

Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaues  
der Technischen Universität München

**Bewertung von Precision Farming  
dargestellt am Beispiel der teilflächenspezifischen  
Stickstoffdüngung**

Markus Gandorfer

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. H. Auernhammer

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c. A. Heißenhuber
2. Univ.-Prof. Dr. P. Wagner,  
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

Die Dissertation wurde am 07.12.2005 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 13.04.2006 angenommen.

## **Vorwort**

Nach Abschluss meiner Dissertation möchte ich allen herzlich danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben:

Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. Alois Heißenhuber für die Überlassung des Themas und die Betreuung der Arbeit als Doktorvater, für seine Hinweise und Anregungen, aber vor allem für seine Förderung und Unterstützung und den gewährten Freiraum.

Herrn Dr. Andreas Meyer-Aurich für die freundschaftliche Betreuung, Unterstützung und Motivation während der gesamten Zeit meiner Promotion. Ich hoffe wir werden noch einige gemeinsame Projekte zusammen bearbeiten!

Herrn Prof. Dr. Auernhammer, den Sprecher der DFG Forschergruppe IKB-Dürnast für seinen unermüdlichen und engagierten Einsatz für das IKB-Projekt sowie für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Herrn Prof. Dr. Peter Wagner für die wichtigen Hinweise und Anregungen zu meiner Arbeit sowie für die Übernahme des Koreferats.

Herrn Dr. F.X. Maidl für die Überlassung von zahlreichem Datenmaterial.

Der DFG für die Förderung des Teilprojektes ‚Ökonomisch/ökologische Bewertung von Precision Farming‘ innerhalb der Forschergruppe IKB-Dürnast.

Danken möchte ich auch allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaues sowie den Mitgliedern der DFG Forschergruppe IKB-Dürnast für eine erlebnisreiche und bereichernde Zeit.

Nicht zuletzt gehört mein außerordentlicher Dank meiner Familie.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>AUFBAU UND ZIELE DER ARBEIT .....</b>	<b>4</b>
2.1	Aufbau .....	4
2.2	Ziele .....	4
<b>3</b>	<b>STAND DER FORSCHUNG .....</b>	<b>6</b>
3.1	Ökonomische Auswirkungen von Precision Farming .....	6
3.2	Auswirkungen von Precision Farming auf die Umwelt.....	14
3.3	Akzeptanzprobleme von Precision Farming Technologien bei der Einführung in die landwirtschaftliche Praxis .....	16
3.4	Zwischenfazit Literaturüberblick .....	17
<b>4</b>	<b>MATERIAL UND METHODEN .....</b>	<b>18</b>
4.1	Methodik zur ökonomischen Bewertung.....	18
4.1.1	Analyse der Ertragswirkung der Stickstoffdüngung anhand teilflächenspezifischer Produktionsfunktionen .....	21
4.1.2	Risikoanalysen.....	28
4.2	Methodik zur Bewertung von Precision Farming im Hinblick auf Umweltwirkungen .....	36
4.2.1	Verwendung von Umweltindikatoren zur Bewertung von Precision Farming Technologien .....	36
4.2.2	Indikatoren zur Abschätzung der Umweltwirkungen der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung .....	37
4.3	Material .....	39
4.3.1	Witterung und Pflanzenentwicklung im Untersuchungszeitraum.....	39
4.3.2	Datengrundlage zur Potenzialberechnung der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung .....	42
4.3.3	Datengrundlage zur Berechnung des realisierbaren Potenzials der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung .....	43
4.3.4	Datengrundlage zur Risikoanalyse .....	46

<b>5</b>	<b>ERGEBNISSE .....</b>	<b>47</b>
5.1	Modellierung ökonomischer und umweltrelevanter Potenziale der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung .....	47
5.1.1	Modellbeschreibung.....	48
5.1.2	Produktionsfunktionsanalyse .....	50
5.1.3	Ökonomische und umweltrelevante Auswirkungen der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung .....	69
5.1.4	Sensitivitätsprüfung der ermittelten Potenziale.....	76
5.1.5	Zwischenfazit Potenzialberechnungen .....	82
5.2	Ergebnisse der IKB Feldversuche zu verschiedenen teilflächenspezifischen Ansätzen zur Stickstoffdüngung (2002-2004).....	84
5.2.1	Versuchsergebnisse .....	84
5.2.2	Überlegungen zur weiterführenden Bewertungsmethodik teilflächenspezifischer Düngealgorithmen .....	91
5.2.3	Zwischenfazit Streifenversuche .....	93
5.3	Investitionsbedarf für Technologien zur teilflächenspezifischen N-Düngung und Break-Even-Analysen .....	95
5.3.1	Break-Even-Analysen .....	96
5.3.2	Zwischenfazit Break-Even-Analysen .....	98
5.4	Auswirkungen der teilflächenspezifischen N-Düngung auf das ökonomische Risiko sowie das Risiko hoher N-Bilanzüberschüsse .....	100
5.4.1	Handlungsmöglichkeiten zur Beeinflussung des Risikos.....	101
5.4.2	Einbeziehung der Unsicherheit in Entscheidungen durch Risikoanalysen .....	102
5.4.3	Ergebnisse der Risikoanalyse- Modellergebnisse .....	104
5.4.4	Zwischenfazit Risikoanalysen.....	111
<b>6</b>	<b>DISKUSSION DER ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN .....</b>	<b>112</b>
6.1	Diskussion der Produktionsfunktionsanalyse zur Ableitung teilflächenspezifischer optimaler spezieller Intensitäten .....	112
6.2	Diskussion der Potenzialberechnungen und Sensitivitätsanalysen.....	115
6.3	Diskussion der Feldversuche.....	119
6.4	Diskussion der Break-Even-Analysen .....	124
6.5	Diskussion der Risikoanalysen .....	125

<b>7</b>	<b>AUSBLICK</b> .....	<b>128</b>
7.1	Auswirkungen von Precision Farming auf die zukünftige Betriebsstruktur und Organisation .....	128
7.2	On-Farm-Research .....	134
7.3	Politische Handlungsoptionen zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Precision Farming zur Ausschöpfung ökologischer Vorteile.....	136
<b>8</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>138</b>
<b>9</b>	<b>SUMMARY</b> .....	<b>143</b>
<b>10</b>	<b>LITERATUR</b> .....	<b>147</b>
<b>11</b>	<b>ANHANG</b> .....	<b>157</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Informationstechnologien in der Landnutzung .....	2
Abbildung 2: Flussschema für eine ökonomische Bewertung der Teilflächenbewirtschaftung .....	20
Abbildung 3: Beispiele für Nutzenfunktionen eines Entscheidungsträgers .....	32
Abbildung 4: kumulierte Verteilungsfunktionen der Handlungsalternativen H1 und H2 .....	33
Abbildung 5: kumulierte Verteilungsfunktionen der Handlungsalternativen H1 und H2 .....	33
Abbildung 6: Beziehung zwischen Daten, Indikatoren, Aggregationsniveau und Indikatornutzer .....	37
Abbildung 7: Monatliche Niederschlagssummen und Temperaturmittelwerte in den Jahren 2000, 2002, 2003, 2004 sowie das langjährige Mittel der Wetterstation Weihenstephan.....	41
Abbildung 8: Versuchsschlag Sieblerfeld .....	43
Abbildung 9: Modell zur Bewertung der teilflächenspezifischen und einheitlichen Stickstoffdüngung .....	49
Abbildung 10: Teilflächenspezifische Produktionsfunktionen (Winterweizen) für das quadratische Regressionsmodell am Sieblerfeld in den Jahren 2002 und 2004.....	51
Abbildung 11: Teilflächenspezifische Produktionsfunktionen (Winterweizen) für das linear limitationale Regressionsmodell am Sieblerfeld in den Jahren 2002 und 2004.....	57
Abbildung 12: Teilflächenspezifische Produktionsfunktionen (Winterweizen) für das exponentielle Regressionsmodell am Sieblerfeld in den Jahren 2002 und 2004.....	62
Abbildung 13: Sensitivitätsanalyse ökonomischer Potenziale der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung, Sieblerfeld 2002, quadratisches Regressionsmodell .....	77
Abbildung 14: Sensitivitätsanalyse ökonomischer Potenziale der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung, Sieblerfeld 2002, exponentielles Regressionsmodell.....	78
Abbildung 15: Sensitivitätsanalyse ökonomischer Potenziale der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung, Sieblerfeld 2002, linear limitationales Regressionsmodell .....	79
Abbildung 16: Sensitivitätsanalyse ökologischer Potenziale der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung, Sieblerfeld 2002. ....	81
Abbildung 17: Teilflächenspezifische Produktionsfunktionen am Schafhof (2004) für 5 verschiedene Ertragszonen (EZ).....	91
Abbildung 18: Break-Even Analysen für den Mapping- mit Online Overlay-Ansatz zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung von Winterweizen.....	98
Abbildung 19: Kumulierte Wahrscheinlichkeitsfunktionen der stickstoffkostenfreien Leistung bei teilflächenspezifischer und einheitlicher Düngung .....	105
Abbildung 20: Kumulierte Verteilungsfunktionen der N-Salden bei einheitlicher und variabler Düngung. ....	108

Abbildung 21: Veränderung der Stickstoffbilanzsalden bei einer Reduzierung der Stickstoffdüngergaben um 20%.....	110
Abbildung 22: Die DFG Forschergruppe IKB Dürrnast und seine Teilprojekte .....	157
Abbildung 23: Versuchsanlage am Schafhof 2002. ....	158
Abbildung 24: Versuchsanlage am Versuchsfeld D4 im Jahr 2003. ....	159
Abbildung 25: Versuchsanlage am Schafhof 2004 .....	159
Abbildung 26: Beziehung zwischen der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit (EM 38) und dem Kornertrag am Schafhof 2004.....	161
Abbildung 27: Kumulierte Wahrscheinlichkeitsfunktionen für die stickstoffkostenfreie Leistung bei variabler (inkl. 10 €/ha für die teilflächenspezifische Applikation) und einheitlicher Düngung. ....	162
Abbildung 28: Karte teilflächenspezifischer Stickstoffbilanzsalden am Versuchsfeld Schafhof im Jahr 2002,.....	163
Abbildung 29: Beispiel einer Deckungsbeitragskarte eines Winterweizenschlages, Schafhof 2002.....	164

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Precision Farming Studien mit einheitlicher Bewirtschaftung .....	8
Tabelle 2: Möglichkeiten der teilschlagspezifischen Düngung .....	9
Tabelle 3: Gütekriterien für die Punktschätzung von $N_{opt}$ und deren Aussagen .....	27
Tabelle 4: Stickstoffkostenfreie Leistungen sowie kumulierte Eintrittswahrscheinlichkeiten für zwei Handlungsvarianten A und B .....	34
Tabelle 5: Daten zur Berechnung der stochastischen Dominanz zweiten Grades der Varianten A und B .....	35
Tabelle 6: Untersuchte Düngevarianten am Schafhof 2002 zu Winterweizen .....	45
Tabelle 7: Untersuchte Düngevarianten am D4 2003 zu Winterweizen .....	45
Tabelle 8: Untersuchte Düngevarianten am Schafhof 2004 zu Winterweizen .....	46
Tabelle 9: Parameter der quadratischen Regressionsgleichung Sieblerfeld .....	53
Tabelle 10: 90 % Vertrauensintervalle (VI) für die optimale spezielle Intensität ( $N_{opt}$ ) am Sieblerfeld in den Jahren 2002 und 2004 (Winterweizen) .....	54
Tabelle 11: Parameter der linear limitationalen Regressionsgleichung .....	60
Tabelle 12: Parameter der exponentiellen Regressionsgleichung Sieblerfeld, 2002 und 2004 .....	64
Tabelle 13: Residuenanalyse der untersuchten Regressionsmodelle zu Winterweizen am Versuchsstandort Sieblerfeld, 2002 und 2004 .....	65
Tabelle 14: Teilflächenspezifische $N_{opt}$ s der untersuchten Regressionsmodelle am Sieblerfeld im Jahr 2002 und 2004 .....	67
Tabelle 15: Stickstoffkostenfreie Leistung (NKL) bei einheitlicher N-Düngung (Sieblerfeld) .....	70
Tabelle 16: Stickstoffkostenfreie Leistung (NKL) bei teilflächenspezifisch optimierter N-Düngung (Sieblerfeld) .....	71
Tabelle 17: Änderung ( $\Delta$ ) der stickstoffkostenfreien Leistung in €/ha durch teilflächenspezifisch optimierte Düngung im Vergleich zur einheitlichen Düngung (Sieblerfeld) .....	71
Tabelle 18: Modellierte N-Bilanzsalden bei einheitlicher N-Düngung für die Hoch- und Niedrigertragszone am Sieblerfeld .....	73
Tabelle 19: Modellierte N-Bilanzsalden bei teilflächenspezifisch optimierter N-Düngung für die Hoch- und Niedrigertragszone am Sieblerfeld .....	74
Tabelle 20: Ergebnisse des Streifenversuchs am Schafhof (2002) .....	85
Tabelle 21: Ergebnisse des Streifenversuchs am Schlag D4, 2003 .....	87
Tabelle 22: Ergebnisse des Streifenversuchs am Schafhof, 2004 .....	90
Tabelle 23: Abschätzung des Investitionsbedarfs für die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung nach verschiedenen Ansätzen .....	95
Tabelle 24: Break-Even-Analysen für verschiedene Ansätze zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung von Winterweizen .....	97

Tabelle 25: Ertragsmittelwerte (dt/ha) und Standardabweichung (dt/ha) für Winterweizen für Hoch- und Niedrigertragszonen .....	104
Tabelle 26: Algorithmus zur dritten N-Gabe des Mapping- mit Online Overlay-Ansatzes am Schafhof 2002 .....	158
Tabelle 27: Geschätzte Winterweizenerträge in dt/ha bei einheitlicher N-Düngung von 200 und 220 kg N/ha für die Hoch- und Niedrigertragszone am Sieblerfeld .....	160
Tabelle 28: Geschätzte Winterweizenerträge in dt/ha bei teilflächenspezifisch optimierter N-Düngung für die Hoch- und Niedrigertragszone am Sieblerfeld.....	160
Tabelle 29: Ergebnisse der Varianz- und Kovarianzanalyse in Bezug auf den Winterweizenertrag der untersuchten Düngesysteme am Schafhof (2004) .....	161

## Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
\$	US Amerikanische Dollar
%	Prozent
£	Britisches Pfund
€	Euro
ac	acre
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
cm	Zentimeter
d.h.	das heißt
dt.	Dezitonne
EC	Entwicklungsstadium von Pflanzen
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
et al.	Und andere
evtl.	eventuell
EZ	Ertragszone
FAM	Forschungsverbund Agrarökosysteme München
f.	folgende Seite
ff.	folgende Seiten
FK	Feldkapazität
GPS	Globales Positions- System
ha	Hektar
HE	Hohertragszone
IKB	Informationssystem Kleinräumige Bestandesführung
inkl.	inklusive
kg	Kilogramm
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
l	Liter
m	Meter
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
max.	maximal
Mio.	Million
ML	Maximum Likelihood
mm	Millimeter
N	Stickstoff
NE	Niedrigertragszone
nFK	nutzbare Feldkapazität
NKL	stickstoffkostenfreie Leistung
N <sub>opt</sub>	optimale spezielle Intensität der Stickstoffdüngung
OLS	ordinary least square
org.	organisch
P	Phosphor
PF	Precision Farming
Preagro	Verbundprojekt zu Precision Agriculture
R <sup>2</sup>	Bestimmtheitsmaß
RAUMIS	Regionalisiertes Agrar- und Umweltinformationssystem
S.	Seite
sog.	so genannt
SRU	Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen
TS	Trockensubstanz
USA	Vereinigte Staaten von Amerika
usw.	und so weiter

v. a.	vor allem
VB	Vegetationsbeginn
vgl.	vergleiche
VI	Vertrauensintervall
VK	Variationskoeffizient
vs.	versus
WASMOD	Modellsystem zur Bilanzierung von Wasser- und Stoffströme
WZW	Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil

## 1 Einleitung

Neue Technologien der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung werden seit mehr als fünfzehn Jahren wissenschaftlich erforscht und erprobt (vgl. AUERNHAMMER, 1994), um die räumliche Heterogenität von Standorteigenschaften und das daraus resultierende variable Pflanzenwachstum gezielt zu steuern. Diese Technologien ermöglichen eine georeferenzierte Kartierung von Bodeninformationen, Erträgen und Pflanzenparametern sowie die gezielte Umsetzung dieser Informationen in eine Teilschlagbewirtschaftung. Aufgrund dieser Möglichkeiten kann angenommen werden, dass Precision Farming (PF) die Nährstoffeffizienz und Produktivität erhöht und gleichzeitig Gefährdungspotenziale für Grund- und Oberflächengewässer vermindert. Nach HEIßENHUBER (2000, S. 102) könnte der Begriff der „Produktivität“, der in der öffentlichen Diskussion vielfach mit negativen Effekten für die Umwelt behaftet ist, somit durch Precision Farming eine neue Bedeutung erlangen.

Die Forschungsanstrengungen zur Entwicklung von Precision Farming Technologien erstrecken sich über die Entwicklung von Sensorsystemen zur Erfassung von räumlichen Heterogenitäten von Bodeneigenschaften bzw. Pflanzenbeständen, über die landtechnikgebundene Entwicklung von automatisierten Technologien zur Erfassung von Erntemengen, bis hin zur Entwicklung von Technologien zur teilflächenspezifischen Applikation von Düngern und Pflanzenschutzmitteln.

Da mit Precision Farming Technologien Betriebsmittel effizienter ausgebracht werden können als dies mit herkömmlichen Methoden möglich ist, wird vielfach davon ausgegangen, dass die teilflächenspezifische Bewirtschaftung einen höheren Deckungsbeitrag liefert als die flächeneinheitliche. Den Effizienzgewinnen stehen allerdings Kosten für die Informationsbeschaffung und Verarbeitung (EDV), sowie für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung gegenüber. Diese müssen gegen die Effizienzgewinne abgewogen werden.

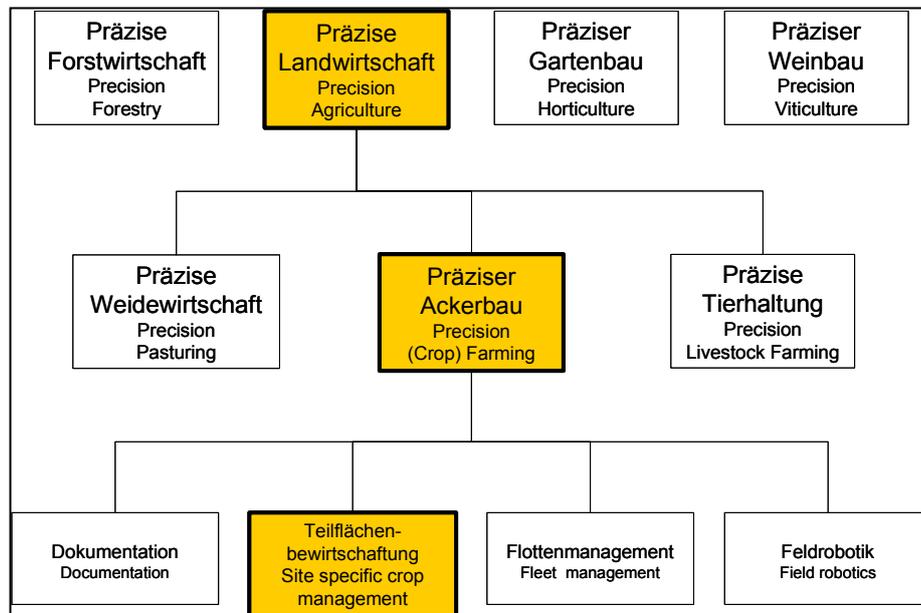
Wie in Abbildung 1 dargestellt, halten derzeit Informationstechnologien in allen Bereichen der Landnutzung ihren Einzug. Im Einzelnen sind die Bereiche Forstwirtschaft, Landwirtschaft, Garten- und Weinbau zu nennen. Greift man den Bereich Landwirtschaft heraus, so führt der Einsatz von verschiedensten

Informationstechnologien zum Precision Agriculture, also zu einer „präzisen“ Landwirtschaft.

Unter dem Überbegriff des Precision Agriculture können drei Hauptbereiche zusammengefasst werden:

1. die präzise Weidewirtschaft (Precision Pasturing),
2. der präzise Ackerbau (Precision Farming) und
3. die präzise Tierhaltung (Precision Livestock Farming).

Bei der vorliegenden Arbeit liegt das Hauptaugenmerk auf dem Precision Farming, und dort vor allem bei der Teilflächenbewirtschaftung (site specific crop management).



**Abbildung 1: Informationstechnologien in der Landnutzung**

Quelle: verändert nach AUERNHAMMER (2004, S. 33)

Unter der Teilflächenbewirtschaftung wird im Grunde eine teilflächenspezifische Applikation von Betriebsmitteln, wie z.B. Düngemittel (Stickstoffdünger, Grundnährstoffe bzw. Kalk) oder Pflanzenschutzmittel (z.B. Herbizide, Fungizide) verstanden. Durch die teilflächenspezifische Applikation verspricht man sich dabei zum einen Einsparung bei Betriebsmitteln zum anderen höhere Naturalerträge. Wobei speziell bei der teilflächenspezifischen Applikation von Kalk der Einspareffekt im Vordergrund steht, da oft keine höheren Naturalerträge aufgrund der meist guten Kalkversorgung der Böden erreicht werden können (LÜTTICKEN, 1996, S. 148). Auch

bei der teilflächenspezifischen Applikation von Herbiziden ist der Vorteil in der Reduzierung der Aufwandmenge zu sehen, hier zeigen Versuchsergebnisse, dass diese durchaus im Bereich von 50% der betriebsüblichen Applikationsmenge liegen kann (TIMMERMANN et al. 2003, S. 249). Es werden auch Precision Farming Ansätze verfolgt, die darauf abzielen die Saatmenge teilflächenspezifisch anzupassen. Hier zeigen beispielsweise Ergebnisse von SCHMERLER et al. (2001, S. 90), dass für Winterweizen bei annähernd gleichen Naturalerträgen die Aussaatmenge deutlich reduziert werden konnte. Zum Bereich der Teilflächenbewirtschaftung zuordenbar sind aber auch Möglichkeiten zur ortsspezifischen Bodenbearbeitung: hier ist es teilweise möglich durch Variation der Bearbeitungstiefe den Energieverbrauch zu halbieren (SOMMER UND VOßHENRICH, 2002, S. 248).

Auf die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen, da diese detailliert im Laufe dieser Arbeit behandelt wird.

## **2 Aufbau und Ziele der Arbeit**

### **2.1 Aufbau**

Die vorliegende Arbeit beginnt mit einem Literaturüberblick zum derzeitigen Wissensstand über ökonomische und ökologische Auswirkungen der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung.

Der Material- und Methodenteil beschreibt die Bewertungsmethodik sowie die verwendeten Versuchsdaten.

Im Ergebnisteil werden ökonomische und ökologische Potenziale der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung aus Modellkalkulationen abgeleitet und mit empirischen Ergebnissen aus Streifenversuchen verglichen. Anschließend folgt eine Bewertung der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung unter Berücksichtigung von Risikoaspekten.

Im Ausblick werden mögliche Auswirkungen des Einsatzes von Precision Farming Technologien auf die zukünftige Betriebsstruktur aufgezeigt. Der Ausblick endet mit politischen Handlungsoptionen zur Verbesserung der Akzeptanz von Precision Farming Technologien.

Mit der Diskussion der Ergebnisse und einer Zusammenfassung schließt die Arbeit.

### **2.2 Ziele**

Ziel der Arbeit ist es, eine Bewertung von Precision Farming dargestellt am Beispiel der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung von Winterweizen vorzunehmen.

