von N_{\min} -Bodenbeprobungsuntersuchungen ist weiterhin notwendig. Die in den einzelnen Bundesländern angewandten N-Düngeberatungssysteme sollten zur Ableitung der Höhe des N-Bedarfs herangezogen werden.

Für die einzelnen Bundesländer gibt es keine einheitliche Vorgehensweise. Am häufigsten wird das Beratungsprogramm der so genannten Stickstoff-Bedarfs-Analyse (SBA) angewendet [Schilling, 2000]. Dieses Modell hat Eingang in die landwirtschaftliche Praxis in Thüringen, Brandenburg, Sachsen Anhalt und Mecklenburg-Vorpommern gefunden [Schilling, 2000]. In anderen Bundesländern ist die Bezeichnung des Beratungsprogramms eine andere, Algorithmus und Parameter sind aber überwiegend identisch. In Bayern findet beispielsweise das Düngeberatungssystem Stickstoff (DSN) Anwendung [Hege et al., 2003]. Die Modelle berücksichtigen für Getreide und Raps zwei N-Gaben. Die Höhe des N-Bedarfs zur ersten N-Gabe errechnet sich dabei aus dem N-Sollwert abzüglich des N_{\min} -Vorrates. Die Sollwerte unterliegen in den einzelnen Bundesländern leichten Schwankungen [Schilling, 2000]. Die ermittelten Werte werden über bestimmte Zu- und Abschläge korrigiert und so den jeweiligen spezifischen Gegebenheiten angepasst. Die Zu- und Abschläge setzen sich zusammen aus vom Durchschnitt abweichenden Ertragserwartungen, zur N-Gabe abweichende Bestandesentwicklung (schwach oder stark), Berücksichtigung von Vorfrüchten bzw. Zwischenfrüchten usw.

Für die durchschnittliche Bemessung der N-Düngung des gesamten Schlages ist über die Zu- und Abschläge hinaus das Wissen des Landwirtes unbedingt einzubauen. Leichte Modifikationen in der Bemessung der durchschnittlichen N-Düngemenge können die Folge sein. Wie wichtig es ist, genau den richtigen Mittelwert für den gesamten Schlag zu finden, zeigen die Ergebnisse aus Kapitel 6 und 7. Die erste N-Gabe wurde hier auf Basis der SBA errechnet, und ergab für den Standort in Seehausen eine anzudüngende Menge von 115 kg N und für das Kühnfeld in Halle von 105 kg N/ha. Auf beiden Standorten erwies sich aber eine Andüngung von 70 kg N/ha als ausreichend, auch wenn dafür die zu bemessende zweite N-Düngung leicht höher ausfällt, in beiden Fällen um 15 kg N/ha. Daraus ergibt sich im Falle der (nachträglich) richtigen Bemessung der ersten N-Gabe, unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf die zweite N-Gabe, eine Einsparung von 20 bis 30 kg N/ha auf diesen Standorten, die ohne teilschlagespezifische N-Düngung erreicht werden kann.

Steht nun der exakte durchschnittliche N-Bedarf für den zu düngenden Schlag zur ersten N-Gabe fest, kann diese Menge an N einer mittleren Bestandesdichte des Schlages zugeordnet werden. Dies kann im Rahmen einer Kalibrierung des Sensorsystems an einem Teil des Feldbestandes mit repräsentativer durchschnittlicher Bestandesdichte erfolgen.

Im nächsten Schritt dienen die gemessenen Bestandesdichteunterschiede auf Basis der LICF im Feld zur gezielten Anpassung der N-Menge an die vorherrschenden Standortgegebenheiten. Kleinräumige Unterschiede in der Bestandesdichte finden hier Berücksichtigung. Geringere Bestandesdichten als die durchschnittlich festgelegte Bestandesdichte erhalten eine höhere Andüngung. Entsprechend werden höhere Bestandesdichten weniger gedüngt. Die Höhe der maximalen Zu- und Abschläge zur durchschnittlichen N-Menge müssen in weiteren Forschungsarbeiten abgeleitet werden. In der schlageinheitlichen N-Düngung im Rahmen der Stickstoffbedarfsanalyse (SBA) [Schilling, 2000] bzw. des Düngeberatungssystems Stickstoff (DSN) [Hege et al., 2003] erhalten Getreide und Raps Abschläge bei hohen Bestandesdichten von bis zu 20 kg N und Zuschläge bei niedrigen Bestandesdichten von ebenfalls bis zu 20 kg N. Ob die Zahlen so für die teilflächenspezifische N-Düngung übernommen werden können, muss in gesonderten Düngeversuchen zur ersten N-Gabe untersucht werden.

Eine teilflächenspezifische N-Düngung auf Basis von engmaschigen N_{\min} -Beprobungen des Schlages ist alternativ zur ersten N-Gabe zu Vegetationsbeginn möglich. Messung der Unterschiede im Feld und die eigentliche N-Düngung erfolgen zu getrennten Terminen. Auf Basis der N_{\min} -Beprobungen wird eine Düngekarte erstellt, die dann über die Bordelektronik am Traktor eingelesen wird und die entsprechenden Befehle an den Düngerstreuer sendet (Mapping approach). Diese Methode ist sehr arbeitsaufwendig und sehr teuer, da die Bodenbeprobung sehr engmaschig sein muss, um die Unterschiede in der N-Verfügbarkeit widerzuspiegeln. Eine bessere Alternative ist deshalb, die Pflanzen als Indikator für die Bodenunterschiede zu nutzen, wie das erstmalig mit Hilfe der LICF großflächig möglich ist. Die Messung kann auf Basis von Sensormessungen der Pflanzen, hier Detektion der Bestandesdichte, viel engmaschiger erfolgen, als dies bei der Bodenanalyse der Fall sein kann. Ein weiterer Vorteil der Nutzung der Pflanzen als Indikator der Unterschiede in der N-Versorgung ist, dass mit der N_{\min} -Untersuchung des Bodens zwar die Menge an Stickstoff im Boden bestimmt werden kann, aber die eigentliche Gesamtmenge an pflanzenverfügbarem Stickstoff über die Vegetation hinweg nur angenähert werden kann, siehe Ergebnisse Kapitel 6 und 7 (Feldversuch). Die Pflanzen wiederum spiegeln in der Momentaufnahme die pflanzenverfügbaren Mengen an Stickstoff wider.

Eine teilflächenspezifische N-Düngung nur mit Hilfe der sensorgestützten Bestandesdichtemessung ohne Berücksichtigung des N_{\min} -Wertes ist unter dem Gesichtspunkt einer guten fachlichen Düngepraxis abzulehnen. Nur die Übertragung von Werten von regionspezifischen Testflächen könnte eine Alternative sein, um auf die eigene N_{\min} -Bodenbeprobung verzichten zu können. Die N_{\min} -Bodenbeprobung erfolgt in diesem Falle als Durchschnitt des zu düngenden Schlages.

Die Untersuchungen zur Messung der Bestandesdichteunterschiede auf Basis der LICF wurden in Wintergetreide- und Winterrapsbeständen durchgeführt und zeigten durchweg gute Ergebnisse und Korrelationen. Da sich hier keine Schwierigkeiten bei Getreide und bei Raps gezeigt haben, kann die Messung der Bestandesdichte über den Parameter BDI_{LICF} vermutlich auch problemlos auf andere Kulturen übertragen werden. Dabei ist jedoch im Einzelfall zu prüfen, ob die Regelung der N-Düngung über die Bestandesdichte für diese neue Kultur ebenfalls sinnvoll ist.