Aus den im Projekt „Informationssystem kleinräumige Bestandesführung (IKB)<sup>1</sup>“ durchgeführten Streifenversuchen soll eine ökonomische und ökologische Bewertung der getesteten und erprobten Technologien (Mapping und Mapping- mit Online Overlay-Ansatz) zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung von Winterweizen

---

<sup>1</sup> Die Projektskizze, des von der DFG geförderten IKB-Dürnast ist in Abbildung 22 (Anhang) schematisch dargestellt.

abgeleitet werden. Vergleichend werden aus Parzellenversuchen (Stickstoffsteigerungsversuche) vorhandene Potenziale einer variablen Stickstoffdüngung hergeleitet.

Es soll ein Modell zur Bewertung ökonomischer und umweltrelevanter Auswirkungen der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung entwickelt werden, mit dem verschiedene Szenariorechnungen durchgeführt werden können. Dieses Modell soll die zu erwartenden ökonomischen und ökologischen Auswirkungen sowie zukünftige Potenziale von Precision Farming aufzeigen. Anhand von Risikoanalysen werden die langfristigen Effekte der Teilschlagdüngung untersucht. Abschließend werden Auswirkungen auf die Betriebsstruktur- bzw. organisation, sowie politische Handlungsoptionen zur Verbesserung der Akzeptanz von Precision Farming Technologien abgeleitet.

### **3 Stand der Forschung**

Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Forschung für den Bereich der Teilflächenbewirtschaftung aus ökonomischer Sicht sowie aus Umweltgesichtspunkten kurz dargestellt. Dabei wird jeweils speziell auf die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung eingegangen, da auf ihr der Focus dieser Arbeit liegt.

#### **3.1 Ökonomische Auswirkungen von Precision Farming**

Ökonomische Vorteile von Precision Farming (PF) können sich durch Kostensenkung aufgrund reduzierten Faktoreinsatzes (z.B. Stickstoffdünger oder Pflanzenschutzmittel) oder durch Ertragssteigerungen bzw. höhere Qualitäten ergeben. Kann der Einsatz von Betriebsmitteln bei gleich bleibenden oder steigenden Erträgen reduziert bzw. kann bei gleichem Betriebsmitteleinsatz ein höherer Ertrag erwirtschaftet werden, dann führt dies auf Teilkostenbasis zu höheren Deckungsbeiträgen. Genügt die Deckungsbeitragsänderung, um die Kapitalkosten zu decken, so führt der Einsatz der jeweiligen Precision Farming Technologie zu Gewinnsteigerungen und ist somit rentabel. Die Wirtschaftlichkeit von Precision Farming wird nach WAGNER (2004, S. 31) dabei von folgenden Faktoren bestimmt (siehe auch BATTE und VANBUREN, 1999):

- Notwendige Investitionen für Precision Farming
- Betriebsgröße und Anbaufläche
- Heterogenität des Standorts und gegenwärtig praktiziertes Niveau des Betriebsmitteleinsatzes
- Anteil und Umfang der Fruchtarten im Produktionsprogramm
- Effizienz des Precision Farming Ansatzes
- Organisation des Technikeinsatzes (Einzelbetrieb/ Lohnunternehmer/ Gewannebewirtschaftung...)
- Produkt- und Faktorpreisniveau/Subventionen (Agrarpolitik)
- Ausmaß der Reduktion des Ertragsrisikos
- Managementfähigkeit des „Bedienpersonals“ (Arbeitszeitbedarf/Wissen)

Die Kalkulation von Effekten teilflächenspezifischer Bewirtschaftung auf die Rentabilität der Produktion kann auf der Basis verschiedener Grundlagen erfolgen. Es ist zum einen möglich, direkt aus Parzellen- oder Streifenversuchen, in denen einheitliche und teilflächenspezifische Bewirtschaftungsvarianten verglichen werden, ökonomische Vorteile abzuleiten. Zum anderen kann mit Hilfe von Pflanzenwachstumsmodellen für bestimmte Flächen eine einheitliche bzw. teilflächenspezifische Bewirtschaftung und deren Auswirkung auf den Ertrag simuliert werden und dadurch auf mögliche ökonomische Vorteile von Precision Farming geschlossen werden. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Analyse von teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen, welche die Input-Output-Beziehung von kleinräumig applizierten Betriebsmitteln wiedergeben. Aufgrund der unterschiedlichen Ansätze zur Berechnung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit ist ein Vergleich verschiedener Studien unter Umständen problematisch. In der Literatur zeigt sich darüber hinaus auch eine uneinheitliche Methodik zur Berechnung der Rentabilität des Einsatzes von PF Technologien. Vielfach werden lediglich Teilkostenrechnungen durchgeführt, die die Maschinenkosten der PF Technologien nicht berücksichtigen. Uneinheitlich sind auch die veranschlagten Abschreibungszeiträume und Zinssätze, die einen Vergleich erschweren. Darüber hinaus werden vielfach Kosten der Informationsbeschaffung und der Weiterbildung, die für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung notwendig sind, nicht berücksichtigt.

Mit dem Beginn des Einsatzes von Precision Farming Technologien sind auch Studien zur Analyse der ökonomischen Vorteilhaftigkeit durchgeführt worden. In einer Reihe von Fallstudien wurde berichtet, dass höhere Deckungsbeiträge durch teilflächenspezifische Bewirtschaftung in der Größenordnung von 40 Euro/ha auftraten (z.B. JÜRSCHIK, 1999, S. 20; SCHMERLER et al., 2001, S. viii). LISSO (2003, S. 1142) zeigte mit Ergebnissen eines Praxisbetriebes auf, dass er durch Einsparungen von Betriebsmitteln und Mehrerträgen bereits im ersten Jahr die Anschaffungskosten der PF Technologien gedeckt hat. LAMBERT und LOWENBERG-DEBOER (2000) haben 108 Studien zur Wirtschaftlichkeitsanalyse von Teilflächenbewirtschaftung in den USA untersucht. Der überwiegende Anteil der Studien bestätigt wirtschaftliche Vorteile einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung. Allerdings haben eine beträchtliche Anzahl von Studien speziell zur

Stickstoff- bzw. Grunddüngung negative oder uneindeutige Ergebnisse geliefert. Tabelle 1 kann zudem entnommen werden, dass die Anzahl der untersuchten Studien zur Stickstoff- und Grunddüngung im Vergleich zum teilflächenspezifischen Pflanzenschutz oder zur Aussaat wesentlich höher ist. Auch in Deutschland haben verschiedene Untersuchungen gezeigt, dass die teilflächenspezifische Bewirtschaftung nicht immer positive ökonomische Effekte hervorruft (DABBERT und KILIAN, 2002, S. 426).

**Tabelle 1: Vergleich verschiedener Precision Farming Studien mit einheitlicher Bewirtschaftung**

untersuchte Teilschlagtechnik	Anteil der Studien mit			Anzahl der untersuchten Studien
	positiven ökonomischen Ergebnissen	negativen ökonomischen Ergebnissen	keinen eindeutigen Ergebnissen	
Stickstoffdüngung	63%	15%	22%	27
Grunddüngung (P, K)	71%	29%	0%	7
Kalk	75%	0%	25%	4
Stickstoff- & Grunddüngung	75%	8%	16%	24
Herbizide & Pflanzenschutz	86%	14%	0%	7
Saat	83%	17%	0%	6

**Quelle:** LAMBERT und LOWENBERG-DEBOER (2000, S. 14), es sind nur ausgewählte Teilschlagtechniken aufgeführt

### Teilflächenspezifische Stickstoffdüngung

Bisherige Studien zeigen, dass die ökonomischen Vorteile der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung zum einen von der betrachteten Kultur und von den vorherrschenden Standortverhältnissen abhängig sind. Zum anderen spielen der verwendete Düngealgorithmus und das dahinter stehende pflanzenbauliche Konzept zur Berechnung der Stickstoffdüngergaben eine große Rolle. Derzeit werden verschiedene Ansätze zur teilflächenspezifischen Applikation von Stickstoffdüngern in der Forschung erprobt (Tabelle 2).

Eine Möglichkeit besteht darin, anhand von historischen Ertragskarten und anderen Bodenparametern (z.B. elektrische Bodenleitfähigkeit, Zugkraftmessungen), Ertragszonen oder Managementzonen festzulegen (Mapping-Ansätze). Die Einteilung erfolgt oft in drei Zonen, z.B. Niedrig-, Mittel- und Hohertragszone. Diese Zonen können dann nach ihrem zu erwartenden Ertragspotenzial differenziert gedüngt werden. Dabei werden häufig die Niedrigertragszonen mit einem geringeren

Düngeaufwand und die Hohertragszonen mit einem höheren Düngeaufwand als den betriebsüblichen Düngemengen gedüngt (z.B. MAIDL et al. 2004, S. 1939). Die Düngung der Mittelertragszonen orientiert sich in der Regel am Düngenniveau der einheitlichen Düngergaben. Es gibt aber auch Ansätze bei denen Niedrigertragsbereiche höher gedüngt werden als Hohertragszonen (GODWIN et al., 2003, S. 535).

**Tabelle 2: Möglichkeiten der teilschlagspezifischen Düngung**

Düngeansatz	Technische Voraussetzungen	kleinräumige Information (Standort, Pflanze)	Modell optimaler Bewirtschaftung
Mapping	Grundlage für Ertragskarte (Ertragsmesssystem, Bodenkarte, etc.), GPS, teilflächenspezifische Düngapplikation	Ertragskarten	Düngung nach Entzug
Online	Sensor, kein GPS, teilflächenspezifische Düngapplikation	Ernährungszustand der Pflanzen	Düngung nach Ernährungszustand der Pflanze
Offline	Luftbilder ,GPS, teilflächenspezifische Düngapplikation	Ernährungszustand der Pflanzen	Düngung nach Ernährungszustand der Pflanze
Mapping und Online kombiniert	Sensor, Ertragskarte, GPS, teilflächenspezifische Düngapplikation	Ertragskarten, Ernährungszustand der Pflanzen	Regelwerk unter Berücksichtigung von Ertragspotenzial und Ernährungszustand der Pflanze

**Quelle:** eigene Darstellung

Online-Ansätze (vgl. Tabelle 2) verwenden zur Ableitung einer standortangepassten Stickstoffdüngergabe aktuelle Parameter in Echtzeit, die den Ernährungszustand der Pflanzen wiedergeben. Zu diesen Ansätzen zählt beispielsweise der Yara-N-Sensor® oder das MiniVeg N System der Firma Fritzmeier, die über Reflexionsmessungen auf den Stickstoffversorgungsstatus zurückschließen. Letzterer ist dann Grundlage einer teilflächenspezifischen Düngung. Ein weiterer Ansatz ist mit dem Pendelsensor (Crop-Meter) verwirklicht worden, der über den Grad der Auslenkung eines Pendels Rückschlüsse über die Bestandesdichte zulässt, die dann für die Bemessung der Düngergabe herangezogen wird.

Neben Online-Ansätzen gibt es auch sogenannte Offline-Ansätze (siehe Tabelle 2). Bei diesen Ansätzen wird auf Basis von Luftbildern, die in einer Höhe von ca. 3000 m aufgenommen werden, auf die Biomasse des Bestandes geschlossen. Die erstellten

Biomassekarten können dann mit anderen teilflächenspezifischen Informationen (z.B. Ertragskarten, Karten der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit des Bodens) kombiniert werden. Die Ausbringung des Stickstoffs erfolgt nach Bearbeitung der Bilder zeitversetzt (ca. 2 Tage), wie bei einem Mapping-Ansatz anhand von Applikationskarten. Anstelle von Luftbildern werden bei manchen Ansätzen auch Satellitenbilder verwendet. Einen sehr guten Überblick über diese Ansätze gibt KÜHBAUCH (2002).

Darüber hinaus können Mapping-Ansätze mit Informationen von Sensoren (Onlineinformationen) kombiniert genutzt werden (siehe Tabelle 2). Bei diesem Ansatz werden zusätzlich zu den bereits beschriebenen Parametern, die bei Mapping-Ansätzen verwendet werden, Onlineinformationen von Sensoren hinzugezogen, um eine bessere Anpassung an die aktuellen Vegetationsbedingungen zu erreichen. Eine weitergehende detaillierte Übersicht über verschiedene Informationsgrundlagen zur Steuerung pflanzenbaulicher Produktion im Rahmen eines Precision Farming wird bei LÜTTICKEN (1996) gegeben.

Die verschiedenen Ansätze zeichnen sich durch unterschiedliche Vorzüge aus. Mapping-Ansätze sind aus dem Bedürfnis erwachsen, bodenbedingte Heterogenitäten bei der Düngung zu berücksichtigen. Die Möglichkeiten einer bedarfsgerechten Düngung auf der Basis von Mapping-Ansätzen sind allerdings begrenzt, da diese ausschließlich historische Daten verwenden.

Sensor-Ansätze messen den Ernährungszustand der Pflanzen und erfassen somit den aktuellen Bedarf der Pflanzen genauer. Ein weiterer Vorteil reiner Sensor-Ansätze liegt darin, dass nicht unbedingt ein GPS-System benötigt wird. Dies ist beispielsweise mit dem YARA-N-Sensor®, dem neu entwickelten Lasersensor MiniVeg N, oder dem Crop-Meter (Pendelsensor) möglich.

Die kombinierten Ansätze erfassen den aktuellen Ernährungszustand der Pflanzen und berechnen darüber hinaus die Düngemenge in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften, wie Wasserhaltefähigkeit oder langjähriges Ertragsniveau. Diese Ansätze vereinen somit die Vorteile von Mapping- und Sensor-Ansätze, sind

aber auch wesentlich schwieriger in die Praxis umzusetzen, da oft die Kommunikation zwischen den Komponenten unterschiedlicher Anbieter nicht zufrieden stellend gelöst ist.

LAMBERT und LOWENBERG-DEBOER (2000, S. 17 f.) analysierten fünf Studien zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung von Winterweizen. Zwei der Studien zeigten dabei Gewinne (Kosten für Bodenproben, Beratung, Ausbringung und Technik sind berücksichtigt) durch Teilschlagdüngung von 5 und 8 \$/acre (ca. 10-15 €/ha). DABBERT und KILIAN (2002, S. 426) stellten im Rahmen des Preagro-Projektes an sechs verschiedenen Standorten Deckungsbeitragsänderungen von -105 €/ha bis +84 €/ha (Mittelwert -5 €/ha) bei Winterweizen durch teilflächenspezifische Bewirtschaftung (Stickstoffdüngung, Saat und Pflanzenschutz) fest. GODWIN et al. (2003, S. 535) zeigten bei der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung nach verschiedenen Mapping-Ansätzen von Weizen ökonomische Vorteile bzw. Nachteile bezüglich der stickstoffkostenfreien Leistung im Bereich von -15 £/ha bis + 21 £/ha (ca. -21 – 30 €/ha). MAIDL et al. (2004) untersuchten in zwei Streifenversuchen in den Jahren 2000 und 2001 verschiedene Ansätze zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung von Winterweizen. Sie stellten dabei fest, dass in beiden Versuchen die Kornerträge mit dem angewandten Mapping-Ansatz um 2 bzw. 7 dt/ha niedriger waren als bei einheitlicher Düngung (MAIDL et al., 2004, S. 1944). Mit einem kombinierten Mapping- mit Sensor-Overlay-Ansatz konnte im Versuch des Jahres 2001 eine Steigerung des Kornertrags um 4 dt/ha erzielt werden. Im Streifenversuch des Jahres 2000 war der Kornertrag allerdings mit diesem Ansatz um 1 dt/ha niedriger als bei einheitlicher Düngung. Im Versuchsjahr 2001 wurde zusätzlich noch der Yara-N-Sensor® mit untersucht. Mit diesem war es möglich, eine leichte Ertragssteigerung von 1 dt/ha im Gegensatz zur einheitlichen Düngung zu erzielen. EBERTSEDER et al. (2003, S. 196 f.) konnten durch kleinräumige N-Düngung von Winterweizen mit einem Mapping-Ansatz keine, mit dem YARA-N-Sensor® eine leichte Steigerung des Naturalertrags erreichen. KILIAN und GRABO (2002, S. 36) konnten eine signifikante Ertragssteigerung durch teilflächenspezifische Stickstoffdüngung von Winterweizen mit einem Sensoransatz im Vergleich zur einheitlichen Düngung von 2,6 dt/ha feststellen.

Neben der Steigerung des Naturalertrags bzw. der Einsparung von Stickstoffdüngern kann ein weiterer Vorteil der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung darin liegen, höhere und gleichmäßigere Qualitäten zu erzeugen. MAIDL et al. (2002, S. 64) stellten anhand von vier Streifenversuchen zu Winterweizen auf der Versuchsstation Scheyern fest, dass der Mapping-Ansatz in Bezug auf den Proteingehalt Vorteile im Vergleich zur einheitlichen Stickstoffdüngung besitzt. Mit Hilfe des Mapping- mit Online-Overlay-Ansatz konnte auf den untersuchten Flächen eine Erhöhung des Proteingehalts um ca. 4% erzielt werden. SCHWAIBERGER (2004, S. 91) berichtet von homogeneren Qualitäten bei Beständen, die mit dem YARA-N-Sensor® gedüngt wurden. Homogene Bestände durch die Düngung mit dem YARA-N-Sensor® sollen auch zu einer Verbesserung der Druschleistung führen.

Die Ergebnisse der dargestellten Untersuchungen sind, wie bereits angedeutet, von verschiedensten Faktoren beeinflusst. Einige der wichtigsten Bestimmungsfaktoren sind dabei:

- Die Standortheterogenität
- Der angewandte Ansatz zur Teilschlagdüngung
- Der Einfluss der zum Vergleich herangezogenen einheitlichen (betriebsüblichen) Referenzdüngung

Bei den erwähnten Studien kann meist nur der angewandte Ansatz zur Teilschlagdüngung (z.B. Mapping- oder Sensor-Ansatz) bzw. die Standortheterogenität in Bezug zum Versuchsergebnis gestellt werden. Der Einfluss unterschiedlicher einheitlicher Referenzdüngungen wird meist nicht untersucht. Dieser Sachverhalt macht eine abschließende Bewertung der verschiedenen Systeme zur Teilschlagdüngung schwierig. Erschwerend kommt hinzu, dass der Einfluss der angebauten Kultur auf die ökonomische Vorteilhaftigkeit einer teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung sehr hoch ist (vgl. LAMBERT und LOWENBERG-DEBOER, 2000), und somit die Ergebnisse zwischen Kulturen nicht übertragbar sind. Die Tatsache, dass zu den verschiedenen Ansätzen zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung von Winterweizen die Anzahl an belastbaren wissenschaftlichen Studien begrenzt ist, erschwert die Bewertung auf

Basis eines Literaturüberblicks zusätzlich. Zudem zeigen die Schwankungen der Ergebnisse aus den Studien, dass keine einheitlichen Aussagen zur Wirtschaftlichkeit der teilflächenspezifischen Düngung gemacht werden können (vgl. auch SWINTON und LOWENBERG-DEBOER, 1998).

### **3.2 Auswirkungen von Precision Farming auf die Umwelt**

Seit der Veröffentlichung des Sondergutachtens „Umweltprobleme der Landwirtschaft“ im Jahr 1985 steht die Reduzierung der Umweltbelastungen durch die Landwirtschaft im Zentrum der wissenschaftlichen, technologischen und politischen Diskussion (SRU, 1985). Eine Vielzahl technologischer und administrativer Maßnahmen und Instrumente sind seitdem diskutiert bzw. implementiert worden (Scheele et al., 1993). Trotz wissenschaftlicher und politischer Anstrengungen und einiger Erfolge zur Reduzierung der Umweltbelastungen der Landwirtschaft sind immer noch hohe stoffliche Belastungen der Umwelt durch die Landwirtschaft zu beklagen. Die Stickstoffbilanzüberschüsse haben hier eine Indikatorfunktion, da Stickstoffdüngemittel die wichtigsten Betriebsstoffe der pflanzlichen landwirtschaftlichen Produktion darstellen. Deutschlandweit lagen gegen Ende der 90er Jahre N-Salden landwirtschaftlicher Betriebe (Flächenbilanz) in einer Größenordnung von 80 kg N/ha (WEINGARTEN und KREINS, 2004, S. 435). Damit liegen die N-Emissionen im Bundesdurchschnitt, vor allem aber in einzelnen Regionen Deutschlands deutlich über dem Niveau dessen, was gemessen an umwelt- und gesellschaftspolitischen Gesichtspunkten akzeptabel ist. Eine zunehmende Anreicherung des Grundwassers mit Stickstoffverbindungen und eine Eutrophierung von Vorflutern und Biotopen ist die Folge.

Neben der Belastung mit Stickstoffverbindungen nimmt die Landwirtschaft als größter Flächennutzer in der Bundesrepublik Deutschland Einfluss auf die Ökosysteme über den Eintrag von Phosphaten, Sedimenten und Xenobiotika, sowie über mechanische Eingriffe in den Boden. Die Strukturierung (Feldgrößen, Feldrandstrukturen) und die Nutzungshäufigkeit der Flächen beeinträchtigen weiterhin die Habitatqualität der landwirtschaftlichen Flächen für die Flora und Fauna der Agrarlandschaften.

Die PF Technologie wurde von Anfang an als eine Technologie angesehen, die sowohl ökonomisch als auch ökologisch effizienter ist als konventionelle Landbewirtschaftung, und damit gleichermaßen ökonomische und ökologische Vorteile liefert. In verschiedenen Forschungsprojekten werden seit Mitte der 90er Jahre PF Technologien erprobt und analysiert, die neben ökonomischen Effizienzgewinnen auch ökologische Vorteile bieten. AUERNHAMMER (2001) beschreibt

in dem Artikel „Precision Farming- the environmental challenge“ das mögliche umweltentlastende Potenzial dieser Technologien.

Es ist zu vermuten, dass eine effizientere Düngung auch zu einer Entlastung der Umwelt führt, da sie impliziert, dass Nährstoffe nur dort ausgebracht werden, wo sie benötigt werden, und infolgedessen unproduktive Überschüsse vermieden werden.

Mit Hilfe von Modellrechnungen können diese Effizienzverbesserungen belegt werden (z.B. MULLA et al., 1992; ENGLISH et al. 1999). REICHE et al. (2002, S. 367) berichten, dass mit teilflächenspezifischer Bewirtschaftung eine Reduzierung der Nitrat-Sickerwasserverluste von 8-12 kg N/ha und Jahr bei gleicher Gesamtdüngermenge erreicht werden kann. In einer anderen Studie (WATKINS et al., 1998, S. 401) kann auf der Basis von Pflanzenwachstumsmodellen in einer Simulation mit Kartoffeln jedoch keine Reduktion der Nitratauswaschung mit teilflächenspezifischer Bewirtschaftung nachgewiesen werden. EBERTSEDER et al. (2003, S. 196 ff.) zeigen, dass durch teilflächenspezifische Stickstoffdüngung nach einem Mapping-Ansatz die N-Effizienz auf ertragsschwachen Standorten verbessert werden kann. MAIDL et al. (2004, S. 1946 ff.) kommen anhand von Streifenversuchen mit Winterweizen zu dem Schluss, dass durch teilflächenspezifische Stickstoffdüngung mit einem „Online with Map“ Ansatz die Stickstoffeffizienz verbessert werden kann. Sie folgern außerdem, dass speziell auf auswaschungsgefährdeten Teilflächen hohe Stickstoffbilanzüberschüsse vermieden werden können. SCHMIDHALTER et al. (2003, S. 115) kommen nach detaillierten Untersuchungen zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung zu dem Schluss, dass Precision Farming wesentlich zu Umweltverbesserungen und damit auch zur Ressourceneinsparung beitragen kann.

Es zeigt sich jedoch, dass die umweltrelevanten Verbesserungen von Precision Farming (PF) Technologien (ähnlich wie bei der ökonomischen Vorteilhaftigkeit) stark abhängig von der Art der PF Technologie und der einheitlichen Referenzbewirtschaftung sind. Unter Umständen kann eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung auch zu einem im Vergleich zur einheitlichen Bewirtschaftung höheren Betriebsmitteleinsatz führen (WEIGERT et al., 2004, S. 322). Unabhängig davon verbessert jedoch die teilflächenspezifische Bewirtschaftung die Möglichkeiten, die Stickstoffdüngung auf ökonomische und ökologische Belange

auszurichten. ENGLISH et al. (1999) konnten zeigen, dass gesetzte Umweltziele mit Teilflächenbewirtschaftung besser erreicht werden können, als mit flächeneinheitlicher Bewirtschaftung. Aufgrund der dargestellten Zusammenhänge ist es notwendig, die Rahmenbedingungen aufzuzeigen, unter denen mit einer verminderten bzw. erhöhten Umweltbelastung zu rechnen ist, um den Einsatz der Technologien gezielt steuern zu können. Einen weiterführenden Überblick über 15 Studien, welche die Umweltwirkung der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung von verschiedenen Kulturen erfassen, geben BONGIOVANNI und LOWENBERG-DEBOER (2004, S. 363 ff.). Sie zeigen dabei, dass die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung in den meisten Fällen dazu führt, die N-Auswaschung zu verringern und einen Beitrag zur Grundwasserschonung liefert.

### **3.3 Akzeptanzprobleme von Precision Farming Technologien bei der Einführung in die landwirtschaftliche Praxis**

Obwohl Precision Farming Technologien seit den frühen 90iger Jahren erforscht und erprobt werden, ist bis jetzt die Verbreitung dieser Technologien weit hinter den ursprünglichen Erwartungen von Experten zurückgeblieben (vgl. FRIEDRICHSEN et al., 2004, S. 725). ROSSKOPF und WAGNER (2003, S. 129) erfassen auf Basis einer empirischen Studie Ursachen von „Informations- und Kommunikationstechnologie-Akzeptanzproblemen“ und kommen zu dem Schluss, dass im Wesentlichen die fehlende Benutzerfreundlichkeit, die hohen Anschaffungskosten, die unsicheren ökonomischen Vorteile sowie der hohe Zeitaufwand für die Akzeptanzprobleme verantwortlich sind. Weiterhin ist als wesentlicher Nachteil speziell bei den verschiedenen Precision Farming Technologien die fehlende Kompatibilität der einzelnen Technologien unterschiedlicher Anbieter zu nennen. Auch FRIEDRICHSEN et al. (2004, S. 727 f.) zeigen anhand eines Literaturüberblicks, dass mangelnde Kompatibilität zwischen verschiedenen Softwareprodukten und unerwartet hohe Technikkosten Einführungshemmnisse für Precision Farming Technologien sind. AUERNHAMMER (2003) nennt einheitliche Standards für die elektronische Kommunikation zwischen allen Arbeits- und Entscheidungsprozessen als Grundvoraussetzung für ein zukünftig effizientes Teilschlagmanagement. Roskopf und WAGNER (2003, S. 128) stellen in ihrer Studie außerdem fest, dass die Investitionsbereitschaft in Precision Farming Technologien im Zeitraum von 2002 bis

2003 sogar abgenommen hat, insgesamt planten 2002 nur 8% der befragten Landwirte Investitionen im Bereich Precision Farming bzw. GPS Software. Eine Umfrage von GUMPERTSBERGER und JÜRGENS (2003, S. 262) zeigt jedoch auch, dass der überwiegende Teil der Landwirte, die in PF Technologien investiert haben, mit ihrer Entscheidung zufrieden sind.

Können die beschriebenen Akzeptanzhemmnisse in absehbarer Zeit abgebaut werden, so ist grundsätzlich ein hohes Marktpotenzial in Deutschland für Precision Farming vorhanden. Das Akzeptanzpotenzial kann nach HERBST und LAMP (1998) in Abhängigkeit von der Bodenheterogenität und der Betriebsgrößenstruktur geschätzt werden. Die Analysen von HERBST und LAMP (1998) zeigen, dass in Deutschland auf 2-3 Mio. ha (11-19% der landwirtschaftlich genutzten Fläche) in den nächsten 15 Jahren Precision Farming Technologien eingesetzt werden könnten. Auch die Landtechnikindustrie sieht in der GPS-Technologie die bedeutendste Technologie, die in Zukunft die Agrartechniknachfrage bestimmen wird (VORGRIMLER und WÜBBEN, 2001, S. 16).

### **3.4 Zwischenfazit Literaturüberblick**

Die Literaturanalyse zu ökonomischen Auswirkungen von Precision Farming zeigt, dass über die einzelnen Teilschlagtechniken (Pflanzenschutz, Unkrautregulierung, Düngung, Bodenbearbeitung und Saat) keine einheitlichen Aussagen über die ökonomischen Vorteile abgeleitet werden können. LAMBERT und LOWENBERG-DEBOER (2000) haben 108 Studien zu Precision Farming in den USA untersucht. In 63 % der Fälle sind Gewinne durch Teilflächenbewirtschaftung festgestellt worden, 11% lieferten Verluste und in 27 % der Fälle waren die Ergebnisse nicht eindeutig. Die Analyse weiterer Studien deckt sich mit diesen Ergebnissen. Die Literaturlauswertung zeigt weiterhin, dass mit Hilfe von Precision Farming Technologien eine Reduktion der Umweltbelastungen in vielen Bereichen erreicht werden kann. Mit Hilfe teilflächenspezifischer Stickstoffdüngesysteme kann der Dünger effizienter eingesetzt werden, was zu einer Entlastung der Umwelt führt. Derzeitige Akzeptanzhemmnisse bei Precision Farming Technologien sind vor allem auf die unsicheren ökonomischen Vorteile und die mangelnde Kompatibilität der einzelnen Komponenten (Technik & Software) untereinander zurückzuführen.

## **4 Material und Methoden**

Das folgende Kapitel gibt einen detaillierten Überblick über die in dieser Arbeit angewandten wissenschaftlichen Methoden sowie über die verwendeten Versuchsdaten.

### **4.1 Methodik zur ökonomischen Bewertung**

Zur ökonomischen Bewertung der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung wird ein mehrstufiges Bewertungsschema in Anlehnung an LOWENBERG-DEBOER und SWINTON (1997, S. 373) verwendet. Die Bewertung erfolgt analog zu dem in Abbildung 2 dargestellten Vorgehen in vier Stufen.

In der ersten Stufe wird geprüft, inwiefern durch PF Technologien (bei einer Teilkostenbetrachtung) durch die Einsparung von Betriebsmitteln, unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf den Ertrag, ein höherer Deckungsbeitrag erzielt werden kann, als durch flächeneinheitliche Bewirtschaftung. Bei der Bewertung der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung bietet sich als ökonomische Größe die stickstoffkostenfreie Leistung (Erlös - Kosten der Stickstoffdüngung) an.

Zur Überprüfung der ersten Stufe sind zwei Vorgehensweisen möglich, die in dieser Arbeit auch parallel durchgeführt werden:

1. Mit Hilfe von kleinräumigen Stickstoffproduktionsfunktionen, die auf der Basis von Stickstoffsteigerungsversuchen geschätzt werden, wird ein theoretisches ökonomisches Potenzial der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung hergeleitet. Theoretisches Potenzial deshalb, weil davon ausgegangen wird, dass die ex post berechneten, teilflächenspezifisch speziellen optimalen Intensitäten ex ante mit entsprechenden Düngealgorithmen erreicht werden können. Es handelt sich also um die auf einem Schlag durch die natürlichen Gegebenheiten (Heterogenität von Standortbedingungen) vorzufindende, maximale Erhöhung des Deckungsbeitrags mit Hilfe von Precision Farming Techniken im Vergleich zu konventioneller, einheitlicher Bewirtschaftung. Dieser Schritt wird in Kapitel 5.1 anhand eines im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modells durchgeführt.

2. Ein weiterer Weg für die erste Bewertungsstufe besteht darin, direkt auf der Basis von Streifenversuchen (zuerst auf Teilkostenbasis) eine oder auch mehrere teilflächenspezifische Varianten der Stickstoffdüngung mit einer einheitlichen zu vergleichen. Es handelt sich dabei um das realisierbare ökonomische Potenzial. Dieser empirische Vergleich erfolgt in Kapitel 5.2 im Rahmen der Auswertung der IKB<sup>2</sup> Streifenversuche.

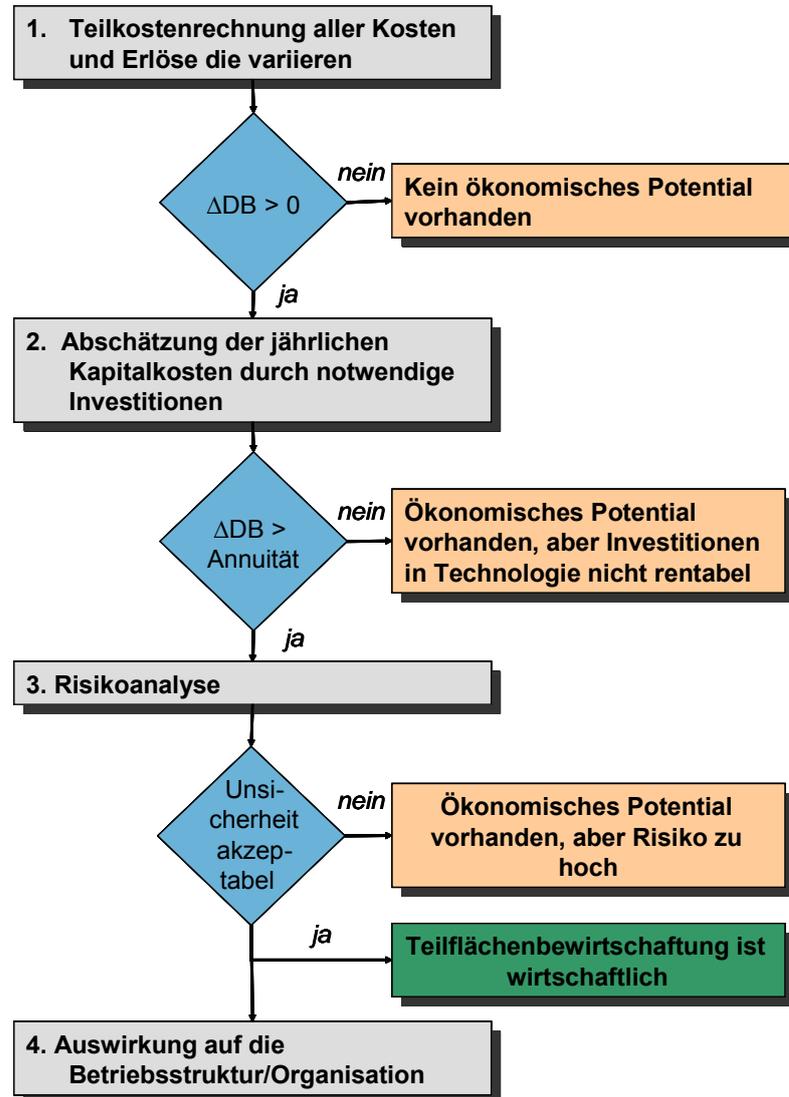
In der zweiten Bewertungsstufe (siehe Abbildung 2) wird untersucht, ob die Deckungsbeitragsänderung durch die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung genügt, um die jährlichen Kosten der notwendigen Investitionen zu decken. Ist dies der Fall, dann ist der Einsatz von Precision Farming rentabel. Die Rentabilität des Einsatzes von PF Technologien ist dabei abhängig davon, in welche Technologien für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung investiert wird. Bei der Investitionsrechnung ist darüber hinaus entscheidend, in welchem Umfang die Technologien eingesetzt werden können, um demzufolge entsprechende Mehrerlöse erzielen zu können. Die Bedeutung der Auslastung der Technologien für die Rentabilität wird mit Hilfe von Break-Even-Analysen untersucht. Investitionsrechnungen und Break-Even-Analysen werden in Kapitel 5.3 für verschiedene teilflächenspezifische Ansätze zur Stickstoffdüngung behandelt.

Die dritte Stufe der ökonomischen Analyse besteht aus einer Risikoanalyse, bei der die Auswirkungen der Technologie auf Ertragsschwankungen untersucht werden. Hierbei soll speziell der Frage nachgegangen werden, inwiefern der Einsatz von Precision Farming die Varianz der Erwartungswerte verändert. Zur Risikoanalyse werden in Kapitel 5.4 die Kriterien der Stochastischen Dominanz verwendet. Die Risikoanalyse wird auf der Basis von Modellkalkulationen mit Hilfe normierter Produktionsfunktionen und Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt.

Als vierte und letzte Stufe der Bewertung werden die Auswirkungen auf die Betriebsstruktur und Organisation im Ausblick diskutiert.

---

<sup>2</sup> Informationssystem Kleinräumige Bestandesführung



**Abbildung 2: Flussschema für eine ökonomische Bewertung der Teilflächenbewirtschaftung**  
Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an LOWENBERG-DEBOER und SWINTON (1997, S. 373)

#### **4.1.1 Analyse der Ertragswirkung der Stickstoffdüngung anhand teilflächenspezifischer Produktionsfunktionen**

Zur Berechnung von ökonomischen und umweltrelevanten Auswirkungen der Teilflächenbewirtschaftung ist die Kenntnis kleinräumiger Produktionsfunktionen eine Grundvoraussetzung. In dieser Arbeit werden zum einen empirisch ermittelte Produktionsfunktionen sowie normierte Produktionsfunktionen angewendet.

##### **4.1.1.1 Empirisch ermittelte Produktionsfunktionen**

Unabhängig von der verwendeten Datengrundlage zur Schätzung von Produktionsfunktionen ist der zugrunde gelegte Funktionsverlauf von großer Bedeutung für die weiterführenden Berechnungen. Die wohl am häufigsten vorzufindende Form ist der neoklassische Funktionsverlauf, der mit Hilfe einer Regressionsanalyse bei Vorgabe eines Polynoms zweiten Grades aus den Daten eines Stickstoffsteigerungsversuches geschätzt werden kann. Dazu kann jede herkömmliche Statistiksoftware oder ein einfaches Tabellenkalkulationsprogramm verwendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird dazu die Software PRISM 3.03® verwendet.

In der aktuellen Diskussion befindet sich derzeit aber auch die von WAGNER (1999) für den Fall von sehr homogenen Teilflächen geforderte linear limitationale Produktionsfunktion bzw. die exponentielle Ertragsfunktion (siehe LARK und WHEELER, 2003; SHEPHERD, 1993).

In dieser Arbeit werden daher vergleichend teilflächenspezifische Produktionsfunktionsanalysen zu folgenden Funktionstypen durchgeführt:

##### **Quadratische Produktionsfunktionen (Polynom 2. Grades):**

$$y = a + b * N + c * N^2$$

mit

$y$ : Körnertrag [dt/ha]

$N$ : Stickstoffdünger [kg/ha]

$a$ ,  $b$  und  $c$ : Koeffizienten des Regressionsmodells

### Linear limitationale Funktionen:

$$y = \begin{cases} a + b * N & \text{für } N < N0 \\ a + b * N0 & \text{für } N \geq N0 \end{cases}$$

mit:

$y$ : Kornertrag [dt/ha]

$N$ : Stickstoffdünger [kg/ha]

$a$ ,  $b$  und  $N0$ : Koeffizienten des Regressionsmodells

### Exponentielle Funktionen:

$$y = a + b * R^N$$

mit:

$y$ : Kornertrag [dt/ha]

$N$ : Stickstoffdünger [kg/ha]

$a$ ,  $b$ : Koeffizienten des Regressionsmodells

$R$ : Konstante (0.988 siehe LARK und WHEELER 2003, S. 1101)

### Schätzen von Produktionsfunktionen

Produktionsfunktionen können empirisch durch eine Regressionsanalyse mit der Methode der kleinsten Abstandsquadrate (OLS: ordinary least square) oder mit der Maximum-Likelihood-Methode (ML) aus den Daten eines Stickstoffsteigerungsversuches geschätzt werden.

Notwendiger Bestandteil einer jeden Regressionsanalyse ist die Residuenanalyse. Unter einem Residuum versteht man die Differenz zwischen einer Beobachtung und dem geschätzten Wert. Damit ein Regressionsmodell zuverlässig ist, müssen die Residuen folgenden Annahmen genügen (siehe PRECHT und KRAFT, 1993, S. 299 ff.):

- normalverteilt
- homoskedastisch
- nicht autokorreliert
- Erwartungswert=0

#### 4.1.1.2 Normierte Produktionsfunktionen

Da empirische, aus Stickstoffsteigerungsversuchen geschätzte Produktionsfunktionen nur für die jeweiligen Standort- und Klimabedingungen Gültigkeit besitzen, wird im Folgenden eine Methode vorgestellt, mit der aus begrenzter Datengrundlage Stickstoffertragsfunktionen bestimmt werden können. Diese Funktionen werden für die an späterer Stelle durchgeführten Modellbetrachtungen zu Risikoanalysen benötigt.

KRAYL (1993, S. 93 ff.) wendet hierbei das doppelt relative Schätzverfahren auf eine große Anzahl einzelner Stickstoffsteigerungsversuche an. Dabei wird der Maximalertrag eines jeden Stickstoffsteigerungsversuches gleich 1 gesetzt und alle anderen Erträge relativ dazu umgerechnet. Die zum Erreichen des Maximalertrags benötigte Stickstoffmenge wird ebenfalls gleich 1 gesetzt und alle anderen Stickstoffmengen wieder relativ dazu bestimmt. Somit ist das Maximum auf den Punkt 1/1 normiert. Dies hat zur Folge, dass Ertragswerte zwischen 0 und 1 auftreten können und Stickstoffmengen zwischen 0 und größer als 1 für den Fall, dass die Stickstoffmenge überschritten wurde, die zum Maximalertrag führt.

Die Daten der Einzelversuche werden anschließend zu einem einzigen, großen Datensatz zusammengeführt, aus dem mit Hilfe einer Regressionsanalyse (Methode der kleinsten Abstandsquadrate) die Parameter einer quadratischen, normierten Ertragsfunktion geschätzt werden. Diese Ertragsfunktion ist kulturartspezifisch und relativ standortunabhängig. Bei Kenntnis des standortspezifischen Maximalertrags und der dazu nötigen Stickstoffmenge können die normierten Parameter (Index  $r$ ) wieder in standortangepasste Parameter (Index  $a$ ) umgeformt werden.

Parameter der normierten quadratischen Winterweizen Produktionsfunktion ( $y = a_r + b_r N + c_r N^2$ ) in Anlehnung an KRAYL (1993, S. 100):

$$c_r = -0,440; b_r = 0,880 \text{ und } a_r = 0,560$$

mit

$y$ :           Kornertrag [dt/ha]

$N$ :           Stickstoffdünger [kg/ha]

Die Umformung der normierten Parameter (Index  $r$ ) in absolute Parameter (Index  $a$ ) erfolgt folgendermaßen:

$$a_a = a_r \cdot Y_{\max}$$

$$b_a = b_r \left( Y_{\max} / N_{\max} \right)$$

$$c_a = c_r \left( Y_{\max} / N_{\max}^2 \right)$$

dabei ist:

$Y_{\max}$  : der standortspezifische Maximalertrag

$N_{\max}$  : die Stickstoffmenge die zum Erreichen von  $Y_{\max}$  notwendig ist.

Die Methode der normierten Produktionsfunktionen wird in verschiedenen Publikationen verwendet (siehe z.B. FINCK und HAASE, 1987; KRAYL, 1993). Im Precision Agriculture Projekt Preagro werden diese Funktionen von DABBERT und KILIAN (2002, S. 427 ff.) herangezogen, um teilflächenspezifische Stickstoffproduktionsfunktionen zu generieren.

#### **4.1.1.3 Gütekriterien für die Punktschätzung der optimalen speziellen Intensität der Stickstoffdüngung**

Auswirkungen der Stickstoffdüngung auf den Ertrag von landwirtschaftlichen Kulturen können, wie bereits erläutert, mit Ertrags- bzw. Produktionsfunktionen untersucht werden. Auf der Basis der geschätzten Produktionsfunktionen werden oftmals (wie auch in dieser Arbeit) ex post Analysen zur optimalen speziellen Intensität der Stickstoffdüngung durchgeführt.

Die optimale spezielle Intensität ( $N_{\text{opt}}$ ) ist dann erreicht, wenn die Grenzkosten der Stickstoffdüngung dem Grenzerlös entsprechen.

### **Optimale spezielle Intensität ( $N_{opt}$ ) bei quadratischen Produktionsfunktionen**

Für gegebene Produkt ( $p$ )- und Faktorpreise ( $r$ ) und bei Annahme eines quadratischen Funktionsverlaufs ( $Y = a + b \cdot N + c \cdot N^2$ ) errechnet sich die optimale spezielle Intensität ( $N_{opt}$ ) nach folgender Formel:

$$N_{opt} = \left( \frac{r}{p} - b \right) \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot c} \right)$$

Dabei sind  $a$ ,  $b$  und  $c$  die Koeffizienten des Regressionsmodells.

### **Optimale spezielle Intensität ( $N_{opt}$ ) bei linear limitationalen Produktionsfunktionen**

Bei linear limitationalen Produktionsfunktionen befindet sich  $N_{opt}$  unabhängig von den Faktor- und Produktpreisen immer im Knickpunkt der Produktionsfunktion. Der Knickpunkt der Produktionsfunktion ist durch den Regressionsparameter  $N_0$  definiert.

$$N_{opt} = N_0$$

### **Optimale spezielle Intensität ( $N_{opt}$ ) bei exponentiellen Produktionsfunktionen**

$$N_{opt} = \frac{\ln[k / (b \ln R)]}{\ln R}$$

Dabei ist  $k$  das Verhältnis vom Faktor- (Stickstoffdünger) zum Produktpreis (Winterweizen) und  $b$  ist ein Koeffizient des Regressionsmodells (siehe vorher).

Wird  $N_{opt}$  nach obigen Formeln berechnet, so handelt es sich um eine Punktschätzung.

In den folgenden Abschnitten sollen einige Gütekriterien für diese Punktschätzung angesprochen werden (vgl. auch Tabelle 3):

- das Bestimmtheitsmaß des Regressionsmodells
- Konfidenzintervalle für die Regressionsparameter
- das Konfidenzintervall für  $N_{opt}$

### **Das Bestimmtheitsmaß**

Das Bestimmtheitsmaß dient dazu, den Grad der Anpassung einer Regressionsfunktion an gegebene Daten zu beschreiben. Somit kennzeichnet es den Zusammenhang zwischen Ziel- und Einflussgröße. Das Bestimmtheitsmaß ist als Quotient aus erklärter Variation und Gesamtvariation definiert. Das Bestimmtheitsmaß kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Je näher der Wert 1 erreicht wird, desto größer ist der Anteil der erklärten Variation durch die Regression (PRECHT und KRAFT, 1993, S. 282).

### **Konfidenzintervalle für die Regressionsparameter**

Das Konfidenzintervall gibt das Intervall für die geschätzten Regressionsparameter für eine bestimmte Sicherheitswahrscheinlichkeit an. Große, sich überschneidende Konfidenzintervalle für die geschätzten Regressionsparameter der Produktionsfunktionen deuten auf größere Bodenheterogenitäten (auch innerhalb der abgegrenzten Ertragszonen) hin.

### **Das Konfidenzintervall für die optimale spezielle Intensität ( $N_{opt}$ )**

Ein weiteres Kriterium zur Beurteilung der Punktschätzung von  $N_{opt}$  auf der Basis von Regressionsmodellen stellt das Konfidenzintervall für  $N_{opt}$  dar. Es gibt den Bereich an, in dem sich die geschätzte optimale spezielle Intensität mit einer gegebenen Sicherheitswahrscheinlichkeit befindet. Zur Berechnung des Konfidenzintervalls bei

quadratischen Produktionsfunktionen sei auf BACHMAIER und GANDORFER (2004) verwiesen. Bei der Diskussion der abgeleiteten optimalen speziellen Intensität liefert das Konfidenzintervall von  $N_{opt}$  wichtige Zusatzinformationen. Es führt unter anderem dazu, dass nicht der Eindruck vermittelt wird, dass die ökonomisch optimale Stickstoffgabe auf einen einzigen Punkt konzentriert ist, sondern dass sie eine gewisse Breite aufweist.