8.2 Bewertung des Einsatzpotentials der LICF-Messung zur teilflächenspezifischen Regulierung der zweiten und dritten N-Gabe

Die Untersuchungen zum Messverfahren der LICF fanden in Winterraps- und Wintergetreidebeständen zu allen relevanten N-Gaben dieser Kulturen statt. Somit finden in dieser Arbeit zwei Kulturen Berücksichtigung, die sowohl botanisch gesehen sehr unterschiedlich sind als auch in der Düngepraxis unterschiedliche Mengen und Zeiten der N-Gaben aufweisen. Dennoch handelt es sich um zwei Kulturen, die unter dem Gesichtspunkt des Einsparungspotentials an Stickstoff sehr interessant sind, da beide Kulturen mehrere N-Gaben benötigen und andererseits diese Kulturen einen enormen Anbauumfang als Ackerkulturen aufweisen.

Aufgrund der Unterschiede werden beide Kulturen im Folgenden getrennt im Hinblick auf das Einsatzpotential zur variablen N-Düngung zur zweiten bzw. zur dritten N-Gabe bewertet.

Winterraps wird in Deutschland zweimal gedüngt. Die erste N-Gabe zu Winterraps erfolgt zu Vegetationsbeginn im Frühjahr, sobald die Flächen befahrbar sind und der Boden nicht mehr gefroren ist. Die 2. N-Gabe erfolgt ca. 4 Wochen später kurz vor der Blüte. Manchmal ist zu Raps im September noch eine Andüngung von ca. 20-40 kg N/ha notwendig, um die Vorentwicklung des Raps zu beschleunigen und zu sichern. Diese Spätsommergabe wird aber

im Rahmen dieser Arbeit nicht als erste N-Gabe betrachtet, da sie keine generell zu verabreichende N-Gabe zu Winterraps darstellt.

Die erste N-Gabe im Frühjahr von ca. 100 kg N/ha fördert bei Winterraps, wie oben schon beschrieben, das vegetative Wachstum. Die Bestandesdichte erscheint zur ersten N-Gabe ein geeigneter Parameter, um den N-Dünger bedarfsgerecht zu platzieren. Die zweite N-Gabe fördert das generative Wachstum und trägt zur vermehrten Blütenausbildung bei. Die hier zu verabreichende Menge ist meistens kleiner als die zur ersten N-Gabe zu Vegetationsbeginn.

Weist ein Rapsbestand zum Zeitpunkt der zweiten N-Gabe Unterschiede in den N-Gehalten und Unterschiede in den Bestandesdichten auf, erscheint es sinnvoll, diese Unterschiede im Rahmen einer teilflächenspezifischen N-Düngung zu berücksichtigen. Ertragsvorteile und Düngereinsparungen leiten sich daraus ab [Ancev et al., 2005; Schmerler & Jürschik, 1997; Malzer et al., 1996; Swinton & Ahmad, 1996; Reetz & Fixen, 1995].

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Rapsversuche zeigen, dass die LICF-Messung unterschiedlich gedüngter Winterrapsbestände zur 2. N-Gabe sehr gut den N-Gehalt und die Biomasse im Feldbestand widerspiegelt. Der N-Gehalt wird bei dem eingesetzten Messverfahren durch den Parameter F_{690}/F_{730} und die Biomasse über BDI_{LICF} beschrieben. Dabei konnte eine sehr enge Korrelation von $R^2=0,98$ zwischen dem N-Gehalt und dem Parameter F_{690}/F_{730} ermittelt werden. Zwischen der Biomasse und dem Parameter BDI_{LICF} betrug das Bestimmtheitsmaß $R^2=0,98$, was ebenfalls eine sehr enge Korrelation beschreibt. Das errechnete Vertrauensintervall der BDI_{LICF} -Werte lässt erkennen, dass die Biomasse über das Messverfahren der LICF sehr vertrauenswürdig widerspiegelt werden kann.

Somit kann aus den Messergebnissen zum Winterraps zum Zeitpunkt der zweiten N-Gabe abgeleitet werden, dass eine teilflächenspezifische Platzierung der zweiten N-Gabe nach N-Gehalt und Bestandesdichte mit Hilfe der LICF exakt erfolgen kann.

Erstmalig wurden die Ergebnisse der LICF-Messungen mit Reflexionsmessungen verglichen. Die Ergebnisse sind deshalb so interessant, da es sich bei der Reflexionsmessung um ein Messverfahren handelt, welches bereits in der teilflächenspezifischen N-Düngung eingesetzt wird.

Der N-Gehalt pro Bodenfläche wird bei der Reflexionsmessung über einen Parameter S1 und die Biomasse über einen Parameter S2 [Lammel et al., 2001] beschrieben. Die Korrelation von S1 zum chemisch bestimmten N-Gehalt betrug 1. Allerdings konnte die Reflexionsmes-

sung die höheren N-Gehalte des Winterraps nicht mehr gut auflösend widerspiegeln. Im Gegensatz dazu konnte die LICF auch die höheren N-Gehalte ähnlich gut widerspiegeln wie die chemische N-Analyse. Für die Berechnung von $R^2=0,98$ (Zusammenhang von F_{690}/F_{730} der LICF-Messung und dem chemisch bestimmten N-Gehalt) liegt eine aus der Physik der Licht-Materie-Wechselwirkung hergeleitete Funktion zugrunde. Für das Reflexionsmessverfahren ist bisher keine derartige Funktion bekannt. Der Zusammenhang wurde daher durch willkürliche Wahl eines Polynoms 2. Grades hergestellt.

Auch die Biomasse wird durch das Messverfahren der LICF wesentlich besser wiedergespiegelt als durch das Messverfahren der Reflexion. Zwischen dem Reflexionswert S2 und der gravimetrischen Biomassebestimmung beträgt R^2 0,9. Die Grenzen für das Vertrauensintervall sind sehr breit. Deshalb kann die Biomasse durch das Reflexionsmessverfahren nicht sehr vertrauenswürdig wiedergespiegelt werden.

Bei einem Vergleich der Messwerte von S1 und S2 der Reflexionsmessung konnte zudem festgestellt werden, dass beide Parameter sich völlig identisch verhalten. Dies ist auch die Ursache dafür, weshalb bei der Reflexionsmessung die besten Korrelationen zur N-Aufnahme bestehen [Schächtl, 2004], da die N-Aufnahme das Produkt aus Biomasse und N-Gehalt darstellt. Im Gegensatz dazu konnte gezeigt werden, dass es sich bei der LICF mit F_{690}/F_{730} und BDI_{LICF} um messtechnisch unabhängige Messgrößen handelt und diese beiden Parameter sehr gute Übereinstimmung mit der konventionellen N-Gehalts- und Biomassebestimmung zeigen. Eine ungenaue Unterscheidung zwischen dem N-Gehalt und der Biomasse kann zu Düngefehlern führen. Es ist zum Beispiel wichtig, zwischen hohen N-Gehalten bei wenig Biomasse und niedrigen N-Gehalten bei hoher Biomasse zu unterscheiden. Die Reflexionsmessung kann beide Varianten nicht unterscheiden. Hohe N-Gehalte und wenig Biomasse benötigen jedoch weniger N-Dünger als niedrige N-Gehalte und hohe Biomassen. Hohe N-Gehalte und geringe Biomassen können zum Beispiel die Folge von Wassermangel sein [Barraclough & Kyte, 2001], eine hohe N-Düngung wäre hier nicht angebracht. Eine genaue Unterscheidung zwischen dem N-Gehalt und der Biomasse kann mit Hilfe der LICF getroffen werden und ermöglicht eine präzise Anpassung der N-Düngung an gegebene Standortbedingungen.

Die LICF stellt somit eine hervorragende Messmethode im Hinblick auf die Steuerung der zweiten N-Gabe zu Winterraps dar und zeigt darüber hinaus gegenüber der Reflexionsmessung eindeutige Vorteile. Eine Überführung der LICF-Messung in die landwirtschaftliche Düngepraxis lässt bei Winterraps auf größere ökonomisch und ökologisch erzielbare Vorteile schließen.