In Tabelle 3 sind nochmals zusammenfassend mögliche Gütekriterien für die Punktschätzung der optimalen speziellen Intensität, deren allgemeine Aussage sowie deren Bedeutung für die Potenzialberechnungen der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung dargestellt.

**Tabelle 3: Gütekriterien für die Punktschätzung von  $N_{opt}$  und deren Aussagen**

Kriterium	Aussage allgemein	Bedeutung für die Potenzialberechnung der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung
Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ )	Gütekriterium für die geschätzte Regressionsfunktion/ Regressionsmodell	Das Bestimmtheitsmaß alleine besitzt nur eine begrenzte Aussagekraft für die Potenzialberechnungen. Selbst bei sehr guten $R^2$ können lange Vertrauensintervalle bzw. nicht signifikante $N_{opt}$ -Unterschiede auftreten.
Konfidenzintervall der Regressionsparameter	Gibt das Intervall für die geschätzten Regressionsparameter für eine bestimmte Sicherheitswahrscheinlichkeit an	Überschneiden sich die Konfidenzintervalle der Regressionsparameter der teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen nicht, so kann dies als ein Zeichen dafür gewertet werden, dass eine Abgrenzung der Ertragszonen gelungen ist.
Konfidenzintervall für $N_{opt}$	Gibt das Intervall für $N_{opt}$ für eine bestimmte Sicherheitswahrscheinlichkeit an	Sehr große Vertrauensintervalle sind entweder auf die Versuchsanstellung zurückzuführen (z.B. Art und Anzahl der getesteten N-Stufen) oder lassen auf heterogene Bodenverhältnisse zurückschließen. Überschneiden sich die Vertrauensintervalle der einzelnen Ertragszonen stark, so kann dies unter Umständen bedeuten, dass alle Ertragszonen mit derselben N-Menge im Optimum gedüngt werden können.

**Quelle:** eigene Zusammenstellung

### **4.1.2 Risikoanalysen**

Entscheidungen unter Unsicherheit (dazu ist auch die Stickstoffdüngung zu zählen) sind nach BERG (1997, S. 1) dadurch gekennzeichnet, dass eine Handlung nicht zu einem eindeutig vorhersagbaren Ergebnis führt, sondern zu einer Menge von Ergebnisalternativen mit bestimmten Eintrittswahrscheinlichkeiten. Daher muss sich der Entscheidungsträger aufgrund von Erwartungen oder angenommenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen für eine Alternative entscheiden, die seiner Risikoeinstellung entspricht. Dieser Entscheidungsprozess kann auf Basis einer vorangegangenen Risikoanalyse geschehen.

Risikoanalysen bestehen dabei im Normalfall nach HANF (1991, S. 77 ff.) aus drei Schritten:

1. Definition der Handlungsmöglichkeiten
2. Ableiten des Ergebnisraums der Handlungsalternativen
3. Wahl einer Handlungsalternative aufgrund der gewonnenen Informationen über den Ergebnisraum der Zielvariablen

Die einzelnen Schritte werden im Folgenden näher erläutert:

#### **4.1.2.1 Definition der Handlungsmöglichkeiten (Schritt 1)**

Der erste Schritt bei Risikoanalysen besteht immer darin, mögliche Handlungsalternativen zu definieren. Die Festlegung der Handlungsalternativen kann entweder intuitiv auf Basis von persönlichen Erfahrungen oder mit Hilfe von externer Beratung erfolgen. Hat ein Landwirt beispielsweise den Entschluss gefasst auf seinem Betrieb Precision Farming Technologien zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung einzusetzen, so wären mögliche Handlungsalternativen entweder ein Mapping-Ansatz, ein Sensor-Ansatz bzw. ein Mapping- mit Online Overlay-Ansatz (vgl. Tabelle 2).

#### **4.1.2.2 Ableiten des Ergebnisraums der Handlungsalternativen (Schritt 2)**

Der Ergebnisraum kann mit verschiedensten Techniken bestimmt werden, stellvertretend sollen Stabilitäts- oder Sensitivitätsanalysen genannt werden, z.B. Stabilitätsberechnungen mittels linearer Programmierung oder die direkte Berechnung der Wahrscheinlichkeitsverteilung. Letztere kann jedoch nur bei Verteilungen angewendet werden, die mit ihrem Erwartungswert und der Varianz vollständig zu beschreiben sind. Dies ist beispielsweise bei Normalverteilungen möglich. Weit verbreitet sind unter anderem Simulationsexperimente zur Bestimmung des Ergebnisraums, zu denen auch Monte-Carlo Simulationen zählen (HANF, 1991, S. 77 ff.). Sie werden im entsprechenden Abschnitt näher erläutert, da sie in dieser Arbeit weiter Anwendung finden.

#### **4.1.2.3 Wahl einer Handlungsalternative aufgrund der gewonnenen Informationen über den Ergebnisraum der Zielvariablen (Schritt 3)**

Eine leicht zu realisierende Möglichkeit zur Orientierung bieten sog. „einfache Risikoanalysen“, d.h. der Entscheidende orientiert sich am Erwartungswert der entscheidungsrelevanten Zielgröße (z.B. der stickstoffkostenfreien Leistung oder am Stickstoffbilanzsaldo). Als Maß für das Risiko dient die Standardabweichung der Zielvariablen. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass sie leicht durchführbar ist und keine explizite Annahme über den Grad der Risikoaversion des Entscheidungsträgers getroffen werden muss. Orientiert sich der Entscheidende nur am Erwartungswert, wird Risikoneutralität vorausgesetzt (HANF, 1991, S. 79 ff.).

Eine weitere Analyse des Risikos kann anhand von Entscheidungsmatrizen durchgeführt werden. Bei Entscheidungsmatrizen wird eine Ergebnismatrix mit verschiedenen Handlungsmöglichkeiten erstellt, die unter bestimmten Voraussetzungen verschiedene Umweltzustände annehmen können. In einem zweiten Schritt muss diese dann in eine Entscheidungsmatrix überführt werden. Handelt es sich jedoch bei den verschiedenen Umweltzuständen der Ergebnismatrix um Zielgrößen, anhand derer die Entscheidung gefällt wird, so entspricht die Ergebnismatrix der Entscheidungsmatrix. Bei einem Vergleich von teilflächenspezifischer und einheitlicher Düngung sind die Zielvariablen

beispielsweise die stickstoffkostenfreie Leistung und der N-Saldo. In beiden Fällen würde die Ergebnismatrix aus den Erträgen bei verschiedenen Düngestrategien bestehen, die dann in zwei Entscheidungsmatrizen (mit Stickstoffbilanzsalden bzw. stickstoffkostenfreien Leistungen) überführt werden müssen. Ist die Entscheidungsmatrix erstellt, dann werden alle Umweltzustände der Handlungsalternativen paarweise miteinander verglichen. Sollte sich bei diesem Vergleich bereits zeigen, dass eine Handlungsalternative bei jedem Umweltzustand dominant ist, dann kann aufgrund dieser Dominanzprüfung eine Entscheidung gefällt werden. Dieser Fall wird aber nur selten eintreten, meistens wird die Dominanzprüfung nicht eindeutig für eine Handlungsalternative sprechen. Dann muss anhand von Entscheidungsregeln z.B. dem WALD-KRITERIUM oder dem HURWICZ-KRITERIUM entschieden werden. Für weitere Informationen über die detaillierte Vorgehensweise bei diesen Methoden sei auf HANF (1991) verwiesen.

Ein weiteres Kriterium zur Beurteilung einer Handlungsalternative ist der *Erwartungswert des Nutzens*. Dieses Konzept, das auf Daniel Bernoulli zurückgeht, ist jedoch in der Praxis nur sehr schwer durchzuführen, da die Nutzenfunktion (welche die Beziehung zwischen dem erzielten Ergebnis und dem individuellen Nutzen widerspiegelt) dem Entscheidenden bekannt sein müsste, die aber in der Praxis nur sehr schwer zu bestimmen ist. Aus diesem Grund hat eine Alternative namens *Erwartungswert-Varianz-Analyse* weite Verbreitung erlangt. Zur praktischen Durchführung dieser Analysemethode im landwirtschaftlichen Bereich sei auf BERG (1997) verwiesen, der dieses Konzept zur Beurteilung der optimalen speziellen Intensität (Stickstoffdüngung) sowie zur Bestimmung eines optimalen Produktionsprogramms verwendet hat.

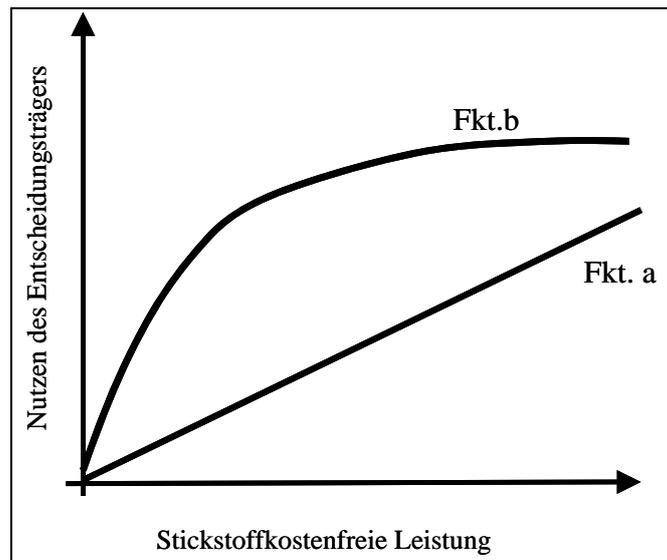
#### **4.1.2.3.1 Wahl einer Handlungsalternative nach der stochastischen Dominanz**

Bei der Auswahl einer Handlungsalternative nach der stochastischen Dominanz handelt es sich nach HANF (1991, S. 92 ff.) um ein Risikoanalyseverfahren, das im agrarwissenschaftlichen Bereich fest etabliert ist (vgl. dazu auch KUHLMANN, 2003, S. 110 ff.; LAMBERT und LOWENBERG-DEBOER 2003; EDER, 1993).

Die Vorgehensweise bei dieser Analysetechnik gliedert sich wie bereits vorher allgemein erläutert in drei Schritte (Definition der Handlungsalternativen, Ergebnisraum ableiten und Wahl einer Handlungsalternative aufgrund der gewonnenen Informationen über den Ergebnisraum).

Bei der Wahl einer Handlungsalternative wird eine Nutzenfunktion des Entscheidungsträgers verlangt, dies kann jedoch nicht direkt erfüllt werden, da zwar eine theoretische Nutzenfunktion vorhanden ist, diese aber nur sehr schwer quantifiziert werden kann (das gleiche Problem wie beim Erwartungswert des Nutzens). Es wird daher bei dieser Methode mit Annahmen über die Nutzenfunktion gearbeitet.

Bei der Prüfung der stochastischen Dominanz ersten Grades wird davon ausgegangen, dass die Nutzenfunktion monoton steigt, d.h. dass im Bezug auf die Stickstoffdüngung ein Landwirt eine höhere stickstoffkostenfreie Leistung einer niedrigeren vorzieht. Ist eine Handlungsalternative stochastisch dominant zweiten Grades gegenüber einer anderen, werden die beiden Handlungsvarianten noch zusätzlich hinsichtlich des Nutzens verglichen. Dabei wird unterstellt, dass die Nutzenfunktion monoton steigend und strikt konkav verläuft, also dem Gesetz des abnehmenden Grenznutzens gehorcht. An einem Beispiel veranschaulicht heißt das, dass der Nutzenzuwachs eines zusätzlichen €/ha bei einer stickstoffkostenfreien Leistung von 800 €/ha größer ist, als der Nutzenzuwachs eines zusätzlichen €/ha bei einer stickstoffkostenfreien Leistung von 1000 €/ha. Eine solche Nutzenfunktion entspricht einer risikoaversen Einstellung des Handelnden. In Abbildung 3 sind zwei mögliche Nutzenfunktionen eines Entscheidungsträgers abgebildet. Dabei entspricht die Funktion a einem risikoneutralen Verhalten und die Funktion b einem risikoaversen Verhalten des Entscheidungsträgers.



**Abbildung 3: Beispiele für Nutzenfunktionen eines Entscheidungsträgers**  
 Quelle: eigene Darstellung

### Vorgehensweise zur Prüfung der stochastischen Dominanz

Ausgangspunkt zur Prüfung der stochastischen Dominanz ist die kumulierte Wahrscheinlichkeitsfunktion (die Verteilungsfunktion) der Zielgröße einer Handlungsalternative.

Verhalten sich die kumulierten Wahrscheinlichkeitsfunktionen mehrerer Handlungen so wie in Abbildung 4 anhand der stickstoffkostenfreien Leistung zweier Handlungsalternativen dargestellt, kann bereits mit Hilfe der stochastischen Dominanz ersten Grades eine Rangfolge festgestellt werden. Die Verteilungsfunktion von H1 ist in diesem Fall stochastisch dominant ersten Grades gegenüber H2, da H1 immer rechts von H2 liegt. H1 erzielt also auf jedem Wahrscheinlichkeitsniveau eine höhere stickstoffkostenfreie Leistung als H2.

Schneiden sich die Funktionen jedoch wie in Abbildung 5, dann kann mit Hilfe der Kriterien der stochastischen Dominanz ersten Grades keine der beiden Verteilungsfunktionen präferiert werden. Man greift in diesem Fall auf die stochastische Dominanz zweiten Grades zurück. Grafisch kann das Problem folgendermaßen geprüft werden: In Abbildung 5 ist die waagrecht schraffierte Fläche größer als die senkrecht schraffierte Fläche. Ein risikoaverser Entscheider wird sich für die Handlungsalternative H2 entscheiden, da er den „sicheren“ Vorteil von H2 im

unteren Bereich stärker gewichtet, als den relativ unsicheren Vorteil von H1 im oberen Bereich. Solange dabei die waagrecht schraffierte Fläche größer ist als die senkrecht schraffierte Fläche, muss keine Annahme über den Grad der Risikoaversion getroffen werden.

Ist dies nicht der Fall, so müssen zusätzliche Gewichtungsfaktoren eingeführt werden, oder es kann auf stochastische Dominanz 3. Grades geprüft werden, was hier nicht weiter ausgeführt wird.

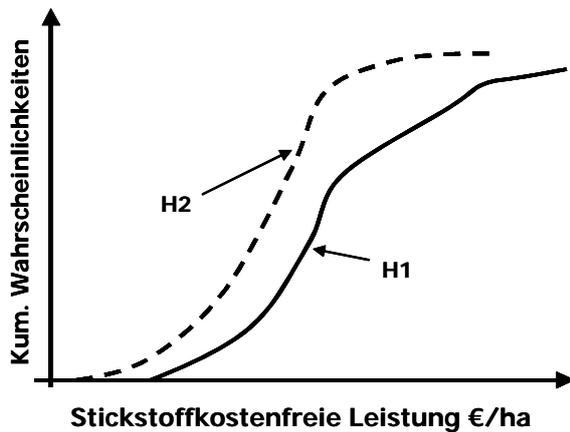


Abbildung 4: kumulierte Verteilungsfunktionen der Handlungsalternativen H1 und H2

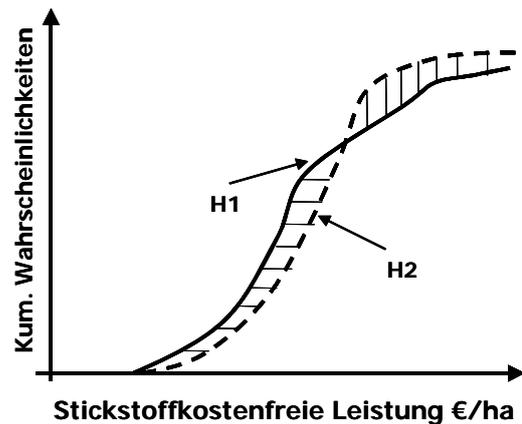


Abbildung 5: kumulierte Verteilungsfunktionen der Handlungsalternativen H1 und H2

Quelle: eigene Darstellung

Zur mathematischen Prüfung (vgl. HANF, 1991, S. 92 ff.) auf stochastische Dominanz ersten Grades muss zuerst die kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilung analog folgender Gleichung gebildet werden. Es handelt sich dabei um eine beschränkte Funktion mit  $a$  als untere und  $b$  als obere Grenze.  $R$  entspricht dem Wertebereich zwischen  $a$  und  $b$ .

$$F_1(R) = \int_a^b f(x) dx$$

Die Handlung  $F$  ist stochastisch dominant ersten Grades gegenüber der Handlung  $G$ , wenn gilt:

$$F_1(R) \leq G_1(R)$$

für alle  $R$  (und wenn mindestens für ein  $R$  gilt, dass  $F_1(R) < G_1(R)$  ist).

Kann aufgrund der Kriterien der stochastischen Dominanz ersten Grades keine der beiden Handlungsalternativen eliminiert werden, so kann die Prüfung der stochastischen Dominanz zweiten Grades erfolgen: Eine Verteilung F ist dann stochastisch dominant zweiten Grades über einer Verteilung H, wenn gilt:

$$F_2(R) \leq H_2(R)$$

für alle R.

Formal lässt sich dies prüfen, wenn die kumulierten Wahrscheinlichkeitsverteilungen integriert werden.

$$F_2(R) = \int_a^b F_1(x) dx$$

und entsprechend  $H_2(R)$ .

Die Prüfung der stochastischen Dominanz zweiten Grades kann in der praktischen Anwendung in Anlehnung an KUHLMANN (2003, S. 113 ff.) erfolgen. Zur Veranschaulichung der Berechnungen sind für zwei Varianten A und B die stickstoffkostenfreien Leistungen in €/ha sowie die jeweiligen kumulierten Eintrittswahrscheinlichkeiten (vgl. Tabelle 4) gegeben.

**Tabelle 4: Stickstoffkostenfreie Leistungen sowie kumulierte Eintrittswahrscheinlichkeiten für zwei Handlungsvarianten A und B**

stickstoffkostenfreie Leistung €/ha		kumulierte Eintrittswahrscheinlichkeit
Variante A	Variante B	
800	750	0,2
810	760	0,4
850	805	0,6
860	850	0,8
890	1000	1

**Quelle:** eigene Berechnungen

Das Ziel besteht, wie bereits geschildert, im Vergleich der Flächen unter den Verteilungsfunktionen der zur Wahl stehenden Varianten A und B. Die Fläche unter einer Verteilungsfunktion kann dabei als Summe der Teilflächen von einem Knickpunkt der Verteilungsfunktion zum nächsten Knickpunkt verstanden werden. Der erste Schritt der Berechnungen erfordert es jetzt, die Vereinigungsmenge der stickstoffkostenfreien Leistungen der Varianten A und B zu bilden und diese der

Größe nach zu ordnen. Dieser Schritt ist in Tabelle 5 in der ersten Spalte dargestellt. Die Bestimmung der Fläche unter der Verteilungsfunktion einer der beiden Varianten A und B erfolgt, indem als nächstes die Differenz (Ergebnisveränderung) von zwei Werten der Vereinigungsmenge gebildet wird (vgl. Spalte 2 in Tabelle 5). Diese Differenz wird dann mit der jeweiligen, bis zu dieser stickstoffkostenfreien Leistung erreichten kumulierten Eintrittswahrscheinlichkeit (vgl. „Spalte kumulierte Eintrittswahrscheinlichkeit Variante A bzw. B“ in Tabelle 5) der beiden Varianten A und B multipliziert. Durch das Aufaddieren dieser einzelnen Werte erhält man schließlich die Fläche unter der Verteilungsfunktion bis hin zu einem bestimmten Niveau der stickstoffkostenfreien Leistung (vgl. Spalte „integrierte Verteilung der Variante A und B“ in Tabelle 5). Der entscheidende Wert zum Vergleich der beiden Varianten ist jeweils der letzte Wert in der Spalte „integrierte Verteilung“. Für die Variante A ergibt sich analog Tabelle 5 ein Wert von 73, für die Variante B ein Wert von 200. Folglich würde ein risikoaverser Entscheidungsträger sich für die Variante A entscheiden, da die Fläche unter ihrer kumulierten Verteilungsfunktion kleiner ist, als die unter der Verteilungsfunktion der Variante B.

**Tabelle 5: Daten zur Berechnung der stochastischen Dominanz zweiten Grades der Varianten A und B**

geordnete Ergebnisse stickstoffkostenfreie Leistungen €/ha	Ergebnisveränderung	Variante A		Variante B	
		kumulierte Eintrittswahrscheinlichkeit	integrierte Verteilung	kumulierte Eintrittswahrscheinlichkeit	integrierte Verteilung
750	0	0	0	0,2	0
760	10	0	0	0,4	4
800	40	0,2	8	0,4	20
805	5	0,2	9	0,6	23
810	5	0,4	11	0,6	26
850	40	0,6	35	0,8	58
860	10	0,8	43	0,8	66
890	30	1	73	0,8	90
1000	110			1	200

**Quelle:** eigene Berechnungen

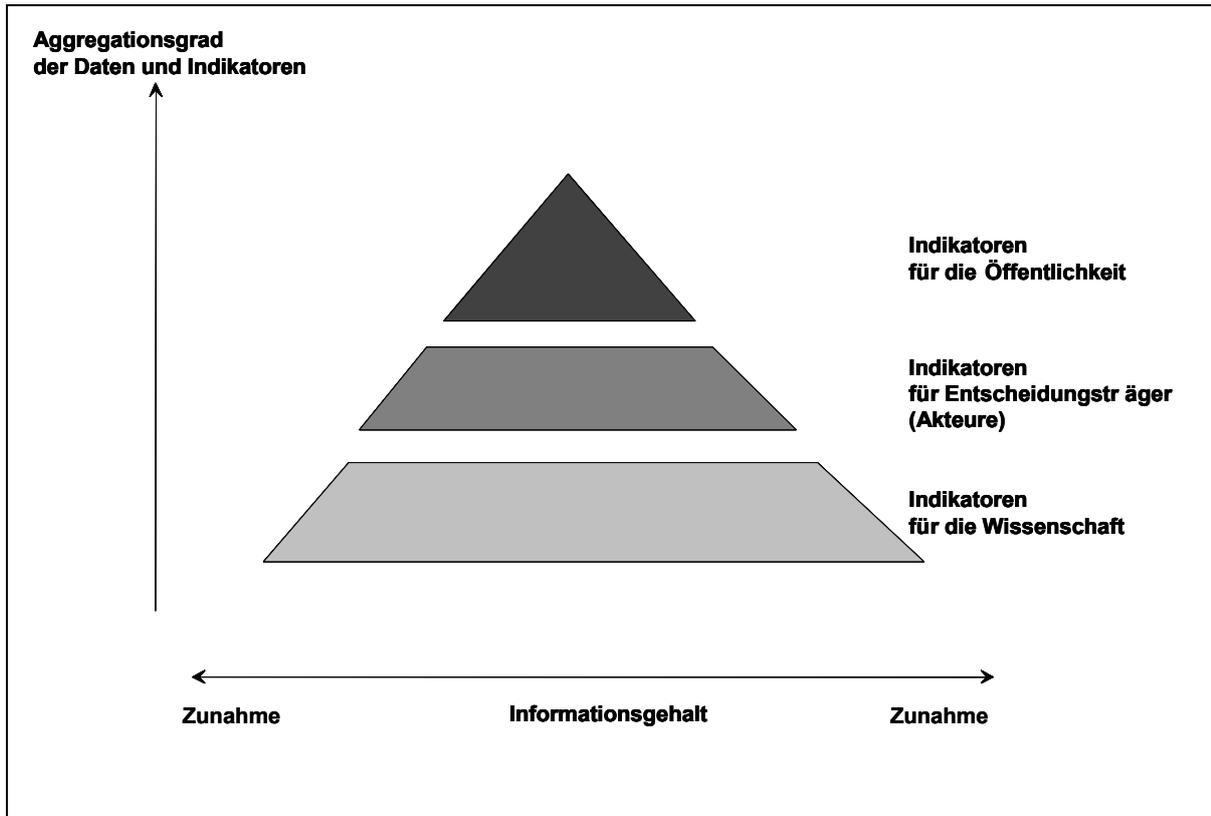
## **4.2 Methodik zur Bewertung von Precision Farming im Hinblick auf Umweltwirkungen**

Die Bewertung der Umweltwirkung der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngestrategien erfolgt mit Hilfe von Agrarumweltindikatoren. Analog zur ökonomischen Bewertung wird eine umweltrelevante Bewertung auf Basis der Potenzialberechnungen (Parzellenversuche) sowie der Streifenversuche (realisierbares ökologisches Potenzial) durchgeführt. Außerdem werden die Versuchsergebnisse unter risikoanalytischen Gesichtspunkten ausgewertet.

### **4.2.1 Verwendung von Umweltindikatoren zur Bewertung von Precision Farming Technologien**

Zur Bewertung umweltrelevanter Effekte der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung können Agrarumweltindikatoren herangezogen werden. *„Umweltindikatoren lassen sich als Parameter verstehen, die auf Basis statistischer Daten über den Zustand der Umwelt und über menschliche Produktions- sowie Konsumaktivitäten entwickelt werden. Mit Hilfe von Indikatoren werden Daten in politikrelevante Informationen transformiert“* (v. MÜNCHHAUSEN und NIEBERG, 1997, S.13).

Indikatoren sollen Eigenschaften komplexer Sachverhalte oder solcher, die direkt nicht erfassbar sind, wiedergeben. Die Informationen werden dabei vielfach verdichtet oder derart aufbereitet, dass sie für die jeweiligen Nutzer einen Wert bekommen. Der Grad der Aufbereitung bzw. Verdichtung der Information ist abhängig von den Anforderungen der Nutzer. Unterschiedliche Nutzer haben vielfach verschiedene Ansprüche an die Indikatoren (siehe Abbildung 6). Der Informationsgehalt nimmt mit zunehmender Aggregation der Daten ab.



**Abbildung 6: Beziehung zwischen Daten, Indikatoren, Aggregationsniveau und Indikatornutzer.**

Quelle: verändert nach MITCHELL (1996, S. 9)

#### **4.2.2 Indikatoren zur Abschätzung der Umweltwirkungen der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung**

Die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung führt im Idealfall zu Effizienzsteigerungen, die sowohl der Umwelt als auch dem Landwirt zugute kommen. Dadurch kann unter Umständen der Stickstoffbilanzsaldo verringert, und mit entsprechenden PF Technologien der Einsatz von überhöhten Stickstoffdüngergaben auf Standorten mit hohem Auswaschungspotenzial vermieden werden.

Zur Bewertung der Umweltverträglichkeit von Produktionsverfahren stellt HEIßENHUBER (1999) die Bedeutung von Stoff- und Energiebilanzen als wichtige Indikatoren heraus. Zur Abschätzung der Umweltentlastung durch den Einsatz von PF Technologien zur Stickstoffdüngung können dabei verschiedene Indikatoren verwendet werden. Ein möglicher Indikator zur Bewertung ist in diesem

Zusammenhang der Stickstoffbilanzsaldo (vgl. MAIDL et al. 2004). Er zeigt die Stickstoffmenge an, die in den verschiedenen Umweltmedien zu Problemen führen kann. Ein weiterer Indikator der zur Bewertung der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung verwendet wird, ist die Stickstoffeffizienz (vgl. EBERTSEDER et al. 2003; MAIDL et al. 2000). Nach KLEMISCH (1999, S. 2) lassen sich mit dem Sammelbegriff der N-Effizienz Art und Umfang der N-Aufnahme und N-Verwendung charakterisieren. Die direkte Messung der Nitratkonzentration im Sickerwasser ist als Indikator für die Abschätzung der Wirkung teilflächenspezifischer Düngestrategien aufgrund der notwendigen, aufwendigen Versuchsanstellung weniger geeignet, da der Nitratgehalt zeitlich und (insbesondere bei teilflächenspezifischer Bewirtschaftung) räumlich stark schwankt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Stickstoffbilanzsaldo zur vergleichenden Bewertung der Umweltwirkung der teilflächenspezifischen und einheitlichen Stickstoffdüngung herangezogen.

### **Stickstoffbilanz - Flächenbilanz**

Die N-Flächenbilanz besteht aus den flächenbezogenen Komponenten der N-Zufuhr und der N-Abfuhr. Zur N-Zufuhr zählen beispielsweise die mineralische und organische Stickstoffdüngung, der Eintrag aus der Atmosphäre oder die Stickstoffbindung durch Leguminosen. Die N-Abfuhr besteht aus der Abfuhr durch das Erntegut bzw. das Nebenerntegut. Da im Rahmen dieser Arbeit PF Techniken zur kleinräumigen mineralischen Stickstoffdüngung bewertet werden sollen, kann die N-Flächenbilanz auf die Komponenten N-Zufuhr durch mineralische Düngung und N-Abfuhr durch das Erntegut reduziert werden. Der Stickstoffbilanzsaldo wird somit nach folgender Gleichung kalkuliert:

$$\text{N-Saldo} = \text{N-Zufuhr (mineralische N-Düngung)} - \text{N-Abfuhr (Erntegut)}$$

Der Stickstoffentzug durch das Erntegut wird entweder durch die Stickstoffkonzentration im Korn bestimmt, oder mit Hilfe eines N-Verwertungsfaktors geschätzt. Stark positive Stickstoffbilanzsalden deuten auf zu hohe umweltbelastende Stickstoffgaben hin.

### **4.3 Material**

Grundlage dieser Arbeit sind Daten, die im Rahmen des IKB-Dürnast (Informationssystem kleinräumige Bestandesführung) im Zeitraum von 2002 bis 2004 gewonnen wurden. In den Jahren 2002, 2003 und 2004 wurden dazu auf den Schlägen Schafhof und D4 der Versuchsstation Dürnast Streifenversuche zum Vergleich verschiedener Stickstoffdüngesysteme angelegt. Am Standort Sieblerfeld wurden in den Jahren 2002 sowie 2004 kleinräumige Stickstoffsteigerungsversuche durchgeführt, um unter anderem Untersuchungen zu Produktionsfunktionen durchführen zu können.

#### **4.3.1 Witterung und Pflanzenentwicklung im Untersuchungszeitraum**

Die Klimadaten zur Interpretation des Pflanzenwachstums stammen von der Wetterstation Weihenstephan des Deutschen Wetterdienstes. Im langjährigen Mittel fallen dort 800 mm Niederschlag bei einer mittleren Jahresdurchschnittstemperatur von 7,5°C.

Für die Jahre 2002, 2003 und 2004 sind die Temperaturmittelwerte, die Niederschlagssummen, sowie die jeweiligen langjährigen Mittel in Abbildung 7 dargestellt.

#### **Versuchsjahr 2002**

Die Aussaat des Winterweizens erfolgte im Oktober. Aufgrund starker Niederschläge im März wurde ein Großteil des vorhandenen mineralischen Stickstoffs im Boden vertikal und horizontal verlagert. Im April führten geringe Niederschläge bei zugleich kalten Temperaturen zu geringen Mineralisationsprozessen, dies führte insgesamt zu einer schlechten Entwicklung der Weizenbestände. Die Pflanzen konnten den Entwicklungsrückstand aufgrund guter Vegetationsbedingungen im Mai wieder ausgleichen. Niedrige Niederschlagsmengen im Juni und extrem hohe Tagestemperaturen von bis zu 38°C führten zu einer vorzeitigen und beschleunigten Abreife der Weizenbestände (SCHÄCHTL, 2004, S. 47).

### **Versuchsjahr 2003**

Der zu nasse Herbst führte zu späteren Saatterminen beim Winterweizen und zog eine schwache Jugendentwicklung nach sich. Nach dem Winter entwickelten sich die Weizenbestände gut. Die Stickstoffversorgung aus Düngung und mineralisiertem Bodenstickstoff war meist gut. Extremer Wassermangel in der Kornfüllungsphase ab Mitte Juni verhinderte dann allerdings gute Erträge (siehe DOLESCHEL et al., 2003). Insgesamt sorgten im Jahr 2003 extreme Witterungsverhältnisse bei Winterweizen für niedrige Erträge.

### **Versuchsjahr 2004**

Die Aussaat des Winterweizens konnte unter optimalen Bedingungen durchgeführt werden. Der milde November begünstigte eine rasche Jugendentwicklung mit guter Wurzelausbildung. Das niederschlagsarme und kühle Frühjahr garantierte einen geringen Krankheitsdruck. Im Juni waren die Niederschläge durchschnittlich und der Weizenbestand war sehr gut mit Wasser versorgt. Während der Kornfüllungsphase herrschte eine gemäßigte Witterung ohne große Temperaturspitzen mit ausreichender Bodenfeuchtigkeit (siehe HARTL et al., 2004). Insgesamt wurden zur Ernte 2004 extrem hohe Kornerträge erzielt.

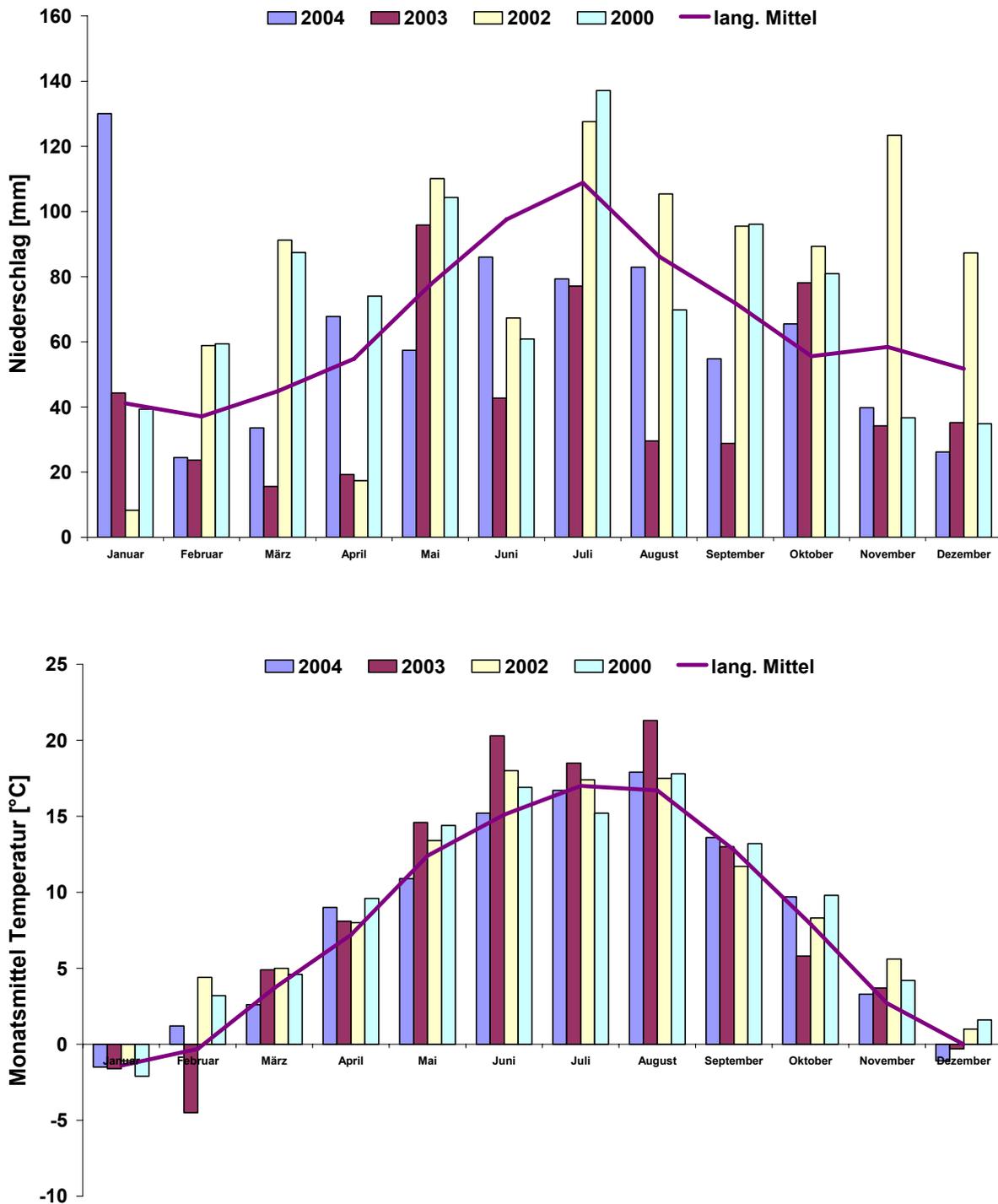


Abbildung 7: Monatliche Niederschlagssummen und Temperaturmittelwerte in den Jahren 2000, 2002, 2003, 2004 sowie das langjährige Mittel der Wetterstation Weihestephan.  
 Quelle: eigene Darstellung auf Basis der Daten des Deutschen Wetterdienstes

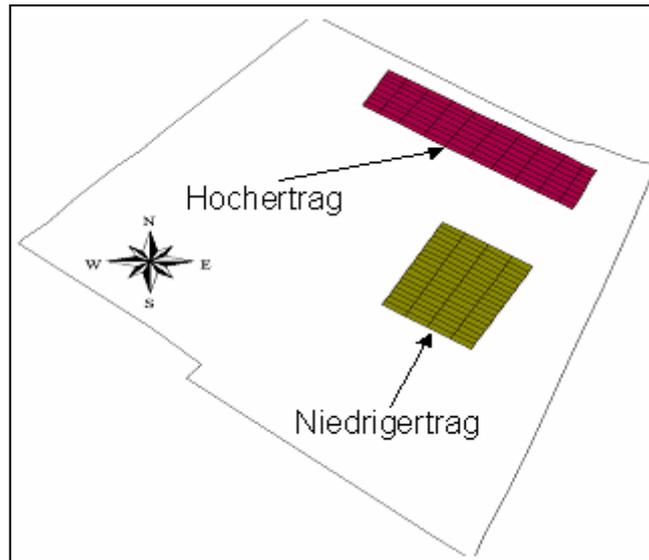
### **4.3.2 Datengrundlage zur Potenzialberechnung der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung**

#### **Standortbeschreibung Sieblerfeld**

Zur Ableitung ökonomischer und ökologischer Potenziale der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung anhand von Produktionsfunktionsanalysen (Schritt 1 und 2 der Bewertung, siehe Abbildung 2) dienen zwei teilflächenspezifische Stickstoffsteigerungsversuche. Die Versuche fanden am Standort Sieblerfeld der Versuchsstation Thalhausen bei Freising in den Jahren 2002 und 2004 statt. Der Schlag wurde aufgrund seiner Wasserspeicherkapazität in einen Hoch- und einen Niedrigertragsbereich unterteilt. Der Versuchsstandort liegt im tertiären Hügelland. Beim Bodentyp des Versuchsschlages handelt es sich um Braunerde. Die Bodenart ist im Hohertragsbereich ein sandiger Lehm mit einer nutzbaren Feldkapazität (nFK) von 160 [mm] und einem Kiesanteil von 9%. Im Niedrigertragsbereich handelt es sich um einen lehmigen Sand mit einer nFK von 100 [mm] und einem Kiesanteil von 26 % (siehe LIEBLER, 2003, S. 29 f.).

#### **Versuchsanlagen Sieblerfeld**

Im Jahr 2002 wurde am Standort Sieblerfeld in der Hoch- und Niedrigertragszone ein einfaktorieller Weizenparzellenversuch (Sorte Pegassos) mit 11 N-Stufen (0, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240 und 260 kg N /ha) vierfach wiederholt durchgeführt (vgl. Abbildung 8). Auch im Jahr 2004 wurde der Versuch mit derselben Sorte fortgesetzt, jedoch mit anderen N-Stufen (0, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 300 kg N/ha).



**Abbildung 8: Versuchsschlag Sieblerfeld**

Quelle: eigene Darstellung

### **4.3.3 Datengrundlage zur Berechnung des realisierbaren Potenzials der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung**

Zum direkten empirischen Vergleich und zur Überprüfung der modellierten Potenziale (Schritt 1 und 2 der Bewertung, siehe Abbildung 2) werden zwei Streifenversuche herangezogen, die in den Jahren 2002 - 2004 auf den Versuchsfeldern Schafhof und D4 (Versuchsstation Dürnast) angelegt wurden.

#### **Standortbeschreibung Schafhof**

Der Versuchsstandort Schafhof liegt im tertiären Hügelland nördlich von Freising in Oberbayern. Die Böden variieren zwischen Braunerden aus Lößlehm und pseudovergleyten Braunerden aus Lößlehm und Tertiärmaterial. Die Böden aus Lößlehm, die den Hohertragsbereichen zugeordnet werden, sind homogen aus schwach sandigen Lehm aufgebaut. Diese Böden sind kiesfrei und weisen keinen Schichtwechsel auf. In Tiefen ab 50 cm werden Pseudogleymerkmale beobachtet, die mit größerer Tiefe zunehmen. Diese Zunahme liegt zum einen am Haftwasseranteil der schluffbetonten Bodenart und zum anderen an Stauhorizonten aus Tertiärmaterial in Tiefen über 100 cm.

Die pseudovergleyten Braunerden aus Lößlehm und Tertiärmaterial sind heterogen aufgebaut. Im Profil wechseln sich sandige Lehme mit lehmigen Sanden und bindigen Schichten ab. Der Kiesanteil in diesen Böden variiert je nach Anteil an kiesig/sandigen Tertiärmaterial am Bodenprofilaufbau. Pseudogleymerkmale werden ab 30 cm Tiefe beobachtet. Diese Böden werden den Niedrigertragsbereichen zugeordnet.

#### **Standortbeschreibung D4**

Beim Standort D4 können zwei Bereiche mit verschiedenen Böden ausgewiesen werden. In Tallagen handelt es sich um kolluviale Braunerden, die durch Grundwassereinfluß vergleyt sind. Kolluviale Braunerden treten auch in auslaufenden Erosionsrinnen auf. In den Hanglagen finden sich Braunerden aus umgelagerten sandig-lehmigen Tertiärmaterial. Die Bodenart wird überwiegend mit sandiger Lehm beschrieben.

#### **Versuchsanlage am Schafhof im Jahr 2002**

Für den Streifenversuch im Jahr 2002 wurden drei Ertragszonen gebildet. Die Einteilung erfolgte anhand der mit der automatischen Ertragserfassung gewonnenen Winterweizenerträge der Jahre 1996 und 1998 sowie von Expertenwissen.

Der Versuchsaufbau (Abbildung 23) entspricht einem nicht vollständig<sup>3</sup> randomisierten Streifenversuch, in dem vier Düngesysteme zu Winterweizen (Sorte Pegassos) untersucht werden (siehe Tabelle 6).

Die Streifenbreite beträgt 7,5 m. Es wurden vier verschiedene Varianten zufällig in einen Block, bestehend aus zwei Fahrgassenbreiten à 15 m, gelegt. Im Hinblick auf die spätere Verwendung der (Parzellen-)Daten wurden die Streifen entlang der Fahrgasse in Parzellen mit einer fixen Länge von 20 m aufgeteilt und jeweils im Kerndruschverfahren mit einem Parzellenmähdrescher einzeln abgeerntet.

---

<sup>3</sup> die teilflächenspezifischen Varianten und die konventionellen Varianten liegen aufgrund einer nachträglichen Modifizierung des Versuches jeweils paarweise nebeneinander

**Tabelle 6: Untersuchte Düngevarianten am Schafhof 2002 zu Winterweizen**

Düngevarianten:	Stickstoff-Düngergaben in kg N/ha bei:							
	Summe	VB <sup>1</sup>	EC 32 <sup>2</sup>			EC 49 <sup>2</sup>		
			Niedrig EZ	Mittel EZ	Hoch EZ	Niedrig EZ	Mittel EZ	Hoch EZ
einheitlich	180	70		50			60	
einheitlich	192	70		50			72	
Mapping	180	70	40	50	60	50	60	70
Mapping- mit Online-Overlay	192	70	40	50	60		60-90 <sup>3</sup>	

<sup>1</sup>Vegetationsbeginn,<sup>2</sup>EC 32 und EC 49: Code für das Entwicklungsstadium nach TOTTMANN (1987)<sup>3</sup>N-Gabe nach Düngealgorithmus von LINSEISEN (2002, unveröffentlicht); siehe Tabelle 26, Anhang EZ: Ertragszone**Quelle:** eigene Zusammenstellung**Versuchsanlage am Schlag D4 im Jahr 2003**

Im Jahr 2003 wurde am Schlag D4 der WZW Versuchsstation Dürnast ein vollständig randomisierter Streifenversuch (im Gegensatz zum Versuch am Schafhof 2002) mit Großparzellen zu Winterweizen der Sorte Ludwig angelegt. Das Ziel des Versuches lag darin, ein teilflächenspezifisches Düngesystem mit einem einheitlichen Düngesystem ökonomisch zu vergleichen. Das teilflächenspezifische Düngesystem wurde erstmals ausschließlich auf die Zielvariable stickstoffkostenfreie Leistung hin optimiert. Die einheitliche Düngung erfolgte betriebsüblich. Die untersuchten Düngesysteme sind näher in Tabelle 7 beschrieben. Die Versuchsanlage zum Streifenversuch am D4 im Jahr 2003 ist in Abbildung 24 im Anhang dargestellt.

**Tabelle 7: Untersuchte Düngevarianten am D4 2003 zu Winterweizen**

Düngevarianten	Stickstoff-Düngergaben in kg N/ha			
	VB <sup>1</sup>	EC32 <sup>2</sup>	EC49 <sup>2</sup>	Gesamt (Durchschnitt)
einheitlich	70 <sup>3</sup>	40 <sup>3</sup>	40 <sup>3</sup>	150
Mapping- mit Online-Overlay	60-80 <sup>4</sup>	70-90 <sup>4</sup>	40-60 <sup>4</sup>	203
N-Steigerung	0-120	0-120	0-140	157

<sup>1</sup>Vegetationsbeginn,<sup>2</sup>EC 32, EC 49: Code für das Entwicklungsstadium nach TOTTMANN (1987)<sup>3</sup>basierend auf der Entscheidung des Betriebsleiters<sup>4</sup>basierend auf einer Entscheidungsregel zur Stickstoffdüngung nach WEIGERT et al. (2004)**Quelle:** eigene Zusammenstellung

## Versuchsanlage am Schafhof im Jahr 2004

Im Jahr 2004 wurde am Schafhof ein ähnlicher Versuch wie im Jahr 2002 (siehe oben) angelegt, jedoch mit dem Unterschied, dass der Schlag nicht mehr streifenweise mit einer Düngevariante bewirtschaftet wurde, sondern es wurde jede Parzelle zufällig einer Variante zugewiesen. Es handelte sich somit um eine vollständig randomisierte Versuchsanlage mit Großparzellen. Wie im Jahr 2003 wurde Winterweizen der Sorte Ludwig angebaut. Die vier untersuchten Düngesysteme sind in Tabelle 8 näher beschrieben. Die Versuchsanlage zu diesem Versuch ist in Abbildung 25 (Anhang) grafisch dargestellt.