Wintergetreide

Winterweizen wird in Deutschland dreimal gedüngt, Wintergerste, Winter-Durum-Weizen, Wintertriticale und Winterroggen hingegen zweimal.

Winterweizen wird dreimal gedüngt, da die 3. N-Gabe den Rohproteingehalt steigert, was für diese Feldfrucht ein wichtiges Kriterium darstellt. Bei Wintergerste, Winterroggen, Wintertriticale und Winter-Durum-Weizen spielt der Rohproteingehalt keine so wichtige Rolle. Hier zählt allein der Ertrag, welcher nur über die Höhe der ersten und zweiten N-Gabe erfolgreich beeinflusst werden kann.

Ein in dieser Arbeit beschriebener Feldversuch zu Winterweizen zeigt eindeutig, dass zum Zeitpunkt der zweiten N-Gabe unterschiedliche N-Düngerniveaus mittels LICF sehr gut erkannt werden. Ein Vergleich mit den Messverfahren Nitratschnelltest und N-Tester zeigt, dass die Bestimmung mittels LICF quantitativ nicht ganz so exakt wie mit Hilfe des Nitratschnelltests ausfällt, aber in diesem Versuch die Unterschiede im Feld besser als der N-Tester beschreibt, wobei die einzelnen Düngerniveaus von allen 3 Messverfahren erkannt werden. Dennoch unterscheidet nur der Nitratschnelltest alle unterschiedlichen N-Düngerniveaus signifikant. LICF mit dem Parameter F_{690}/F_{730} unterscheidet in 13 von 15 Fällen signifikant, während der N-Tester nur in 6 von 15 Fällen Signifikanzen erkennen lässt.

Diese Unterschiede in den Ergebnissen der Messverfahren scheinen darauf zurückführbar zu sein, dass diese Methoden den N-Gehalt in unterschiedlichen Höhen der Pflanze messen. Die Unterschiede der N-Versorgung werden am besten in den unteren Bereichen der Pflanze erkannt, da die Getreidepflanze bei N-Mangel N aus den unteren Blattetagen in die oberen Blattetagen transportiert, um die N-Versorgung der obersten Blätter sicherzustellen. Aus diesem Grund wird die Gesamt-N-Versorgung in den obersten Pflanzenebenen nicht mehr so deutlich widerspiegelt, da es hier zu Sättigungseffekten an N kommt. Der Nitratschnelltest misst den Nitratgehalt in den untersten Pflanzenebenen, nämlich dort, wo die N-Unterschiede am deutlichsten widerspiegelt werden. Der N-Tester misst die Unterschiede des Chlorophylls bzw. des N-Gehaltes in den obersten Pflanzenblättern, nämlich dort, wo die N-Unterschiede weniger stark differenzieren. Die LICF wird zum Zeitpunkt der zweiten N-Gabe in den mittleren bis oberen Bereichen der Pflanze gemessen.

Der Nitratschnelltest misst den Nitratgehalt in der Pflanze, der in den Vakuolen gespeichert wird. Chlorophyllmessverfahren hingegen spiegeln die Menge an Stickstoff wider, die in Chlorophyll eingebaut wurden. Der Teil an Stickstoff, der in den Vakuolen gespeichert wird, kann weder vom N-Tester noch vom Messverfahren der LICF noch von Reflexionsmessver-

fahren erfasst werden, da diese Messverfahren die N-Versorgung über die Chlorophyllmenge ableiten. Aus diesem Grunde schneidet der Nitratschnelltest hier zwar am besten ab, aber die unterschiedlichen N-Niveaus werden ebenfalls qualitativ gut vom Messverfahren der LICF erkannt.

LICF-Messungen paralleler Stickstoffsteigerungsversuche zu Getreide auf anderen Standorten zeigen unterschiedliche N-Düngeniveaus zur zweiten N-Gabe ebenfalls gut an.

Die LICF stellt ein hervorragendes Messverfahren hinsichtlich der teilflächenspezifischen Regulierung der zweiten N-Gabe zu Wintergetreide dar. Die Regulierung kann auf Basis zweier messtechnisch unabhängiger Parameter, nämlich N-Gehalt (F_{690}/F_{730}) und Biomasse (BDI_{LICF}), erfolgen. Das ermöglicht wiederum eine exaktere Anpassung der N-Düngung an gegebene Standortbedingungen im Vergleich zu bisherigen in der N-Düngungspraxis eingesetzten Messverfahren. Daher sind weitere Ertragsvorteile bzw. ökologische Vorteile mit Einführung dieses Messverfahrens in die landwirtschaftliche Düngungspraxis zu erwarten.

Die dritte N-Gabe, die bei den Wintergetreidearten nur zu Winterweizen verabreicht wird, beeinflusst die Rohproteingehalte im Getreidekorn, aber nicht mehr den Ertrag. Defizite in der N-Ernährung werden durch das Messverfahren der LICF gut erkannt. N-Übersorgungen, die nicht zur Steigerung der Chlorophyllgehalte führen, werden mittels LICF nicht erkannt. Diese werden aber auch nicht von anderen Messverfahren, die die Chlorophyllgehalte messen, um darüber die N-Versorgung abzuleiten, erkannt. Dazu gehören Messverfahren des N-Testers sowie Reflexionsmessverfahren. All diese Messverfahren, einschließlich der LICF mit der in dieser Arbeit beschriebenen Technik, messen zum Zeitpunkt der 3. N-Gabe bevorzugt die Chlorophyllgehalte der obersten Blattschichten. Diese sind aber nicht optimal geeignet, die Gesamt-N-Versorgung der Pflanzen widerzuspiegeln. Ideal wäre für die dritte N-Gabe eine Messung der N-Versorgung in den untersten Pflanzenebenen, da hier die N-Ernährungszustände am besten widerspiegelt werden. Allerdings dürfte es schwierig sein, ein geeignetes Messinstrument für den praktischen landwirtschaftlichen Einsatz zu entwickeln.

Für die praktische Anwendung des LICF-Messverfahrens im Rahmen der teilflächenspezifischen zweiten und dritten N-Gabe zu Getreide kann dieses Messverfahren ebenfalls nicht losgelöst von bisherigen Arbeitsschritten zur schlageinheitlichen N-Düngung gesehen werden, wie das schon bei der ersten N-Gabe erläutert wurde. Auch hier ist ein mittlerer N-Bedarf des

Bestandes mit herkömmlichen Methoden (z.B. mittels N-Tester, Nitratschnelltest) [Olfs et al., 2005] abzuleiten. An einem Feldausschnitt mit durchschnittlicher Biomasse und durchschnittlichem N-Gehalt ist die Sensorik zu kalibrieren und die durchschnittliche N-Düngermenge diesen Werten zuzuordnen. Obere und untere Grenzen der N-Düngermenge sind durch gesonderte Versuche oder auf Basis von Erfahrungswerten des Landwirtes festzusetzen.

8.3 Bewertung der Einflussgrößen Licht und Temperatur im Hinblick auf die variable N-Düngung

Das Messverfahren der LICF wird durch zwei Störgrößen beeinflusst, nämlich durch Licht und durch Temperatur. In der Literatur sind kontroverse Meinungen zum Thema Licht und F_{690}/F_{730} zu finden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluss des Lichtes abschließend geklärt. Der in der Literatur beschriebene Temperatureinfluss konnte auf den gleichen Mechanismus zurückgeführt werden. Beide Einflussgrößen sind auf dieselben physikalisch-biologischen Effekte zurückzuführen, nämlich auf energetische Sättigungseffekte des Photosynthesystems in den oberen Blattschichten, verursacht durch Lichtintensitäten oberhalb eines Schwellenwertes oder durch Temperaturen unterhalb des Optimums der Photosynthese bei C_3 -Pflanzen.