**Tabelle 8: Untersuchte Düngesysteme am Schafhof 2004 zu Winterweizen**

Düngesystem	Stickstoff-Düngergaben in kg N/ha			
	VB <sup>1</sup>	EC32 <sup>2</sup>	EC49 <sup>2</sup>	Schlagdurchschnitt
Betriebsüblich	40	50	50	140
Mapping-Ansatz	20-60	30-70	30-70	140
Mapping- mit Online-Overlay	20-70	0-70	20-100	140
(N-Steigerung)	0-120	0-120	0-120	170

<sup>1</sup>Vegetationsbeginn,

<sup>2</sup>EC 32, EC 49: Code für das Entwicklungsstadium nach TOTTMANN (1987)

**Quelle:** eigene Zusammenstellung

### 4.3.4 Datengrundlage zur Risikoanalyse

Zur Durchführung von Risikoanalysen (Schritt 3 der Bewertung, siehe Abbildung 2) werden Datenreihen über längere Zeiträume benötigt. Da diese für Potenzialberechnungen (teilflächenspezifische Stickstoffsteigerungsversuche) nicht in der Form verfügbar sind, muss auf Modellkalkulationen ausgewichen werden. Für die Modellierung werden für Hoch- und Niedrigertragszonen Informationen über die Art der Verteilung der Erträge sowie über die zeitlich bedingte Varianz und die Erwartungswerte benötigt. Diese Parameter werden von Beprobungspunkten auf den Schlägen A15-21 der Versuchsstation Scheyern im Zeitraum von 1994-1999 abgeleitet.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Modellierung ökonomischer und umweltrelevanter Potenziale der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung

Wie in Kapitel 1 erläutert besteht die erste Stufe der ökonomisch-ökologischen Bewertung darin, auf Teilkostenbasis Potenziale einer ökonomisch optimierten teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung zu ermitteln und die Umweltwirkung anhand des Stickstoffbilanzsaldos abzuschätzen. In diesem Abschnitt erfolgt daher die erste Stufe der Bewertung der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung (analog zu Abbildung 2) auf der Basis von teilflächenspezifischen Stickstoffsteigerungsversuchen – es handelt sich hierbei also um das ökonomische bzw. umweltrelevante Potenzial der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung.

Um eine Verknüpfung von ökonomischen und ökologischen Bewertungsgrößen zu erreichen, wurde ein Modell erarbeitet (siehe Abbildung 9), das es ermöglicht, die vorhandenen Wechselbeziehungen darzustellen.

Die Stabilität der modellierten Potenziale (falls das ex post bestimmte ökonomische Optimum bei der Stickstoffdüngung ex ante nicht erreicht wird) wird anschließend mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen geprüft.

Die Potenziale der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung werden im Vergleich zu zwei einheitlichen Stickstoffdüngeszenarien (praktiziertes Niveau des Betriebsmitteleinsatzes) sowie für unterschiedliche Produktionsfunktionstypen dargestellt. Zur Schätzung der zur Modellierung notwendigen teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen werden zwei Stickstoffsteigerungsversuche, die in den Jahren 2002 und 2004 auf einem Schlag (Sieblerfeld) der WZW<sup>4</sup> Versuchsstation Thalhausen durchgeführt wurden, herangezogen.

---

<sup>4</sup> Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt

### 5.1.1 Modellbeschreibung

Das Bewertungsmodell (vgl. Abbildung 9) verknüpft ökonomische (stickstoffkostenfreie Leistung) mit ökologischen (N-Bilanzsaldo) Zielgrößen. Die stickstoffkostenfreie Leistung wird analog folgender Gleichung für jede Ertragszone getrennt berechnet und dann mit dem prozentualen Anteil der Ertragszone an der Gesamtfläche multipliziert:

$$NKL = \sum_{i=1}^n \omega_i [(p_w \cdot f(y_i) - p_N N_i)]$$

mit

$NKL$  = Stickstoffkostenfreie Leistung

$p_w$  = Winterweizenpreis (€/dt)

$i$  = Ertragszone

$f(y_i)$  = Produktionsfunktion der Teilfläche  $i$

$N_i$  = Stickstoffdüngermenge in der Teilfläche  $i$

$p_N$  = Stickstoffpreis (€ kg<sup>-1</sup>)

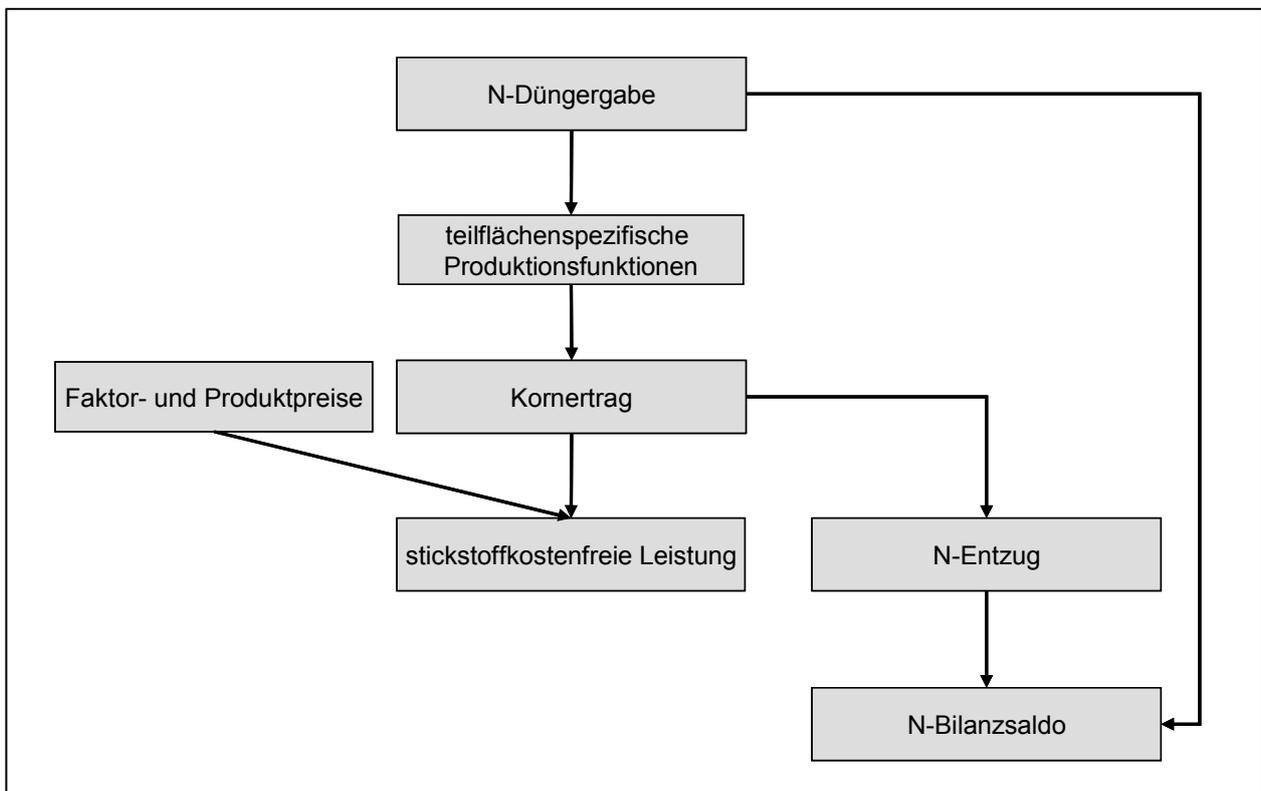
$\omega_i$  = % Anteil der Ertragszone an der Gesamtfläche.

Bei teilflächenspezifischer Düngung werden die  $N_i$  so gewählt, dass die stickstoffkostenfreie Leistung für den Gesamtschlag bei gegebenen Faktor- (Stickstoffdünger) und Produktpreis (Winterweizen) maximiert wird. Zur Berechnung der optimalen speziellen Intensitäten sei auf Kapitel 4.1.1.1 im Methodenteil verwiesen. Bei einheitlicher Düngung sind die  $N_i$  identisch und werden nach durchschnittlicher Ertragserwartung bemessen. Sind die Stickstoffmengen bei einheitlicher und teilflächenspezifischer Düngung bestimmt, so kann für diese unter Zuhilfenahme der teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen der jeweilige Kornertrag berechnet werden.

Aus dem Kornertrag, den jeweiligen Stickstoffdüngergaben und dem Faktor- und Produktpreis kann dann die stickstoffkostenfreie Leistung bei einheitlicher (betriebsüblicher) und teilflächenspezifisch optimierter Stickstoffdüngung abgeleitet werden (vgl. Abbildung 9).

In einem weiteren Schritt wird der Stickstoffbilanzsaldo aus der Differenz der mineralischen Stickstoffdüngung (N-Zufuhr) und dem Stickstoffentzug durch das Korn, für die einheitliche und sowie für die teilflächenspezifisch optimierte Stickstoffdüngung geschätzt (vgl. Abbildung 9).

Die beschriebenen Modellzusammenhänge sind in Abbildung 9 schematisch dargestellt. Mit Hilfe des Modells ist es im Folgenden möglich, die stickstoffkostenfreien Leistungen bei teilflächenspezifischer und einheitlicher Düngung zu vergleichen, sowie die jeweiligen Umweltwirkungen anhand des N-Bilanzsaldos zu bewerten.



**Abbildung 9: Modell zur Bewertung der teilflächenspezifischen und einheitlichen Stickstoffdüngung**

Quelle: eigene Darstellung

## 5.1.2 Produktionsfunktionsanalyse

Im Folgenden werden für drei in der aktuellen Diskussion befindlichen Produktionsfunktionstypen Regressionsmodelle geschätzt, und darauf aufbauend Aussagen über die teilflächenspezifisch optimalen Stickstoffdüngergaben abgeleitet. Für die einzelnen Regressionsmodelle werden jeweils verschiedene Gütekriterien berechnet und vergleichend diskutiert, sowie Residuenanalysen durchgeführt.

Die verschiedenen Produktionsfunktionstypen werden, wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben, zur Modellierung ökonomischer sowie ökologischer Potenziale der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung herangezogen.

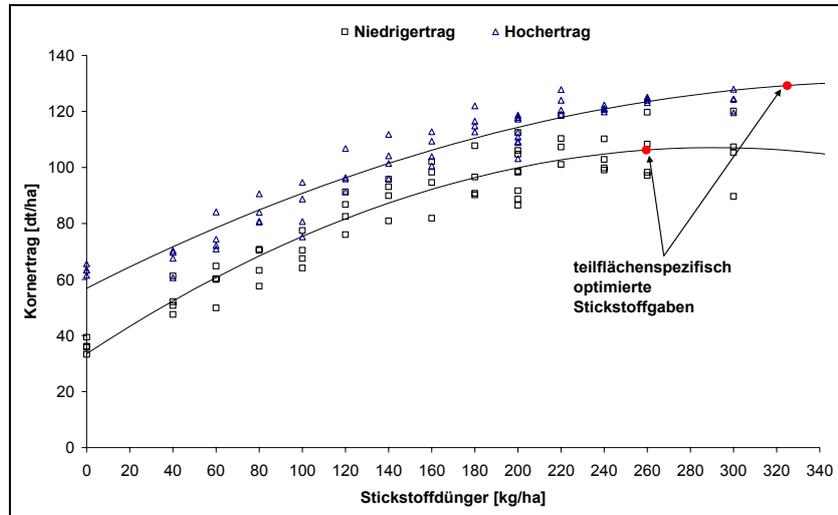
### 5.1.2.1 Quadratische Produktionsfunktion

Die Ergebnisse des Stickstoffsteigerungsversuchs in den Versuchsjahren 2002 und 2004 sowie die geschätzten Produktionsfunktionen <sup>5</sup> bei Vorgabe eines quadratischen Funktionsverlaufes (vgl. Kapitel 4.1.1.1) sind in Abbildung 10 grafisch dargestellt. Die rote Markierung zeigt jeweils die optimale spezielle Intensität der Stickstoffdüngung bei einem Stickstoffpreis von 0,60 €/kg und einem Winterweizenpreis von 11 €/dt. Die optimale spezielle Intensität bei Annahme einer quadratischen Produktionsfunktion wird, wie in Kapitel 4.1.1.1 erläutert ist, berechnet. Abbildung 10 illustriert, dass die optimalen speziellen Intensitäten im Hohertragsbereich (in beiden untersuchten Jahren) höher sind als in der Niedrigertragszone. Wie Abbildung 10 zudem zeigt, erfolgt die Kurvenanpassung eines quadratischen Regressionsmodells an die Versuchsdaten augenscheinlich in beiden Versuchsjahren und in beiden Ertragszonen sehr gut.

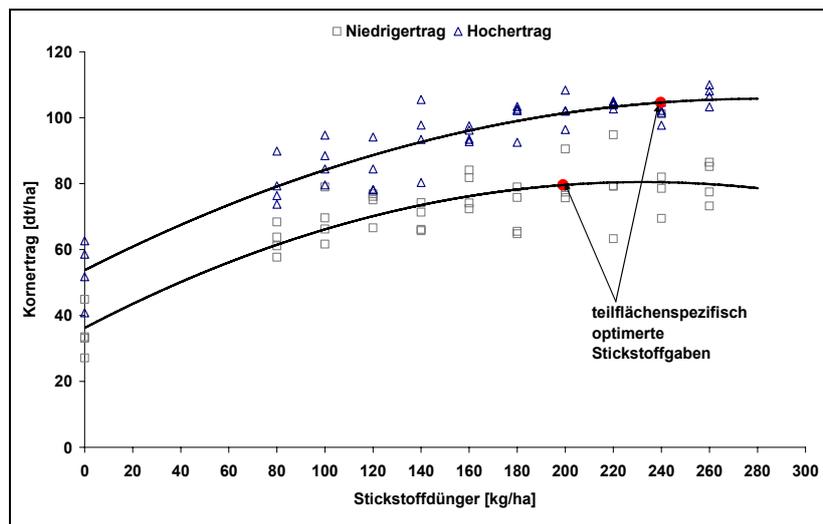
---

<sup>5</sup> Regressionsfunktionen werden mit der Methode der kleinsten Abstandsquadrate geschätzt (OLS)

Versuchsjahr 2004



Versuchsjahr 2002



**Abbildung 10: Teilflächenspezifische Produktionsfunktionen (Winterweizen) für das quadratische Regressionsmodell am Sieblerfeld in den Jahren 2002 und 2004.**

**Quelle:** eigene Darstellung

In Tabelle 9 sind die mit PRISM 3.03® geschätzten Koeffizienten der quadratischen Schätzfunktion aufgelistet. Der Parameter  $a$  entspricht dem Achsenabschnitt und zeigt den modellierten Kornertrag bei Nulldüngung. Dieser ist im Hohertrag in jedem der drei Versuchsjahre deutlich höher als im Niedrigertragsbereich. Die Parameter  $b$  und  $c$  dienen zur Berechnung der Steigung der Parabel. Hier zeigt sich, dass sich diese zwischen der Hoch- und Niedrigertragszone des Schlags im Versuchsjahr 2002 nur geringfügig voneinander unterscheiden. Nur im Versuchsjahr 2004 sind größere Unterschiede zumindest bezüglich des Parameters  $b$  zu beobachten.

Im Folgenden sind jeweils die Gleichungen der quadratischen teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen für die zwei Versuchsjahre (2004 und 2002) angegeben. Der Index *HE* bedeutet dabei Hohertrag, der Index *NE* Niedrigertrag.

$$y_{HE\_2004} = 56,88 + 0,3909N - 0,00052N^2$$

$$y_{NE\_2004} = 33,48 + 0,5601N - 0,00087N^2$$

$$y_{HE\_2002} = 53,75 + 0,37 N - 0,00066N^2$$

$$y_{NE\_2002} = 36,22 + 0,38 N - 0,00082N^2$$

mit:

*y*: Kornertrag in dt/ha

*N*: Stickstoffdünger in kg/ha

In Tabelle 9 sind für die geschätzten Parameter zusätzlich die 95% Konfidenzintervalle mit angegeben. In beiden Versuchsjahren überschneiden sich die 95% Konfidenzintervalle der beiden Ertragszonen zum Teil erheblich. Die großen Überschneidungen lassen dabei den Schluss zu, dass es sich bei den Ertragszonen noch um relativ heterogene Teilflächen handelt. Die gleiche Schlussfolgerung lässt sich aus der hohen Streuung der Erträge innerhalb einer Stickstoffstufe, wie in Abbildung 10 grafisch deutlich wird, ziehen. Die Bestimmtheitsmaße sind für beide Ertragszonen sehr hoch, wobei das Modell für den Hohertrag in beiden Versuchsjahren eine höhere Güte besitzt als das für den Niedrigertrag. Insgesamt bewegen sich die  $R^2$  zwischen 0,74 und 0,92.

**Tabelle 9: Parameter der quadratischen Regressionsgleichung Sieblerfeld**

Versuchsjahr 2004	Parameter der Regressionsgleichung	
	Hochertrag	Niedrigertrag
<i>a</i>	56.88	33.48
<i>b</i>	0.3909	0.5061
<i>c</i>	-0.00052	-0.00087
95% Konfidenzintervalle		
<i>a</i>	52.39 bis 61.38	27.68 bis 39.27
<i>b</i>	0.3256 bis 0.4561	0.42 bis 0.59
<i>c</i>	-0.00073 bis -0.00031	-0.0011 bis -0.00060
R <sup>2</sup>	0.92	0.90
Versuchsjahr 2002	Hochertrag	Niedrigertrag
<i>a</i>	53.75	36.22
<i>b</i>	0.37	0.38
<i>c</i>	-0.00066	-0.00082
95% Konfidenzintervalle		
<i>a</i>	48.02 bis 59.48	28.81 bis 43.63
<i>b</i>	0.28 bis 0.45	0.27 bis 0.49
<i>c</i>	-0.00095 bis -0.00036	-0.00120 bis -0.00044
R <sup>2</sup>	0.86	0.74

**Quelle:** eigene Darstellung

## Vertrauensintervalle für die teilflächenspezifischen optimalen speziellen Intensitäten ( $N_{opt}$ )

Das Vertrauensintervall (VI) für  $N_{opt}$  gibt an, in welchem Bereich sich die optimale Stickstoffdüngung bei einem bestimmten Verhältnis von Faktor- und Produktpreis bewegt. Für ex post Analysen, wie sie hier durchgeführt werden, ist es anzustreben, möglichst kurze Vertrauensintervalle zu erhalten. Zur Berechnung der Vertrauensintervalle für die optimale spezielle Intensität ( $N_{opt}$ ) bei quadratischen Produktionsfunktionen sei auf Bachmaier und Gandorfer (2004) verwiesen.

In Tabelle 10 sind für die Punktschätzung von  $N_{opt}$  jeweils die obere sowie untere Grenze des 90% Vertrauensintervalls, sowie in der letzten Spalte die daraus resultierende Länge des Vertrauensintervalls angegeben.

**Tabelle 10: 90 % Vertrauensintervalle (VI) für die optimale spezielle Intensität ( $N_{opt}$ ) am Sieblerfeld in den Jahren 2002 und 2004 (Winterweizen)**

	Punktschätzung für $N_{opt}$	untere Grenze des VI	obere Grenze des VI	Länge des VI
- kg N/ha -				
Sieblerfeld 2004				
Hohertrag	323	279	417	138
Niedrigertrag	260	235	301	66
Sieblerfeld 2002				
Hohertrag	239	209	305	96
Niedrigertrag	198	177	244	67

**Quelle:** eigene Berechnungen

Wie aus Tabelle 10 ersichtlich wird, ist das 90%-Vertrauensintervall für  $N_{opt}$  im Versuchsjahr 2002 im Niedrigertrag [177 kg N/ha; 244 kg N/ha] kürzer als das 90%-Vertrauensintervall für  $N_{opt}$  im Hohertrag [209 kg N/ha; 305 kg N/ha]. Das kürzere Vertrauensintervall im Niedrigertrag kann folgendermaßen erklärt werden: Da im Niedrigertrag im Gegensatz zum Hohertrag höhere N-Gaben zu keiner weiteren Ertragssteigerung führen, und ab 260 kg/ha bereits eine leichte Ertragsdepression zu beobachten ist, wird die Regressionsfunktion wieder zum Absinken gezwungen. Somit kann das Parabelmaximum eindeutig bestimmt werden. Daraus kann gefolgert werden, dass höhere N-Stufen im Hohertrag eine verkürzende Wirkung auf das Vertrauensintervall für  $N_{opt}$  ausüben und deshalb zu einer höheren Sicherheit bei der ex post Schätzung der optimalen speziellen Intensität führen würden. Die Länge der beiden 90%-Vertrauensintervalle macht deutlich, dass selbst bei einem derartig

hochaufgelösten Stickstoffsteigerungsversuch die ex post bestimmten optimalen speziellen Intensitäten nur sehr ungenau festgestellt werden können. Mit anderen Worten ausgedrückt bedeuten diese Ergebnisse, dass es auf diesem Standort mit einem Stickstoffsteigerungsversuch nicht möglich ist, im Nachhinein die ökonomisch optimale Stickstoffmenge auf ein Intervall von weniger als 67 kg N/ha Länge im Niedrigertrag bzw. 96 kg N/ha im Hohertrag einzugrenzen. Kürzere Vertrauensintervalle könnten durch Erhöhung der zu testenden N-Stufen und homogenere Bodenverhältnisse erreicht werden. Diese Aussagen treffen in gleicher Weise für die berechneten Vertrauensintervalle von  $N_{opt}$  für das Versuchsjahr 2004 zu.

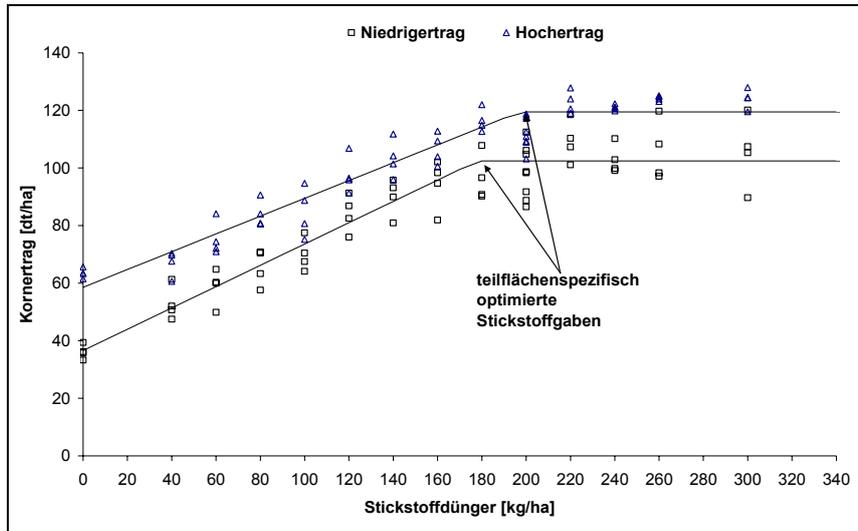
### 5.1.2.2 Linear limitationale Produktionsfunktionen

Die Ergebnisse des Stickstoffsteigerungsversuchs in den Versuchsjahren 2002 und 2004 sowie die geschätzten Produktionsfunktionen bei Vorgabe eines linear limitationalen Funktionsverlaufs sind in Abbildung 11 grafisch dargestellt.

Die Funktionen beginnen jeweils bei einem bestimmten Achsenabschnitt und steigen dann linear, d.h. immer mit derselben Steigung bis zu einem jeweiligen Maximalertrag an. Ist dieser erreicht, dann beginnt der limitationale Teil der Funktion. In diesem Bereich führen höhere Stickstoffgaben zu keinen höheren Kornerträgen. Im Knickpunkt der linear limitationalen Funktionen (vgl. Hinweis in Abbildung 11) ist jeweils die optimale spezielle Intensität ( $N_{opt}$ ) der Stickstoffdüngung basierend auf diesem Ertragsmodell erreicht. Wie auch bei den quadratischen Produktionsfunktionen sind die  $N_{opt}$ s in allen zwei Untersuchungsjahren im Hohertrag höher als im Niedrigertrag.

Insgesamt verdeutlicht Abbildung 11, dass auch mit diesem Ertragsmodell eine gute Kurvenanpassung an die Versuchsdaten möglich ist. Wobei die leichten Ertragsdepressionen bei sehr hohen Stickstoffgaben, wie sie im Niedrigertragsbereich in den Jahren 2004 und 2002 auftraten, mit diesem Regressionsmodell nicht abgebildet werden können.

Versuchsjahr 2004



Versuchsjahr 2002

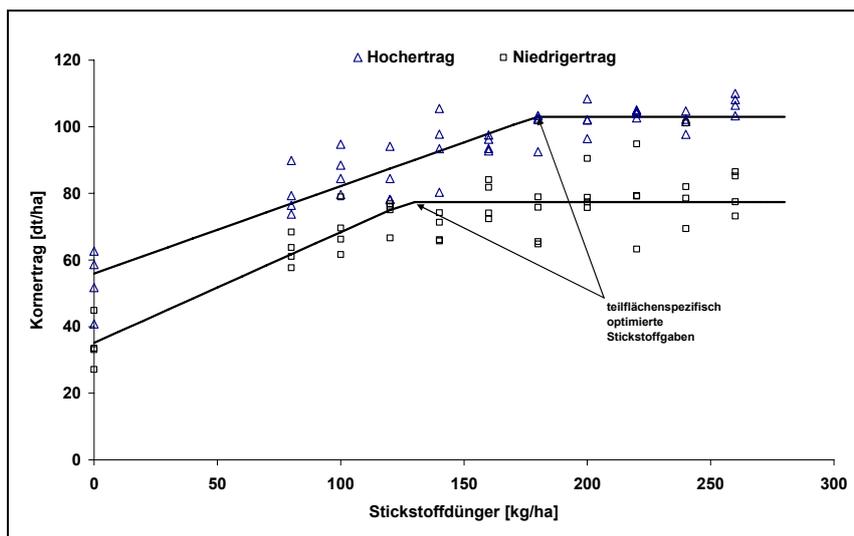


Abbildung 11: Teilflächenspezifische Produktionsfunktionen (Winterweizen) für das linear limitationale Regressionsmodell am Sieblerfeld in den Jahren 2002 und 2004.

Quelle: eigene Darstellung

**Parameter der Regressionsgleichungen deren 95% Konfidenzintervalle und Bestimmtheitsmaße**

In Tabelle 11 sind die geschätzten Koeffizienten der linear limitationalen Schätzfunktionen aufgelistet. Die Funktionen beginnen beim y-Achsenabschnitt der durch den Regressionsparameter  $a$  gekennzeichnet ist. Sie steigen dann mit der Steigung  $b$  (=Regressionsparameter  $b$ ) bis zu einem Maximalertrag, der ab einer

Stickstoffdüngung, die durch den Parameter  $N_0$  definiert ist, erreicht wird. Ab dieser Stickstoffgabe kann der Ertrag durch zusätzliche Stickstoffgaben nicht mehr gesteigert werden, es beginnt somit der limitationale Bereich des Ertragsmodells.

Wie beim quadratischen Regressionsmodell sind die  $a$  Parameter (Kornertrag bei Nulldüngung) für den Niedrigertragsbereich wesentlich niedriger als für den Hohertragsbereich.

In beiden Versuchsjahren überschneiden sich die 95% Konfidenzintervalle der geschätzten Parameter, der beiden Ertragszonen zum Teil erheblich, was den Schluss zulässt, dass es sich noch um relativ heterogene Ertragszonen handelt. Die Bestimmtheitsmaße unterscheiden sich kaum vom quadratischen Regressionsmodell und sind für beide Standorte sehr gut, wobei das Modell für den Hohertrag auch bei diesem Funktionstyp beiden Versuchsjahren eine höhere Güte besitzt als das für den Niedrigertrag.

Im Folgenden sind jeweils die Gleichungen der teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen für die zwei Versuchsjahre (2004 und 2002) angegeben. Der Index  $HE$  bedeutet dabei Hohertrag, der Index  $NE$  Niedrigertrag.

$$y_{HE\_2004} = \begin{cases} 58,5 + 0,31 N & \text{für } N < 197 \\ 58,5 + 0,31 * 197 & \text{für } N \geq 197 \end{cases}$$

$$y_{NE\_2004} = \begin{cases} 36,6 + 0,37 N & \text{für } N < 178 \\ 36,6 + 0,37 * 178 & \text{für } N \geq 178 \end{cases}$$

$$y_{HE\_2002} = \begin{cases} 55,9 + 0,26 N & \text{für } N < 179 \\ 55,9 + 0,26 * 179 & \text{für } N \geq 179 \end{cases}$$

$$y_{NE\_2002} = \begin{cases} 35,1 + 0,33 N & \text{für } N < 127 \\ 35,1 + 0,33 * 127 & \text{für } N \geq 127 \end{cases}$$

mit

$y$ : Kornertrag in dt/ha

$N$ : Stickstoffdünger in kg/ha

### **Konfidenzintervalle für $N_{opt}$**

Bei linear limitationalen Produktionsfunktionen befindet sich die optimale spezielle Intensität genau im Knickpunkt der Funktion und ist unabhängig von Faktor- und Produktpreisen. Da dieser Punkt durch den Regressionsparameter  $N_0$  beschrieben wird, und die Software PRISM® 95% Vertrauensintervalle für die geschätzten Regressionsparameter angibt, kann in diesem Fall das Vertrauensintervall für die optimale spezielle Intensität einfach bestimmt werden. Tabelle 11 ist zu entnehmen, dass im Fall der linear limitationalen Funktionen die 95% Vertrauensbereiche für die optimale spezielle Intensität eine Länge von ca. 40 kg N/ha im Jahr 2002 aufweisen. Im Jahr 2004 sind Sie mit einer Länge von ca. 30 kg N/ha etwas kürzer. Die Vertrauensintervalle für die optimale spezielle Intensität sind somit wesentlich kleiner (selbst bei einem höheren Konfidenzniveau), wenn als Funktionstyp der linear limitationale Verlauf gewählt wird und nicht die quadratische Funktionsform. Dies liegt im Wesentlichen darin begründet, dass die  $N_{opt}$ s beim linear limitationalen Modell wesentlich niedriger sind als beim quadratischen Modell. Sie liegen deshalb inmitten des untersuchten Bereichs der Stickstoffgaben und nicht an dessen rechtem Rand, wie dies bei den quadratischen Funktionen der Fall ist. Dies führt bei der Berechnung des Vertrauensbereiches zu einer größeren Sicherheit und schließlich zu einem kürzeren Konfidenzintervall. Somit führt die Annahme des linear limitationalen Modells dazu, dass der Bereich, indem sich die optimale spezielle Intensität bewegt enger eingegrenzt werden kann, als bei Annahme des quadratischen Modells.

Tabelle 11: Parameter der linear limitationalen Regressionsgleichung

Versuchsjahr 2004	Parameter der Regressionsgleichung	
	Hochertrag	Niedrigertrag
<i>N</i> <sub>0</sub>	197.1	178
<i>a</i>	58.5	36.6
<i>b</i>	0.31	0.37
95% Konfidenzintervalle		
<i>N</i> <sub>0</sub>	181.4 bis 212.8	160.7 bis 195.3
<i>a</i>	54.4 bis 62.7	31.0 bis 42.1
<i>b</i>	0.27 - 0.35	0.31 - 0.42
R <sup>2</sup>	0.92	0.89
Versuchsjahr 2002	Hochertrag	Niedrigertrag
<i>N</i> <sub>0</sub>	179.2	127.2
<i>a</i>	55.9	35.1
<i>b</i>	0.26	0.33
95% Konfidenzintervalle		
<i>N</i> <sub>0</sub>	158.1 bis 200.3	106.4 bis 148.1
<i>a</i>	50.3 bis 61.6	27.3 bis 43.0
<i>b</i>	0.21 bis 0.31	0.24 bis 0.42
R <sup>2</sup>	0.85	0.72

Quelle: eigene Berechnungen

### 5.1.2.3 Exponentielle Produktionsfunktionen

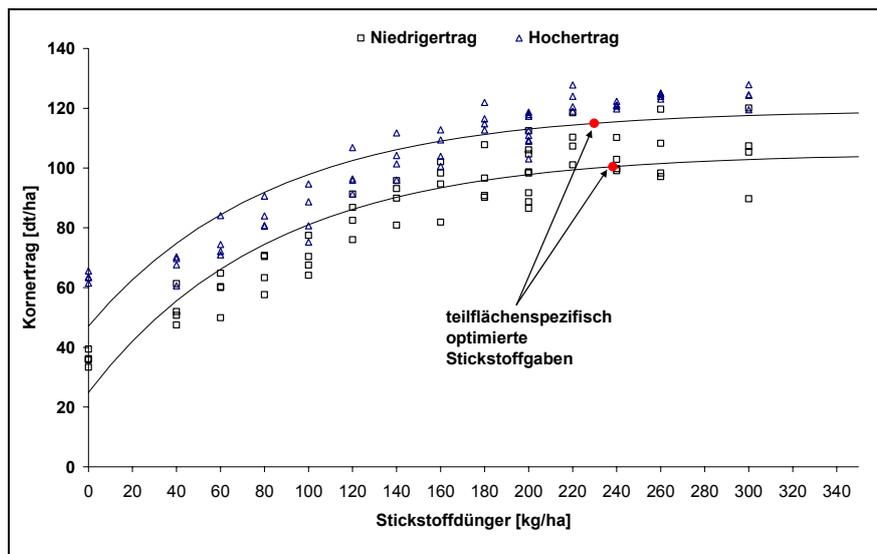
Neben den quadratischen und linear limitationalen Produktionsfunktionen werden im Folgenden noch vergleichend exponentielle Produktionsfunktionen untersucht. Dazu sind die Ergebnisse des Stickstoffsteigerungsversuchs in den Versuchsjahren 2002 und 2004 sowie die geschätzten Produktionsfunktionen bei Vorgabe eines exponentiellen Funktionsverlaufs in Abbildung 12 grafisch dargestellt.

Exponentielle Ertragsfunktionen sind im Wesentlichen dadurch zu charakterisieren, dass sie sich einem bestimmten Maximalertrag asymptotisch annähern. Dieser Maximalertrag ist durch den Regressionskoeffizienten  $a$  gekennzeichnet. Der y-Achsenabschnitt wird bei diesem Ertragsmodell nicht direkt als Regressionsparameter angegeben. Dieser kann jedoch einfach hergeleitet werden indem die Stickstoffdüngermenge  $N$  gleich Null gesetzt wird. Der y-Achsenabschnitt ist folglich die Summe der beiden Regressionsparameter  $a$  und  $b$  (vgl. Kapitel 4.1.1.1), wobei  $b$  ein negatives Vorzeichen besitzt.

Wie auch bei den vorangegangenen Abbildung 10 und Abbildung 11 sind auch in Abbildung 12 die teilflächenspezifischen optimalen speziellen Intensitäten für jedes der beiden Versuchsjahre und jede Ertragszone markiert. Im Vergleich zu den anderen Ertragsmodellen ist in diesem Zusammenhang auffällig, dass die teilflächenspezifischen  $N_{\text{opts}}$  wesentlich geringere Differenzen aufweisen als beim quadratischen und linear limitationalen Regressionsmodell. Zudem tritt hier im Versuchsjahr 2004 der Fall auf, dass  $N_{\text{opt}}$  im Niedrigertrag geringfügig höher ist als im Hohertrag.

Zusammenfassend verdeutlicht auch Abbildung 12, dass mit exponentiellen Ertragsmodellen eine gute Anpassung an die Versuchsdaten möglich ist; wobei die leichten Ertragsdepressionen bei sehr hohen Stickstoffgaben wie auch beim linear limitationalen Ertragsmodell, wie sie im Niedrigertragsbereich in den Jahren 2004 und 2002 auftreten, mit dem exponentiellen Regressionsmodell nicht abgebildet werden können.

Versuchsjahr 2004



Versuchsjahr 2002

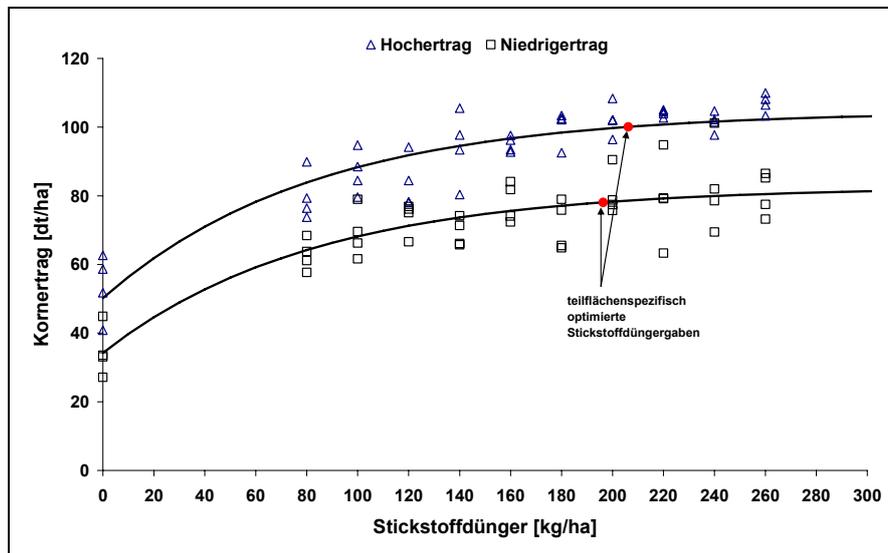


Abbildung 12: Teilflächenspezifische Produktionsfunktionen (Winterweizen) für das exponentielle Regressionsmodell am Sieblerfeld in den Jahren 2002 und 2004.

Quelle: eigene Darstellung

**Parameter der Regressionsgleichungen, deren 95% Konfidenzintervalle und Bestimmtheitsmaße**

In Tabelle 12 sind die geschätzten Koeffizienten der exponentiellen Regressionsanalyse aufgelistet.

Der Parameter  $a$  der Regressionsfunktion entspricht dem Ertragsmaximum an das sich die geschätzte Funktion bei steigenden Stickstoffdüngergaben asymptotisch

annähert. Tabelle 12 kann entnommen werden, dass der Parameter  $a$  in der Hohertragszone in beiden Versuchsjahren höher ist als in der Niedrigertragszone.

Im Folgenden sind jeweils die Gleichungen der teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen für die beiden Versuchsjahre (2004 und 2002) angegeben.

Der Index  $HE$  bedeutet dabei Hohertrag, der Index  $NE$  Niedrigertrag.

$$y_{HE\_2004} = 119,5 - 72,42 * R^N$$

$$y_{NE\_2004} = 105,0 - 80,15 * R^N$$

$$y_{HE\_2002} = 104,6 - 54,43 * R^N$$

$$y_{NE\_2002} = 82,6 - 48,36 * R^N$$

mit:

$y$ : Kornertrag in dt/ha

$R$ : 0,988 (siehe LARK und WHEELER 2003, S. 1101)

$N$ : Stickstoffdünger in kg/ha

In beiden Versuchsjahren überschneiden sich die 95% Konfidenzintervalle des Regressionsparameters  $b$  der Schätzfunktionen im Hoch- und Niedrigertrag zum Teil erheblich. Die Bestimmtheitsmaße unterscheiden sich kaum vom quadratischen und linear limitationalen Regressionsmodell und sind für beide Ertragszonen sehr gut, wobei das Modell für den Hohertrag im Versuchsjahr 2002 eine höhere Güte besitzt als das für den Niedrigertrag. Im Versuchsjahr 2004 hat dagegen das Regressionsmodell für den Niedrigertrag das bessere Bestimmtheitsmaß als das für den Hohertrag.

**Tabelle 12: Parameter der exponentiellen Regressionsgleichung Sieblerfeld, 2002 und 2004**

Versuchsjahr 2004	Parameter der Regressionsgleichung	
	Hochertrag	Niedrigertrag
<i>a</i>	119.5	105.0
<i>b</i>	-72.42	-80.15
95% Konfidenzintervalle		
<i>a</i>	116.3 bis 122.8	101.7 bis 108.4
<i>b</i>	-63.39 bis -81.44	-71.06 bis -89.25
R <sup>2</sup>	0.82	0.84
Versuchsjahr 2002	Hochertrag	Niedrigertrag
<i>a</i>	104.6	82.6
<i>b</i>	-54.43	-48.36
95% Konfidenzintervalle		
<i>a</i>	101.9 bis 107.3	79.5 bis 85.7
<i>b</i>	-46.8 bis -62.1	-39.6 bis -57.1
R <sup>2</sup>	0.83	0.75

**Quelle:** eigene Berechnungen

### 5.1.2.4 Residuenanalyse für die angewandten Regressionsmodelle

Die Analyse der Residuen für die drei untersuchten Ertragsmodelle erfolgt mit der Software Eviews. Die Residuen werden dabei auf die notwendigen Modellvoraussetzungen zur Schätzung von Regressionsfunktionen mit der Methode der kleinsten Abstandsquadrate hin untersucht (wie Autokorrelation, Heteroskedastizität, Normalverteilung und deren Erwartungswert). In Tabelle 13 sind die Ergebnisse der Residuenanalyse für die drei untersuchten Regressionsmodelle zusammengefasst.

**Tabelle 13: Residuenanalyse der untersuchten Regressionsmodelle zu Winterweizen am Versuchsstandort Sieblerfeld, 2002 und 2004.**

	Regressionsmodell					
	quadratisch		linear limitational		exponentiell	
	Hoch EZ <sup>4</sup>	Niedrig EZ <sup>4</sup>	Hoch EZ <sup>4</sup>	Niedrig EZ <sup>4</sup>	Hoch EZ <sup>4</sup>	Niedrig EZ <sup>4</sup>
<b>Versuchsjahr 2002</b>						
Durbin Watson Test <sup>1</sup>	2.2	2.4	2.1	2.4	1.9	2.4
White Heteroskedasticity Test <sup>2</sup>	0.06	0.29	0.06	0.34	0.03	0.25
Erwartungswert der Residuen	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jarque-Bera Test auf Normalverteilung <sup>3</sup>	0,12	0,80	0,32	1,83	1,81	2,20
<b>Versuchsjahr 2004</b>						
Durbin Watson Test <sup>1</sup>	1.5	2.3	1.7	2.4	0.7	1.6
White Heteroskedasticity Test <sup>2</sup>	0.22	0.06	0.09	0.05	0.00	0.52
Erwartungswert der Residuen	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jarque-Bera Test auf Normalverteilung <sup>3</sup>	0,27	0,89	0,15	0,06	0,91	1,51

<sup>1</sup>liegt der Wert des Durbin Watson Tests im Bereich von 2 dann sind die Residuen nicht autokorreliert

<sup>2</sup>p-wert<0.05 dann kann die Null-Hypothese: "Residuen sind heteroskedastisch" nicht abgelehnt werden

<sup>3</sup>p-Wert>0.05 dann kann die Null-Hypothese: "Residuen sind normalverteilt" nicht abgelehnt werden

<sup>4</sup>EZ = Ertragszone

**Quelle:** eigene Berechnungen

### **Untersuchung der Residuen auf Autokorrelation**

Die Prüfung der Residuen auf Autokorrelation erfolgt mit dem Durbin Watson Test. Liegt der Wert des Durbin Watson Tests im Bereich von 2, so unterliegen die Residuen keiner Autokorrelation. Aus Tabelle 13 wird ersichtlich, dass die Residuen der drei untersuchten Regressionsmodelle in keinem der beiden Versuchsjahre stark autokorreliert sind. Lediglich beim exponentiellen Regressionsmodell des Hohertrags im Jahr 2004 sind die Residuen negativ autokorreliert.

### **Untersuchung der Residuen auf Homoskedastizität**

Die Prüfung der Residuen auf Homoskedastizität erfolgt mit dem White Heteroskedasticity Test. Der Tabelle 13 kann entnommen werden, dass der p-Wert des Tests beim quadratischen Regressionsmodell wie auch beim linear limitationalen Modell in den beiden untersuchten Jahren nicht signifikant ist. Beim exponentiellen Ertragsmodell liefert der White Heteroskedasticity Test jedoch zweimal einen signifikanten Wert, und zwar jeweils im Hohertrag der Versuchsjahre 2002 sowie 2004 (wobei der p-Wert im Jahr 2004 sogar hoch signifikant ist).

### **Untersuchung der Residuen auf Normalverteilung**

Die Prüfung der Residuen auf Normalverteilung erfolgt mit dem Jarque-Bera Test. Tabelle 13 kann entnommen werden, dass für beide Jahre und jedes untersuchte Regressionsmodell die Nullhypothese: „Residuen sind normalverteilt“ nicht abgelehnt werden kann.

### **Untersuchung der Residuen auf deren Erwartungswert**

Der Erwartungswert der Residuen ist bei allen drei Regressionsmodellen 0 und entspricht damit den notwendigen Modellvoraussetzungen zur Schätzung von Produktionsfunktionen mittels der Methode der kleinsten Abstandsquadrate.

Da die Residuen beim exponentiellen Modell teilweise autokorreliert und heteroskedastisch sind, eignen sich aus ökonomischer Sicht das quadratische und das linear limitationale Modell besser als das exponentielle Ertragsmodell.

### 5.1.2.5 Vergleich der teilflächenspezifischen optimalen speziellen Intensitäten ( $N_{opt}$ ) bei verschiedenen Regressionsmodellen

Auf Basis der drei vorgestellten Regressionsmodelle können bei gegebenen Faktor- und Produktpreisen die aus ökonomischer Sicht teilflächenspezifisch optimalen Stickstoffdüngermengen ( $N_{opt}$ ) abgeleitet werden.

Die  $N_{opt}$ s sind in den vorangegangenen Abbildungen (Abbildung 10, Abbildung 11 und Abbildung 12) jeweils grafisch kenntlich gemacht, in Tabelle 14 sind sie zudem für die untersuchten Modelle aufgelistet.

**Tabelle 14: Teilflächenspezifische  $N_{opt}$ s der untersuchten Regressionsmodelle am Sieblerfeld im Jahr 2002 und 2004**

	Regressionsmodell		
	linear limitational	exponentiell	quadratisch
	- kg N/ha -		
Hochertrag (2002)	179	206	239
Niedrigertrag (2002)	127	196	198
Hochertrag (2004)	197	230	323*
Niedrigertrag (2004)	178	238	260

Angenommene Preise: Stickstoff 0,60 €/kg; Winterweizen 11 €/dt

\*die berechneten Optima liegen außerhalb des untersuchten Bereichs (extrapoliert)

**Quelle:** eigene Berechnungen

Grundsätzlich fällt auf, dass die  $N_{opt}$ s bei linear limitationalen Produktionsfunktionen im Vergleich zu den  $N_{opt}$ s bei exponentiellen und quadratischen Produktionsfunktionen sehr niedrig sind. Im Versuchsjahr 2002 wird beispielsweise  $N_{opt}$  im Niedrigertrag mit linear limitationaler Ertragsfunktion bereits bei 127 kg N/ha erreicht, bei quadratischer Ertragsfunktion dagegen erst bei 198 kg N/ha. Dieser Zusammenhang ist in gleicher Weise auch im Hochertrag bzw. im Versuchsjahr 2004 zu beobachten. Die Konsequenzen der unterschiedlichen  $N_{opt}$ s werden in der Diskussion (siehe Kapitel 6.1) ausführlich behandelt.

Die im nächsten Abschnitt folgenden Potenzialberechnungen beziehen sich auf die Punktschätzung von  $N_{opt}$  (siehe Tabelle 10), da diese innerhalb des Vertrauensintervalls am wahrscheinlichsten ist. Es muss jedoch bei der Diskussion

der Ergebnisse beachtet werden, dass diese mit größeren Unsicherheiten behaftet sind. Im Extremfall könnte bei sich überschneidenden Vertrauensintervallen von  $N_{opt}$  im Hoch- und Niedrigertragsbereich das  $N_{opt}$  im Hohertrag gleich dem  $N_{opt}$  des Niedrigertrags sein. Dies würde bedeuten, dass es aus ökonomischer Sicht nicht notwendig wäre die Stickstoffdüngung teilflächenspezifisch zu variieren, auch wenn sich die Erträge in den beiden Ertragszonen unterscheiden. Hier kann der Vorteil von Precision Farming Technologien nur darin bestehen, das Intensitätsniveau der Stickstoffdüngung insgesamt besser zu bestimmen.