Diese zwei Faktoren, Licht und Temperatur, und ihre Wirkungen sind im Rahmen einer teilflächenspezifischen N-Düngung zu berücksichtigen.

Lichteinfluss

An sommerlichen Tagen mit direkter Sonneneinstrahlung, d.h. keine Wolken vor der Sonne, werden die Fluoreszenzsignale von Pflanzenteilen, die der Sonne direkt ausgesetzt sind, beeinflusst.

Die Fluoreszenzsignale der Pflanzenteile, die durch diffuses Sonnenlicht beschienen werden, also sich auf der sonnenabgewandten Seite der Pflanze befinden, werden hingegen nicht beeinflusst. An diesigen Tagen oder Tagen mit Wolken am Himmel sowie in der Dämmerung oder in der Nacht erfolgt ebenfalls keine Beeinflussung der Fluoreszenzsignale.

Dieses Phänomen kann folgendermaßen erklärt werden:

Bei diesigem Wetter, bei Vorhandensein von Wolken bzw. auf der lichtabgewandten Seite der Sonne sind die Lichtintensitäten der diffusen Sonnenstrahlung, die auf die Pflanze wirken, so

gering, dass sich das Photosynthesesystem noch nicht in einem energetisch gesättigten Zustand befindet. Bei hohen Lichtintensitäten auf direkt von der Sonne bestrahlten Pflanzenteilen ist das Photosynthesesystem der obersten Schichten des Blattes energetisch komplett gesättigt. Zusätzliches Licht kann von den photochemischen Prozessen nicht mehr aufgenommen werden und führt zu nichtphotochemischen Prozessen des thermischen Energieabbaus, verbunden mit reduzierten Fluoreszenzeffizienzen. Da die Photochemie tieferer Schichten des Pflanzenblatts energetisch noch nicht gesättigt ist und diese daher höhere Fluoreszenzeffizienzen aufweisen, stammt die Fluoreszenz nun im Mittel aus tieferen Schichten des Pflanzenblattes. Fluoreszenzlicht aus den tieferen Schichten wird jedoch auf dem längeren Weg zur Blattoberfläche stärker gestreut als das Fluoreszenzlicht, welches nahe der Blattoberfläche gebildet wird. Diese Streuung, Rayleigh- bzw. Mie-Streuung genannt, ist wellenlängenabhängig. Kürzere Wellenlängen werden stärker gestreut als längere, deshalb sinkt F_{690}/F_{730} mit zunehmendem Einfluss von direktem Sonnenlicht.

Dieses Phänomen wurde in umfangreichen Feldversuchen untersucht. Darüber hinaus wurde in gesonderten Klimakammerversuchen mit steigender Lichtintensität an Getreidepflanzen gezeigt, dass erst ab einem bestimmten Schwellenwert an Licht, nämlich um ca. $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ der Quotient zu sinken beginnt. Genau diese Lichtintensität wird in der Literatur [**Lichtenthaler & Rinderle, 1988**] als Sättigungslight für viele Pflanzen angegeben. Ab diesen Lichtintensitäten scheinen die obersten Schichten des Blattes an photochemischer Energie gesättigt zu sein. Ab $380 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ sinkt der Quotient linear mit steigender Lichtintensität. Zusätzliche Gaswechselfmessungen mittels Porometer in der Klimakammer bestätigten ebenfalls dieses Phänomen. Denn ab den Lichtintensitäten um $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ verlief der Anstieg der Photosyntheserate mit zunehmendem Licht deutlich flacher. Mehr Licht führt zunächst unterhalb von $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ zur deutlichen Steigerung der Photosyntheserate. Ist der Schwellenwert von ca. $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bzw. die Sättigung der obersten Blattschichten mit Licht erreicht, steigt die Photosyntheserate mit zunehmendem Licht nicht mehr so deutlich. Für die Anwendung der LICF im Rahmen der teilflächenspezifischen N-Düngung ist der Einfluss des Lichtes auf den Quotienten an sommerlichen Tagen mit hoher Lichtintensität und direkter Sonneneinstrahlung deutlich höher als der Einfluss der Düngung auf den Quotienten. Aus diesem Grunde ist der Einfluss des Lichtes unbedingt hinsichtlich der variablen N-Düngung im Feld zu berücksichtigen.

Dies kann auf verschiedenen Wegen erfolgen, wie umfangreiche Messungen mit dem Laser-N-Detektor im Felde bestätigten.

Da die Messung der LICF mit dem Laser-N-Detektor zu beiden Seiten des Traktors in den Pflanzenbestand hinein erfolgt, misst an sommerlichen Tagen mit direkter Sonneneinstrahlung immer ein Sensor die Seite des Pflanzenbestandes, der direkt von der Sonne bestrahlt wird und ein Sensor die lichtabgewandte Seite des Pflanzenbestandes. Da sich auf beiden N-Sensoren zusätzliche Lichtsensoren befinden, können den Messwerten die entsprechenden Lichtintensitäten zugeordnet werden. Die Lichtsensoren liefern dabei zwei wichtige Lichtgrößen, nämlich die gesamte einfallende Lichtstrahlung aus allen Richtungen des Raumes und die direkt einfallende Strahlung, die in Blickrichtung der LICF-Sensorik einfällt. Somit kann ermittelt werden, ob direktes Sonnenlicht vorliegt und ob auf der lichtabgewandten Seite oder auf der direkt von der Sonne bestrahlten Seite des Pflanzenbestandes gemessen wird. Die Quotienten bei diffuser Beleuchtung bzw. auf der lichtabgewandten Seite können unkorrigiert übernommen werden. Die Quotienten der direkt von der Sonne bestrahlten Seite des Pflanzenbestandes müssen mit Hilfe der Lichtsensoren korrigiert werden.

Eine Möglichkeit im Hinblick auf die teilflächenspezifische N-Düngung ist es, nur die Messergebnisse der lichtabgewandten Seite der Sonne für die variable N-Düngung zu nutzen und die Messergebnisse der direkt von der Sonne bestrahlten Seite unberücksichtigt zu lassen. Somit wäre immer noch eine teilflächenspezifische N-Düngung gewährleistet, die aber keine getrennte Düngung der rechten und der linken Seite des Bestandes ermöglichen würde. Der Vorteil einer getrennten Regulierbarkeit der N-Düngung zur rechten und zur linken Seite des Bestandes mit einem Zweiseibendüngerstreuer gegenüber dem Messverfahren der Reflexion würde jedoch verschenkt.

Diese getrennte Regulierung beider Seiten des Zweiseibendüngerstreuers ist möglich, wenn die Quotienten der Sonnenseite lichtkorrigiert werden. Diese Lichtkorrektur ist ab einem Schwellenwert der Lichtintensität linear zu dieser durchzuführen. Ein Algorithmus konnte für Getreide in umfangreichen Feldversuchen ermittelt werden. Für andere Kulturen ist dieser Algorithmus zu prüfen und gegebenenfalls anzupassen.

Für die praktische Anwendung der LICF-Technik besteht für den Landwirt somit keine Einschränkung, da die Lichtkorrektur durch entsprechende Software automatisch erfolgt.

Temperatureinfluss

Der Einfluss der Temperatur auf den Quotienten F_{690}/F_{730} konnte mit der vorliegenden LICF-Messtechnik ebenfalls gemessen werden und bestätigt die in der Literatur beschriebene Temperaturabhängigkeit von F_{690}/F_{730} .

Die Temperaturabhängigkeit des Quotienten F_{690}/F_{730} ist ebenfalls auf im Mittel größere Tiefen der Fluoreszenzemission im Pflanzenblatt aufgrund energetischer Sättigungseffekte des Photosynthesystems der oberen Blattschichten in Verbindung mit wellenlängenabhängiger Lichtstreuung zurückzuführen und nicht, wie in der Literatur beschrieben, auf unterschiedliche Temperaturprofile von Photosystem I und II oder einen Zustandsübergang zwischen den Photosystemen.

Niedrige Temperaturen unterhalb 23 °C führen dazu, dass die Prozesse der Photosynthese noch nicht effektiv arbeiten. Nur ein geringerer Teil der Anregungsenergie der Antennenpigmente kann bei diesen Temperaturen über die Reaktionszentren an die photochemischen Prozesse weitergeleitet werden. Ein mit abnehmender Temperatur größer werdender Teil der Energie wird wiederum durch nichtphotochemische Prozesse letztlich in Wärme umgesetzt. Dies führt über reduzierte Fluoreszenzeffizienzen zu größeren mittleren Tiefen der Fluoreszenzemission. Das Fluoreszenzlicht aus den tieferen Schichten wird, wie bereits beim Einfluss des Lichtes beschrieben, auf dem längeren Weg zur Blattoberfläche stärker gestreut. Diese Streuung (Rayleigh- und Mie-Streuung) ist dafür verantwortlich, dass bei tieferen Temperaturen, ebenso wie bei hohen Lichtintensitäten, der Quotient infolge der Wellenlängenabhängigkeit der Streuung sinkt.

Dieser Einfluss der Temperatur ist ebenfalls im Hinblick auf die teilflächenspezifische Regulierung der N-Düngung zu berücksichtigen. Ein Temperatursensor ermöglicht die Zuordnung der Quotienten zur Umgebungstemperatur. Die vorliegende Messtechnik enthält einen solchen zusätzlichen Temperatursensor. Aufgrund des linearen Zusammenhangs zwischen Temperatur und Messwert lässt sich dieser so einfach korrigieren.

Die Bestimmung von BDI_{LICF} , die im Rahmen der ersten N-Gabe sowohl zu Getreide als auch zu Raps sinnvoll erscheint, beruht nicht auf einer Intensitätsmessung von Wellenlängen, sondern auf einer statistischen Auswertung der Fluoreszenzsignale. Die zu diesem Zeitpunkt auftretenden tiefen Temperaturen nehmen daher keinen Einfluss auf diesen Parameter.

8.4 Weitere Einsatzmöglichkeiten des LICF- Messverfahrens

Die getrennte Messung der Bestandesdichte und der N-Versorgung erscheint auch im Hinblick auf weitere Einsatzmöglichkeiten im Pflanzenbau sehr interessant. So ermöglicht die Messung der differenzierten Bestandesdichte zum Beispiel erstmalig auch die gezielte Verabreichung von Wachstumsstabilisatoren wie CCC 720 zu sehr frühen Pflanzenstadien.

Bisher stand für die sehr zeitige Ausbringung von CCC 720 zu EC 21-25 zu Winterweizen und Sommerweizen kein Messverfahren zur Verfügung, welches zur Regulierung der teilflächenspezifischen Ausbringung eingesetzt werden könnte. Messverfahren der Reflexion können z.B. zu Getreide erst sinnvoll ab Ende der Bestockung eingesetzt werden.

Aber auch die Ausbringung von Wachstumsstabilisatoren im Getreide zu späteren Ausbringungszeitpunkten, EC 30-32 oder EC 37-49, könnte mit Hilfe der LICF möglicherweise exakter appliziert werden, da die LICF die Bestandesdichte messtechnisch getrennt von der N-Versorgung im Feld darstellt.

9 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Einsatzpotential der Laserinduzierten Chlorophyllfluoreszenz (LICF) im Hinblick auf eine teilflächenspezifische Regulierung aller N-Gaben, speziell zu Wintergetreide und Winterraps, in umfangreichen Feldversuchen untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Messverfahren der LICF deutliche Vorteile gegenüber den bisher im Rahmen der teilschlagspezifischen N-Düngepraxis eingesetzten Messverfahren aufweist. Ein wesentlicher Vorteil des Messverfahrens der LICF ist darin zu sehen, dass die auszuwertenden Messsignale nur von den Pflanzen ausgesendet werden. Deshalb stellt der Boden keine Störgröße im Hinblick auf das auszuwertende Messsignal dar. Aus diesem Grunde ist das Messverfahren der LICF grundsätzlich schon zu frühen Pflanzenstadien geeignet, Unterschiede im Pflanzenbestand zu detektieren. Mit der von uns eingesetzten Messtechnik konnte erstmalig sowohl im Gefäßversuch zu Wintergetreide und Winterraps als auch im Feldversuch gezeigt werden, dass unterschiedliche Bestandesdichten zu sehr frühen Pflanzenstadien mit dem Messverfahren der LICF exakt abgebildet werden können. Der Parameter BDI_{LICF} wurde neu eingeführt und beruht auf einer statistischen Auswertung der Fluoreszenzsignale. Eine teilflächenspezifische Regulierung der N-Düngung ist somit mit Hilfe der LICF schon ab der ersten N-Gabe zu Winterraps und Wintergetreide möglich, was einen deutlichen Vorteil im Gegensatz zu den bisher in der Praxis eingesetzten Messverfahren darstellt.

Auch für die teilflächenspezifische N-Düngung der zweiten und dritten N-Gabe ergeben sich aus den durchgeführten Versuchen deutliche Vorteile durch den Einsatz der LICF im Vergleich zu bisher in der Praxis eingesetzten Messverfahren, z.B. den auf Reflexion beruhenden. In einem großflächigen Winterrapsversuch mit unterschiedlicher N-Versorgung, verabreicht zur ersten N-Gabe, konnte gezeigt werden, dass mit dem Messverfahren der LICF eine messtechnisch unabhängige Detektion von Biomasse (mittels Parameter BDI_{LICF}) und N-Gehalt (mittels Parameter F_{690}/F_{730}) zum Zeitpunkt der zweiten N-Gabe im Feld möglich ist und beide Parameter eine hohe Genauigkeit aufweisen. Parallele Reflexionsmessungen mit speziellen Feldsensoren verdeutlichen, dass die messtechnisch unabhängige Darstellung von Biomasse und N-Gehalt durch das Messverfahren der Reflexion aufgrund der integralen Messung nicht möglich ist. Die messtechnisch unabhängige sowie die exakte Darstellung der Biomasse ($R^2=0,98$) und des N-Gehaltes ($R^2=0,98$) ist mittels LICF-Messverfahren gegeben und erlaubt eine

gezielte Anpassung der N-Düngung an gegebene Standortbedingungen. Somit sind weitere ökonomische und ökologische Vorteile durch die Einführung der LICF-Methode zur teilflächenspezifischen Regulierung der N-Düngung in die landwirtschaftliche Praxis gegenüber herkömmlichen Messmethoden ableitbar.

Das Messverfahren der LICF und deren Messparameter F_{690}/F_{730} wird beeinflusst von direkter Sonneneinstrahlung, wie umfangreiche Versuche dieser Arbeit zeigen konnten. Diffuse Strahlung beeinflusst den Quotienten F_{690}/F_{730} nicht, was ebenfalls durch umfangreiche Versuche im Rahmen dieser Arbeit bestätigt werden konnte. Diese Arbeit trägt dazu bei, den Einfluss des Lichtes auf das Messsignal F_{690}/F_{730} umfassend zu klären. Bislang wurde in der Literatur der Einfluss des Lichtes auf F_{690}/F_{730} kontrovers diskutiert, da einige Wissenschaftler aufgrund ihrer Versuche einen Einfluss des Lichtes fanden, andere jedoch nicht. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche zeigen, dass Licht den Quotienten F_{690}/F_{730} nur unter bestimmten Voraussetzungen beeinflusst. Dabei ist zwischen direkter Sonneneinstrahlung und indirekter, diffuser Sonneneinstrahlung zu unterscheiden. Nur die direkte Sonneneinstrahlung beeinflusst den Quotienten F_{690}/F_{730} . Dabei konnte gezeigt werden, dass ab einem bestimmten Schwellenwert der Intensität des einfallenden direkten Lichtes eine lineare Abhängigkeit des Quotienten F_{690}/F_{730} von der Intensität besteht, während unterhalb des Schwellenwertes der Quotient unbeeinflusst bleibt.

Diese Arbeit konnte nicht nur das Phänomen des Lichteinflusses anhand von Ergebnissen umfangreicher Feldversuche aufzeigen. Es konnte darüber hinaus eine umfassende Erklärung für das Verhalten des Quotienten F_{690}/F_{730} in Abhängigkeit von der Lichtintensität gefunden werden. Eine physikalische Modellierung liefert eine Erklärung des Lichteinflusses. Sie beruht auf energetischen Sättigungseffekten des Photosynthesystems in den oberen Blattschichten.

Der Einfluss des Lichtes auf den Quotienten F_{690}/F_{730} ist im Hinblick auf den Einsatz des Messverfahrens der LICF zur teilschlagspezifischen N-Düngung unbedingt zu berücksichtigen. Ein entsprechender Algorithmus konnte speziell für Wintergetreide abgeleitet werden.

Unter Berücksichtigung der Lichtverhältnisse und deren Beeinflussung des Quotienten F_{690}/F_{730} ist das Messverfahren der LICF zu allen Tageszeiten durchführbar und liefert zuverlässige Werte, wie die von uns durchgeführten Messungen bestätigen. Messungen in der Dämmerung und in der Nacht sind ebenfalls möglich.

Die in der Literatur beschriebene Temperaturabhängigkeit des Quotienten F_{690}/F_{730} konnte im Rahmen der Arbeit ebenfalls analog zum Lichteinfluss auf energetische Sättigungseffekte des Photosynthesystems der oberen Blattschichten zurückgeführt werden.

Durch Messung der Umgebungstemperatur lässt sich auch dieser lineare Effekt einfach korrigieren.

Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass Überversorgungen an Stickstoff mit Hilfe der LICF nicht ausreichend genau erkannt werden, weil Messmethoden, die den N-Gehalt über den Chlorophyllgehalt ableiten, nur die Mengen an Stickstoff widerspiegeln, die bereits in Chlorophyll eingebaut worden sind. Das trifft für alle Messverfahren zu, die den N-Gehalt über die Menge an Chlorophyll ableiten, wozu auch das Messverfahren der Reflexion zählt. Somit werden in der vorliegenden Arbeit auch Einsatzgrenzen solcher Messmethoden aufgezeigt. Dennoch muss an dieser Stelle deutlich darauf hingewiesen werden, dass Überversorgungen an Stickstoff bislang nur durch chemische N-Analysen sowie durch Messungen des Nitrats in der Halmbasis (mittels Nitratschnelltest) ausreichend genau angezeigt werden können. Solche Messsysteme eignen sich allerdings für den großflächigen Einsatz zur teilflächenspezifischen Regulierung der N-Gabe nicht.

Zusammenfassend kann die LICF-Messmethode als ein hervorragend geeignetes Messverfahren zur gezielten N-Düngung im Rahmen von Precision Farming angesehen werden. Dabei stellt das Messverfahren der LICF nicht nur eine gute Alternative zu bisher in der Praxis eingesetzten Messmethoden dar, sondern bietet darüber hinaus für die teilflächenspezifische Regulierung der N-Düngung neue Chancen und Perspektiven. Der Einsatz solcher Messsysteme wird künftig dazu beitragen, bei verringerter Belastung unserer Umwelt eine optimale Nutzung des Produktionsfaktors Stickstoff zu ermöglichen.

10 Literaturverzeichnis

Adams III., W. W., Winter, K., Schreiber, U., and Schramel, P. (1990): Photosynthesis and Chlorophyll Fluorescence Characteristics in Relationship to Changes in Pigment and Element Composition of Leaves of *Plantus occidentalis* L. during Autumnal Leaf Senescence. *Plant Physiology* **93**: 1184-1190.

Agati, G., Mazzinghi, P., Fusi, F., and Ambrosini, I. (1995): The F685/F730 Chlorophyll Fluorescence Ratio as a Tool in Plant Physiology: Response to Physiological and Environmental Factors. *Journal of Plant Physiology* **145**: 228-238.

Agati, G., Mazzinghi, P., Paola, M.L., Fusi, F., and Cecchi, G. (1996): The F685/F730 Chlorophyll Fluorescence Ratio as Indicator of Chilling Stress in Plants. *Journal of Plant Physiology* **148**: 384-390.

Agati, G., Biagi, C., and Mazzinghi, P. (1997): Detection of the In -Vivo Chlorophyll Fluorescence Spectrum: Effects of Environmental Factors and Laser Excitation Parameters. *SPIE* **3107**: 33-39.

Agati, G., Cerovic, Z.G., and Moya, I. (2000): The Effect of Decreasing Temperature up to Chilling Values on the In Vivo F685/F735 Chlorophyll Fluorescence Ratio in *Phaseolus vulgaris* and *Pisum sativum*: The Role of Photosystem I Contribution to the 735 nm Fluorescence Band. *Photochemistry and Photobiology* **72(1)**:75-84.

Ancev, T., Whelan, B., and McBratney, A. (2005): Evaluating the Benefits from Precision Agriculture: The Economics of Meeting Traceability Requirements and Environmental Targets. In: Stafford, J.V. (Ed.): *Precision Agriculture '05*: 985-992. Netherlands: Wageningen Academic Publishers.

Aufhammer, W. (1998): *Getreide- und andere Körnerfruchtarten*. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co.

Barraclough, P.B. and Kyte, J. (2001): Effect of Water Stress on Chlorophyll Meter Readings in Winter Wheat. In: Horst, W.J. et al. (Eds.): Plant Nutrition-Food Security and Sustainability of Agro-Ecosystems: 722-723. Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Bolhàr-Nordenkamp, H.R. and Öquist, G. (1993): Chlorophyll Fluorescence as a Tool in Photosynthesis Research. In: Hall, D.O., Scurlock, J.M.O., Bolhàr-Nordenkamp, H.R., Lee-good, R.C., and Long, S.P. (Eds.): Photosynthesis and Production in a Changing Environment. A Field and Laboratory Manual. London: Chapman & Hall.

Bredemeier, C. (2005): Laser-Induced Chlorophyll Fluorescence Sensing as a Tool for Site-Specific Nitrogen Fertilization – Evaluation under Controlled Environmental and Field Conditions in Wheat and Maize. Germany, Aachen: Shaker Verlag.

Bredemeier, C. and Schmidhalter, U. (2001): Laser-Induced Chlorophyll Fluorescence as a Tool to Determine the Nitrogen Status of Wheat. In: Grenier, G., Blackmore, S. (Eds.): Third European Conference on Precision Agriculture (3ECPA 2001), **2**: 899-904. Montpellier: Agro Montpellier.

Bredemeier, C. and Schmidhalter, U. (2005): Laser-Induced Chlorophyll Fluorescence Sensing to Determine Biomass and Nitrogen Uptake of Winter Wheat under Controlled Environment and Field Conditions. In: Stafford, J.V. (Ed.): Precision Agriculture '05: 273-280. Netherlands: Wageningen Academic Publishers.

Briantais, J.-M., Vernotte, C., Picaud, M., and Krause, G.H. (1979): A Quantitative Study of the Slow Decline of Chlorophyll *a* Fluorescence in Isolated Chloroplasts. *Biochimica et Biophysica Acta* **548**: 128-138.

Chappelle, E.W., Wood, F.M., McMurtrey III, J.E., and Newcomb, W.W. (1984a): Laser-Induced Fluorescence of Green Plants. 1: A Technique for the Remote Detection of Plant Stress and Species Differentiation. *Applied Optics* **23** (1): 134-138.

Chappelle, E.W., McMurtrey III, J.E., Wood, F.M., and Newcomb, W.W. (1984b): Laser-Induced Fluorescence of Green Plants. 2: LIF caused by Nutrient Deficiencies in Corn. *Applied Optics* **23** (1): 139-142.

Cleland, R.E., Melis, A., and Neale, P.J. (1986): Mechanism of Photoinhibition: Photochemical Reaction Center Inactivation in System II of Chloroplasts. *Photosynthesis Research* **9**: 79-88.

Connor, D.J., Sadras, V.O., and Hall, A.J. (1995): Canopy Nitrogen Distribution and the Photosynthetic Performance of Sunflower Crops during Grain Filling - A Quantitative Analysis. *Oecologia* **101**: 274-281.

Daughtry, C.S.T., McMurtrey III, J.E., Chapelle, E.W., Dulaney, W.P., Irons, J.R., and Satterwhite, M.B. (1995): Potential for Discriminating Crop Residues from Soil by Reflectance and Fluorescence. *Agronomy Journal* **87**: 165-171.

Demmig, B. and Björkman, O. (1987): Comparison of the Effect of Excessive Light on Chlorophyll Fluorescence (77K) and Photon Yield of O₂ Evolution in Leaves of Higher Plants. *Planta* **171**: 171-184.

DLG Mitteilungen (2004): **10**: 64-65. Stickstoff wird richtig teuer.

Dreccer, M.F., van Oijen, M., Schapendonk, A.H.C.M., Pot, C.S., and Rabbinge, R. (2000): Dynamics of Vertical Leaf Nitrogen Distribution in a Vegetative Wheat Canopy. Impact on Canopy Photosynthesis. *Annals of Botany* **86**: 821-831.

Ehlert, D. and Schmerler, J. (2001): Sensor-Based Real-Time Application of Late Nitrogen Fertiliser in Wheat. In: Grenier, G., Blackmore, S. (Eds.): Third European Conference on Precision Agriculture **2**: 911-916. Montpellier: Agro Montpellier.

Ehlert, D., Schmerler, J. and Voelker, U. (2004): Variable Rate Nitrogen Fertilisation of Winter Wheat Based on a Crop Density Sensor. *Precision Agriculture* **5**: 263-273.

Fernyhough, P., Foyer, C.H., and Horton, P. (1984): Increase in the Level of Thylakoid Protein Phosphorylation in Maize Mesophyll Chloroplasts by Decrease in the Transthylakoid pH Gradient. *FEBS Letters* **176**: 133-138.

Filella, I., Serrano, L., Serra, J., Peñuelas, J. (1995): Evaluating Wheat Nitrogen Status with Canopy Reflectance Indices and Discriminant Analysis. *Crop Science* **35**: 1400-1405.

Flowers, M., Weisz, R., Heininger, R., Tarleton, B., and Meijer, A. (2003): Field Validation of a Remote Sensing Technique for Early Nitrogen Application Decisions in Wheat. *Agronomy Journal* **95**: 167-176.

Günther, K.P., Lüdeker, W., and Dahn, H.G. (1991): Design and Testing of a Spectral-Resolving Fluorescence Lidar System for Remote Sensing of Vegetation. In: 5th International Colloquium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing **5**: 723-726. France: Courchevel.

Günther, K.P., Dahn, H.G., and Lüdeker, W. (1993): A Reabsorption Model for Fluorescence. In: Günther, K.P., and Schmuck, G.K. (Eds.): Final Reports of EUREKA Project LASFLEUR (EU380) - Remote Sensing of Vegetation by Laser-Induced Chlorophyll Fluorescence: 149-150.

Günther, K.P., Dahn, H.G., and Lüdeker, W. (1994): Remote Sensing Vegetation Status by Laser-Induced Fluorescence. *Remote Sensing of Environment* **47**: 10-17.

Guyot, G. (1990): Optical Properties of Vegetation Canopies. In: Steven, M.D. and Clark, J.A. (Eds.): Applications of Remote Sensing in Agriculture: 19-43. London: Butterworths.

Häder, Donat-P. (1999): Photosynthese. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.

Hak, R., Lichtenthaler, H.K., and Rinderle, U. (1990): Decrease of the Chlorophyll Fluorescence Ratio F690/F730 during Greening and Development of Leaves. *Radiation and Environmental Biophysics* **29**: 329-336.

Hege, Offenberger, and Fischer (2003): DSN (Düngeberatungssystem Stickstoff). Ableitung der N-Düngeempfehlung für die wichtigsten landwirtschaftlichen Feldfrüchte. Institut für Agrarökologie, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL).

Hirose, T. and Werger, M.J.A. (1987a): Nitrogen Use Efficiency in Instantaneous and Daily Photosynthesis of Leaves in the Canopy of a *Solidago Altissima* Stand. *Physiologia Plantarum* **70**: 215-222.

Hirose, T. and Werger, M.J.A. (1987b): Maximizing Daily Canopy Photosynthesis with Respect to the Leaf Nitrogen Allocation Pattern in the Canopy. *Oecologia* **72**: 520-526.

Hoge, F.E., Swift, R.N., and Yungel, J.K. (1983): Feasibility of Airborne Detection of Laser-Induced Fluorescence Emissions from Green Terrestrial Plants. *Applied Optics* **22** (19): 2991-3000.

Horton, P. and Hague, A. (1988): Studies on the Induction of Chlorophyll Fluorescence in Isolated Barley Protoplasts. IV. Resolution of Non-Photochemical Quenching. *Biochimica et Biophysica Acta* **932**: 107-115.

Hydro Agri, Hanninghof 35, D-48249 Dülmen, Deutschland (2002): Hydro-N-Tester. N-Düngung fest im Griff. Hydro N-Tester-gezielter düngen. N-Düngeempfehlung 2002 zum Schossen und Ährenschieben.

Jochimsen, H. (2004): Strategien für Ackerbauern. *DLG Mitteilungen* **10**: 30-33.

Krause, G.H. and Weis, E. (1991): Chlorophyll Fluorescence and Photosynthesis: The Basics. *Annual Reviews of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* **42**: 313-349.

Kübler, E. (1994): Weizenanbau. Stuttgart (Hohenheim): Eugen Ulmer GmbH & Co.

Laasch, H. (1987): Non-Photochemical Quenching of Chlorophyll *a* Fluorescence in Isolated Chloroplasts under Conditions of Stressed Photosynthesis. *Planta* **171**: 220-226.

Lammel, J., Wollring, J., and Reusch, S. (2001): Tractor Based Remote Sensing for Variable Nitrogen Fertilizer Application. In: Horst, W.J. et al. (Eds.): *Plant Nutrition-Food Security and Sustainability of Agro-Ecosystems*: 694-695. Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Lichtenthaler, H. K. and Rinderle, U. (1988): The Role of Chlorophyll Fluorescence in the Detection of Stress Conditions in Plants. *CRC Critical Reviews in Analytical Chemistry* **19**: 29-85.

Lichtenthaler, H.K. (1986): Laser-Induced Chlorophyll Fluorescence of Living Plants. In: *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS Zürich 1986) III*: 1571-1579. Noordwijk: ESA Publication Division.

Ludowicy, Ch., Schwaiberger, R., and Leithold, P. (2002): *Precision Farming. Handbuch für die Praxis.* Germany, Frankfurt am Main: DLG-Verlag.

Malzer, G.L., Copeland, P.J., Davis, J.G., Lamb, J.A., Robert, P.C. and Bruulsema, T.W. (1996): Spatial Variability of Profitability in Site-Specific N Management. In: Robert, P.C., Rust, R.H., and Larson, W.E. (Eds.): *Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture, USA, Minneapolis, Minnesota*: 967-975. ASA/CSSA/SSSA.

Merck KGaA, 64271 Darmstadt, Germany: Merckoquant, 1.10020.0001 **Nitrattest, Analysestäbchen** 10-500 mg/l NO₃⁻.

Nagler, P.L., Daughtry, C.S.T, and Goward, S.N. (2000): Plant Litter and Soil Reflectance. *Remote Sensing of Environment* **71**: 207-215.

Olf, H.W., Blankenau, K., Brentrup, F., Jasper, J., Link, A., and Lammel, J. (2005): Soil- and Plant-Based Nitrogen-Fertilizer Recommendations in Arable Farming. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **168**: 414-431.

Reetz, H.F. (Jr.) and Fixen, P.E. (1995): Economic Analysis of Site-Specific Nutrient Management Systems. In: Robert, P.C., Rust, R.H., and Larson, W.E. (Eds.): *Site-Specific Management for Agricultural Systems 1994, Proceedings of the 2nd International Conference, USA, Minneapolis, Minnesota*: 743-752. ASA/CSSA/SSSA.

Reusch, S. (1997): Entwicklung eines Reflexionsoptischen Sensors zur Erfassung der Stickstoffversorgung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen, Dissertation (Albrechts-Universität Kiel).

Rousseaux, M.C., Hall, A.J., and Sánchez, R.A. (1999): Light Environment, Nitrogen Content, and Carbon Balance of Basal Leaves of Sunflower Canopies. *Crop Science* **39**: 1093-1100.

Schächtl, J. (2004): Sensorgestützte Bonitur von Aufwuchs und Stickstoffversorgung bei Weizen- und Kartoffelbeständen, Dissertation (TU München, Freising-Weihenstephan).

Schächtl, J., Huber, G., Maidl, F.X., Sticksel, E., Schulz, J., and Haschberger, P. (2005): Laser-Induced Chlorophyll Fluorescence Measurements for Detecting the Nitrogen Status of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Canopies. *Precision Agriculture* **6**: 143-156.

Schilling, G. (2000): Pflanzenernährung und Düngung. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co.

Schmerler, J. and Jürschik, P. (1997): Technological and Economic Results of Precision Farming from a 7200 Hectares Farm in Eastern Germany. In: Stafford, J.V. (Ed.): *Precision Agriculture 1997, First European Conference on Precision Agriculture II (Technology, IT and Management)*: 991-995. Oxford: BIOS Scientific Publishers Limited, 1997.

Schreiber, U. and Bilger, W. (1993): Progress in Chlorophyll Fluorescence Research: Major Developments during the Past Years in Retrospect. *Progress in Botany* **54**: 151-173.

Shadchina, T.M. and Dmitrieva, V.V. (1995): Leaf Chlorophyll Content as a Possible Diagnostic Mean for the Evaluation of Plant Nitrogen Uptake from the Soil. *Journal of Plant Nutrition* **18**: 1427-1437.

Shiraiwa, T. and Sinclair, TR. (1993): Distribution of Nitrogen among Leaves in Soybean Canopies. *Crop Science* **33**: 804-808.

Sticksel, E., Maidl, F.-X., Schächtl, J., Huber, G., and Schulz, J. (2001): Laser-Induced Chlorophyll Fluorescence – A Tool for Online Detecting Nitrogen Status in Crop Stands. In: Grenier, G., Blackmore, S. (Eds.): *Third European Conference on Precision Agriculture 2*: 959-964. Montpellier: Agro Montpellier.

Stober, F. and Lichtenthaler, H.K. (1993): Characterization of the Laser-Induced Blue, Green, and Red Fluorescence Signatures of Leaves of Wheat and Soybean under Different Irradiance. *Physiologia Plantarum* **88**: 696-704.

Swinton, S.M. and Ahmad, M. (1996): Returns to Farmer Investments in Precision Agriculture Equipment and Services. In: Robert, P.C., Rust, R.H., and Larson, W.E. (Eds.): Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture, USA, Minneapolis, Minnesota: 1009-1018. ASA/CSSA/SSSA.

Tartachnyk, I., Rademacher, I., and Gäbler, G. (2003): Effect of Nitrogen Deficiency on Laser Induced Chlorophyll Fluorescence from Adaxial and Abaxial Sides of Sugar Beet and Wheat Leaves. In: Werner, A., and Jarfe, A. (Eds.): ECPA 2003: 583-584. Netherlands: Wageningen Academic Publishers.

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (2002): Merkblatt zur Durchführung des Nitratschnelltestes mit Nitratteststäbchen zur Ermittlung des N-Bedarfs von Wintergetreide für die 2. und von Winterweizen für die 3. N-Gabe. Jena.

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (2005): Merkblatt zur Durchführung des Nitratschnelltests mit Nitratteststäbchen zur Ermittlung des N-Bedarfs von Wintergetreide für die 2. und von Winterweizen für die 3. N-Gabe. Jena.

Valentini, R., Cecchi, G., Mazzinghi, P., Mugnozza, G.S., Agati, G., Bazzani, M., De Angelis, P., Fusi, F., Matteucci, G., and Raimondi, V. (1994): Remote Sensing of Chlorophyll *a* Fluorescence of Vegetation Canopies: 2. Physiological Significance of Fluorescence Signal in Response to Environmental Stresses. *Remote Sensing of Environment* **47**: 29-35.

Waskom, R.M., Westfall, D.E., Spellman, P.N., and Soltanpour, P.N. (1996): Monitoring Nitrogen Status of Corn with a Portable Chlorophyll Meter. *Communication in Soil Science and Plant Analysis* **27** (3&4): 545-560.

Weis, E. and Berry, J.A. (1987): Quantum Efficiency of Photosystem II in Relation to 'Energy'-Dependent Quenching of Chlorophyll Fluorescence. *Biochimica et Biophysica Acta* **894**: 198-208.

Zimmermann, R. and Günther, K.P. (1986): Laser-Induced Chlorophyll a Fluorescence of Terrestrial Plants. In: Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS Zürich 1986) **III**: 1609-1613. Noordwijk: ESA Publication Division.

Danksagung

Bedanken möchte ich mich bei einer Vielzahl von Menschen, die für das Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

An erster Stelle bedanke ich mich bei meinem Doktorvater, Prof. Dr. Schmidhalter, für die vielen interessanten Diskussionen und Anregungen. Ohne ihn wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen. Er bot mir die Gelegenheit, begonnene Arbeiten im Rahmen dieser Dissertation fortzuführen. Er ließ mir dabei alle denkbare Unterstützung zukommen und gewährte mir die notwendige freie Hand bei der Durchführung.

Dem BMBF danke ich für die finanzielle Unterstützung für einen Teil der durchgeführten Arbeiten.

Ganz besonderer Dank gilt auch meinem Ehemann und ehemaligem Chef, Herrn Dr. Peter Thoren, der mir als Diplom-Physiker vor allem bei der Beschreibung der Technik und der Entwicklung des physikalischen Modells der Licht-Materie-Wechselwirkung behilflich war.

Herrn Prof. Dr. Schilling danke ich für die vielen anregenden Gespräche und Denkanstöße im Rahmen der Versuchsdurchführung und der Interpretation der Messergebnisse der Jahre 2001 und 2002.

Südzucker, ATB und ZALF möchte ich danken für die Unterstützung der Messungen in Lütewitz und besonders für die Bereitstellung der Messdaten der Reflexionsmessungen, die im Kapitel 2 dargestellt sind.

Dem Institut für Agrarökologie der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, vertreten durch Herrn Hege und Herrn Offenberger, möchte ich für die Reflexionsmessungen im Raps danken, die ich im Kapitel 4 einbauen konnte.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei vielen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Pflanzenernährung der TU München für die nette Unterstützung bei der Durchführung zahlreicher Versuche und der Hilfe bei der Literaturbeschaffung.