Der andere Extremfall wäre, dass die beiden  $N_{opts}$  innerhalb des jeweiligen Vertrauensintervalls im Hoch- und Niedrigertrag so liegen, dass sich eine wesentlich größere Differenz ergibt, als dies bei der Punktschätzung für  $N_{opt}$  der Fall ist. Beispielsweise wäre es möglich, wenn auch mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit, dass das  $N_{opt}$  im Hohertrag am rechten Rand des Konfidenzintervalls liegt und das  $N_{opt}$  im Niedrigertragsbereich am linken Ende des Konfidenzintervalls des Niedrigertragsbereichs. Demzufolge wäre die Differenz dieser beiden  $N_{opts}$  wesentlich größer, als die Differenz der Punktschätzungen für die  $N_{opts}$ . Die größere Differenz der  $N_{opts}$  würde sich dann positiv auf die ökonomische Vorteilhaftigkeit einer teilflächenspezifisch optimierten Stickstoffdüngung ausüben, da dieses wesentlich durch die Standortheterogenität bestimmt wird, die sich im hier beschriebenen Sachverhalt durch die Differenz der teilflächenspezifischen  $N_{opts}$  ausdrückt.

Wird zur Beurteilung der Güte von ex post abgeleiteten optimalen speziellen Intensitäten nur das Bestimmtheitsmaß des Regressionsmodells betrachtet, so kann dies zu einer verzerrten Einschätzung führen, da wie diese Ergebnisse verdeutlichen ein hohes  $R^2$  nicht zwangsläufig ein kurzes Vertrauensintervall für die optimale spezielle Intensität nach sich zieht.

### **5.1.3 Ökonomische und umweltrelevante Auswirkungen der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung**

Im Folgenden werden mit Hilfe des beschriebenen Modells (siehe Abbildung 9) ökonomische und umweltrelevante Auswirkungen der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung durch einen Vergleich der stickstoffkostenfreien Leistung (€/ha) sowie des N-Bilanzsaldos bei variabler (ökonomisch optimierter) und betriebsüblicher, einheitlicher Düngung ermittelt.

Die Ermittlung der betriebsüblichen Düngergaben erfolgt nach Ertragserwartung. Die betriebsübliche Referenzdüngung von 200 kg N/ha entspricht einer Düngung nach Entzug bei einem angenommenen durchschnittlichen Ertragsziel von 80 dt/ha und einem N-Verwertungsfaktor von 2,5 kg N je dt/ha Kornertrag. Bei der 220 kg N/ha Referenzdüngung wurde ein Zuschlag von 10% auf die zuvor beschriebene einheitliche Referenzdüngermenge von 200 kg N/ha kalkuliert. Somit werden die folgenden Berechnungen für zwei einheitliche Referenzdüngermengen durchgeführt um deren Einfluss auf das Bewertungsergebnis abschätzen zu können.

Bei der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung wird davon ausgegangen, dass die beiden Ertragszonen des Modellschlags jeweils im ökonomischen Optimum gedüngt werden. Die Berechnung der optimalen speziellen Intensität wurde im Methodenteil für die drei zu untersuchenden Regressionsmodelle dargestellt. In Tabelle 14 sind dazu die optimalen speziellen Intensitäten für die beiden Ertragszonen des Modellschlags sowie für die drei zu untersuchenden Regressionsmodelle und Versuchsjahre aufgelistet.

Die Berechnung der stickstoffkostenfreien Leistung erfolgt wie im Kapitel 5.1.1 (Modellbeschreibung) dargestellt unter der Annahme, dass der Hoch- und Niedrigertrag jeweils einen Anteil von 50% an der Gesamtfläche besitzen. Die Berechnung der Stickstoffbilanzsalden erfolgt auf Basis der Kornerträge sowie der Stickstoffdüngergaben. Der Stickstoffbilanzsaldo ergibt sich als Differenz aus der Höhe der Stickstoffdüngergabe und dem Stickstoffentzug durch das Korn. Der Stickstoffentzug durch das Korn wird durch die Multiplikation des Kornertrags mit

dem Faktor 2,2 (eigene Annahme) abgeschätzt. Der Faktor 2,2 bedeutet in diesem Zusammenhang, dass mit jeder dt/ha Kornertrag 2,2 kg N/ha entzogen werden. Die zur Berechnung notwendigen Kornerträge für die verschiedenen Szenarien können Tabelle 27 und Tabelle 28 im Anhang entnommen werden.

### 5.1.3.1 Ökonomische Potenziale der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung

In Tabelle 15 sind die modellierten stickstoffkostenfreien Leistungen (NKL) bei einheitlicher N-Düngung von 200 bzw. 220 kg N/ha für die beiden Versuchsjahre aufgeführt. Die Modellierung wird für drei unterschiedliche Regressionsmodelle zur Schätzung der teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen durchgeführt. Es wird deutlich, dass sich die stickstoffkostenfreien Leistungen bei einheitlicher Düngung von 200 bzw. 220 kg N/ha nur geringfügig unterscheiden. Die NKL in den einzelnen Jahren unterscheiden sich dagegen aufgrund der unterschiedlichen klimatischen Verhältnisse stärker.

**Tabelle 15: Stickstoffkostenfreie Leistung (NKL) bei einheitlicher N-Düngung (Sieblerfeld)**

einheitliche Düngung	Jahr	exponentiell	Regressionsmodell	
			quadratisch	linear limitational
- NKL in €/ha -				
200 kg N/ha	2002	859	876	867
	2004	1039	1059	1102
220 kg N/ha	2002	858	878	855
	2004	1044	1081	1090

**Quelle:** eigene Berechnungen

Im Vergleich zu Tabelle 15 ist in Tabelle 16 die stickstoffkostenfreie Leistung bei teilflächenspezifischer Stickstoffdüngung aufgeführt. Bei der Berechnung der stickstoffkostenfreien Leistung wird in diesem Fall davon ausgegangen, dass die Hoch- und Niedrigertragszone genau mit der aus ökonomischer Sicht optimalen Stickstoffmenge (optimale spezielle Intensität) gedüngt werden. Auch hier zeigt die NKL deutliche Unterschiede in den einzelnen Jahren wie auch für die untersuchten Regressionsmodelle.

**Tabelle 16: Stickstoffkostenfreie Leistung (NKL) bei teilflächenspezifisch optimierter N-Düngung (Sieblerfeld)**

Jahr	exponentiell	Regressionsmodell	
		quadratisch	linear limitational
- NKL in €/ha -			
2002	860	882	895
2004	1044	1120	1109

**Quelle:** eigene Berechnungen

Tabelle 17 kann die Differenz zwischen der stickstoffkostenfreien Leistung bei teilflächenspezifisch optimierter Düngung (vgl. Tabelle 16) und der stickstoffkostenfreien Leistung bei einheitlicher Düngung (vgl. Tabelle 15) entnommen werden. Es handelt sich somit um die Änderung ( $\Delta$ ) der NKL durch eine teilflächenspezifisch optimierten Stickstoffdüngung bezogen auf eine einheitliche Düngung von 200 bzw. 220 kg N/ha bei Annahme unterschiedlicher Regressionsmodelle für die teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen.

**Tabelle 17: Änderung ( $\Delta$ ) der stickstoffkostenfreien Leistung in €/ha durch teilflächenspezifisch optimierte Düngung im Vergleich zur einheitlichen Düngung (Sieblerfeld)**

einheitliche Düngung	Jahr	exponentiell	Regressionsmodell	
			quadratisch	linear limitational
- $\Delta$ NKL in €/ha -				
200 kg N/ha	2002	1	7	28
	2004	5	62	8
220 kg N/ha	2002	2	4	40
	2004	0	40	20

**Quelle:** eigene Berechnungen

Die Ergebnisse aus Tabelle 17 verdeutlichen, dass bei Annahme des exponentiellen Regressionsmodells für die teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen nahezu keine höhere stickstoffkostenfreie Leistung im Vergleich zu einer einheitlichen Düngung erzielt werden kann. Dies liegt darin begründet, dass sich die mit diesem Regressionsmodell geschätzten teilflächenspezifischen optimalen speziellen Intensitäten kaum unterscheiden und zum anderen vom absoluten Niveau betrachtet im selben Bereich liegen, wie die Stickstoffgaben bei einheitlicher Düngung.

Bei Annahme der quadratischen teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen bewegt sich das Potenzial zur Steigerung der NKL durch eine teilflächenspezifisch optimierte N-Düngung im Vergleich zu einer einheitlichen Düngung von 200 kg N/ha

im Bereich von 7 bis 62 €/ha (in Abhängigkeit vom Jahr) und im Vergleich zur einheitlichen Düngung von 220 kg N/ha im Bereich von 4 bis 40 €/ha. Die vergleichsweise hohen Vorteile der teilflächenspezifisch optimierten N-Düngung im Jahr 2004 beruhen im Wesentlichen darauf, dass in diesem Jahr das Ertragsniveau insgesamt sehr hoch war. Wäre es möglich gewesen, durch Precision Farming Technologien dieses hohe Ertragsniveau zu erkennen und darauf entsprechend zu reagieren, so hätte dies auch zu höheren Naturalerträgen geführt als mit einheitlicher Düngung von 200 oder 220 kg N/ha (vgl. Tabelle 27 und Tabelle 28, Anhang) und letztlich zu den hier dargestellten ökonomischen Vorteilen.

Die Steigerung der NKL bei Annahme der linear limitationalen Produktionsfunktionen durch teilflächenspezifische N-Düngung, bewegt sich in etwa derselben Größenordnung, wie bei Annahme der quadratischen Produktionsfunktionen (vgl. Tabelle 17). Im Vergleich zur einheitlichen Düngung von 200 kg N/ha ergeben sich Potenziale zur Steigerung der NKL im Bereich von 8 bis 28 €/ha und im Vergleich zur einheitlichen Düngung von 220 kg N/ha von 20 bis 40 €/ha, jeweils in Abhängigkeit vom betrachteten Jahr. Die Vorteile der teilflächenspezifischen N-Düngung können dadurch erklärt werden, dass die geschätzten teilflächenspezifischen optimalen speziellen Intensitäten bei Annahme dieses Regressionsmodells wesentlich niedriger sind als die beiden einheitlichen Referenzdüngermengen. Somit entsteht der Vorteil hier durch die niedrigeren Stickstoffdüngerkosten bei teilflächenspezifischer Düngung.

Grundsätzlich zeigen die hier dargestellten Ergebnisse, dass die modellierten ökonomischen Potenziale einer teilflächenspezifischen optimierten N-Düngung begrenzt sind. Die Ergebnisse verdeutlichen weiterhin, dass diese zum einen von Jahr zu Jahr schwanken und zum anderen wesentlich von der einheitlichen Referenzdüngung sowie von der Annahme bezüglich der teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen determiniert werden.

### 5.1.3.2 Umweltrelevante Auswirkungen der teilflächenspezifischen und einheitlichen Stickstoffdüngung

Die in den folgenden Tabellen beschriebenen N-Bilanzsalden sind nicht wie die stickstoffkostenfreien Leistungen für den Gesamtschlag angeben, sondern für die Hoch- und Niedrigertragszone getrennt dargestellt. Dies erlaubt eine differenzierte Betrachtung der Reaktion der N-Bilanzsalden auf unterschiedliche Stickstoffdüngestrategien.

Tabelle 18 enthält die N-Bilanzsalden bei einheitlicher Stickstoffdüngung von 200 bzw. 220 kg N/ha für die Hoch- und Niedrigertragszone am Versuchsschlag Sieblerfeld. Analog zur Modellierung der stickstoffkostenfreien Leistung werden auch bei der Kalkulation der N-Bilanzsalden unterschiedliche Annahmen bezüglich der Regressionsmodelle für die teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen betrachtet. Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse aus Tabelle 18, dass sich die N-Bilanzsalden im Hohertrag bei einheitlicher Düngung im negativen Bereich bewegen.

**Tabelle 18: Modellierte N-Bilanzsalden bei einheitlicher N-Düngung für die Hoch- und Niedrigertragszone am Sieblerfeld**

einheitliche Düngung	Ertragszone	Jahr	Regressionsmodell		
			exponentiell	quadratisch	linear limitational
- N-Bilanzsaldo in kg N/ha -					
200 kg N/ha	Hohertrag	2002	-19	-23	-25
		2004	-49	-52	-63
	Niedrigertrag	2002	28	25	31
		2004	-15	-20	-26
220 kg N/ha	Hohertrag	2002	-2	-7	-5
		2004	-32	-39	-43
	Niedrigertrag	2002	46	43	51
		2004	1	-6	-6

**Quelle:** eigene Berechnungen

Im Niedrigertrag befinden sich im Jahr 2002 die N-Bilanzsalden dagegen im positiven Bereich, im Jahr 2004 überwiegend im negativen Bereich. Die negativen N-Salden bei einheitlicher Düngung (Niedrigertrag) im Jahr 2004 sind dadurch zu erklären, dass aufgrund des sehr hohen Ertragsniveaus im Jahr 2004 der N-Entzug der Pflanzen über den mit der Düngung eingesetzten Stickstoffmengen blieb.

Die N-Bilanzsalden bei teilflächenspezifisch optimierter Stickstoffdüngung sind für die Hoch- und Niedrigertragszone des Modellschlags in Tabelle 19 zusammengefasst. Es wird deutlich, dass sich bei teilflächenspezifisch ökonomisch optimierten Stickstoffdüngergaben, bei Annahme des exponentiellen und quadratischen Regressionsmodells für die teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen, weitgehend höhere N-Bilanzsalden im Hohertragsbereich im Vergleich zur einheitlichen Düngung ergeben. Absolut betrachtet befinden sich die N-Bilanzsalden bei teilflächenspezifischer Düngung (exponentielle Produktionsfunktionen) immer noch im negativen Bereich. Sie sind somit aus Umweltgesichtspunkten als nicht problematisch zu bewerten. Bei Annahme des linear limitationalen Modells sind die N-Bilanzsalden aufgrund der niedrig geschätzten teilflächenspezifisch optimierten N-Gaben auch im Hohertrag niedriger als bei einheitlicher Düngung.

**Tabelle 19: Modellierete N-Bilanzsalden bei teilflächenspezifisch optimierter N-Düngung für die Hoch- und Niedrigertragszone am Sieblerfeld**

Ertragszone	Jahr	Regressionsmodell		
		exponentiell	quadratisch	linear limitational
- N-Bilanzsaldo in kg N/ha -				
Hohertrag	2002	-14	9	-46
	2004	-24	39	-66
Niedrigertrag	2002	24	23	-42
	2004	18	26	-48

**Quelle:** eigene Berechnungen

Im Niedrigertragsbereich zeigt sich ein anderes Bild, hier gelingt es mit der teilflächenspezifisch optimierten Düngung im Vergleich zur einheitlichen Düngung von 220 kg N/ha tendenziell die N-Bilanzüberschüsse im Versuchsjahr 2002 merklich zu reduzieren. Im Vergleich zu einer verhaltenen einheitlichen N-Düngung von 200 kg N/ha sind kaum Unterschiede zur teilflächenspezifisch optimierten N-Düngung im Niedrigertragsbereich festzustellen.

Das Versuchsjahr 2004 stellt wie bereits erläutert aufgrund des sehr hohen Ertragsniveaus eine Ausnahme dar. Wäre es durch Precision Farming gelungen, das hohe Ertragsniveau früher als bei konventioneller Bewirtschaftung zu erkennen, so hätte dies auch zu höheren teilflächenspezifischen Stickstoffdüngergaben geführt als für die beiden einheitlichen Referenzdüngermengen angenommen wurde. Dies führt dann folglich zu höheren N-Bilanzsalden im Niedrigertragsbereich als bei einheitlicher Düngung, wobei diese sich immer noch mit 18 kg N/ha (exponentielles

Modell, Versuchsjahr 2004) bzw. 26 kg N/ha (quadratisches Modell, 2004) auf einem insgesamt niedrigen Niveau befinden (vgl. Tabelle 19).

Die Modellergebnisse bei Annahme des linear limitationalen Modells zeigen auch hier aufgrund der niedrigen teilflächenspezifischen optimalen speziellen Intensitäten ein anderes Bild. So ist bei teilflächenspezifisch optimierter N-Düngung selbst im Versuchsjahr 2004 im Niedrigertragsbereich der N-Bilanzsaldo mit -48 kg N/ha (vgl. Tabelle 19) geringer als bei einheitlicher Düngung von 200 kg N/ha, bei der ein N-Bilanzsaldo von -26 kg N/ha (vgl. Tabelle 18) auftrat.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass durch eine teilflächenspezifisch ökonomisch optimierte Stickstoffdüngung besonders in auswaschungsgefährdeten Niedrigertragszonen N-Bilanzüberschüsse im Vergleich zu einer konventionellen Bewirtschaftung reduziert werden können. Dieser Entlastungseffekt ist jedoch noch stärker, als die bereits beschriebenen ökonomischen Auswirkungen, von der einheitlichen Referenzdüngermenge abhängig. Je höher diese ist, desto größer ist der umweltentlastende Effekt einer teilflächenspezifisch optimierten N-Düngung.

#### **5.1.4 Sensitivitätsprüfung der ermittelten Potenziale**

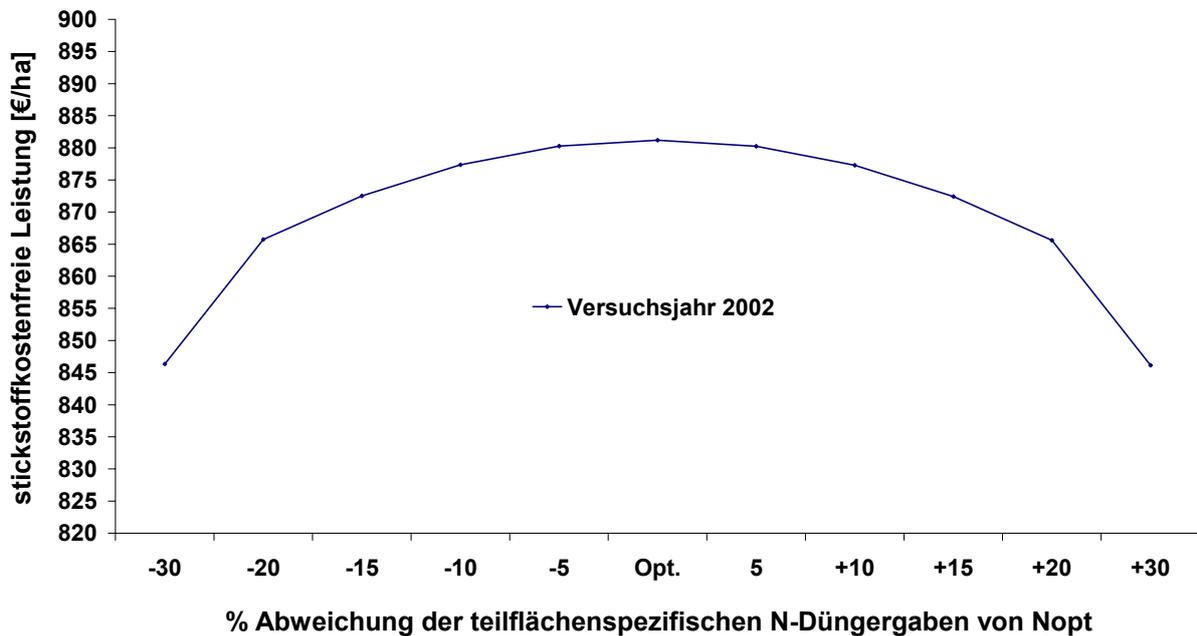
Im letzten Abschnitt wurde bei der Berechnung der Potenziale bei teilflächenspezifischer Stickstoffdüngung davon ausgegangen, dass das ex post bestimmte teilflächenspezifische Optimum der Stickstoffdüngung ex ante mit Hilfe kleinräumiger Informationen exakt erreicht werden kann.

Um zu überprüfen, welche Folgen sich ergeben, falls die optimale spezielle Intensität bei teilflächenspezifischer Stickstoffdüngung nicht erreicht wird, wird im Folgenden eine Sensitivitätsprüfung durchgeführt.

#### **Sensitivitätsprüfung der ökonomischen Potenziale**

Die Sensitivitätsprüfung der ökonomischen Potenziale zeigt beim quadratischen Regressionsmodell, dass die Funktion der prozentualen Abweichung der stickstoffkostenfreien Leistung links und rechts vom Optimum einen gleichmäßigen Verlauf zeigt (siehe Abbildung 13). Dies rührt daher, dass das ökonomische Optimum bei den vorherrschenden Faktor- und Produktpreisen in der Nähe des Ertragsmaximums (Scheitel der Parabel) liegt. Entfernt man sich jetzt entweder nach links oder nach rechts um eine bestimmte Stickstoffmenge von  $N_{opt}$ , so führt dies unter der Annahme des quadratischen Modells zu annähernd denselben Kornertragseinbußen.

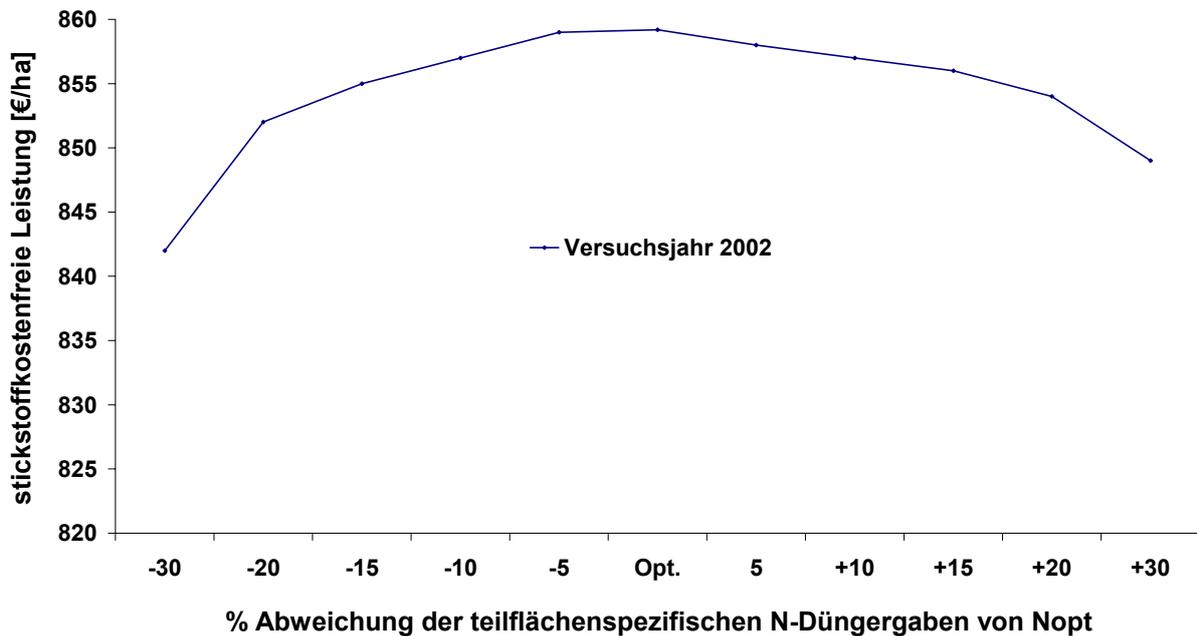
Abbildung 13 zeigt exemplarisch für das Versuchsjahr 2002 zum einen, dass bei geringerer Abweichung der Stickstoffdüngung vom ökonomischen Optimum nur geringfügige Einbußen in Bezug auf die stickstoffkostenfreie Leistung hingenommen werden müssen. Zum anderen wird aber auch deutlich, dass die ohnehin nur geringen ökonomischen Vorteile bei teilflächenspezifischer Düngung auf dem Versuchsstandort nicht realisiert werden können, wenn die ex post bestimmten teilflächenspezifischen Optima nicht genau ex ante ermittelt werden können.



**Abbildung 13: Sensitivitätsanalyse ökonomischer Potenziale der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung, Sieblerfeld 2002, quadratisches Regressionsmodell**  
Quelle: eigene Darstellung

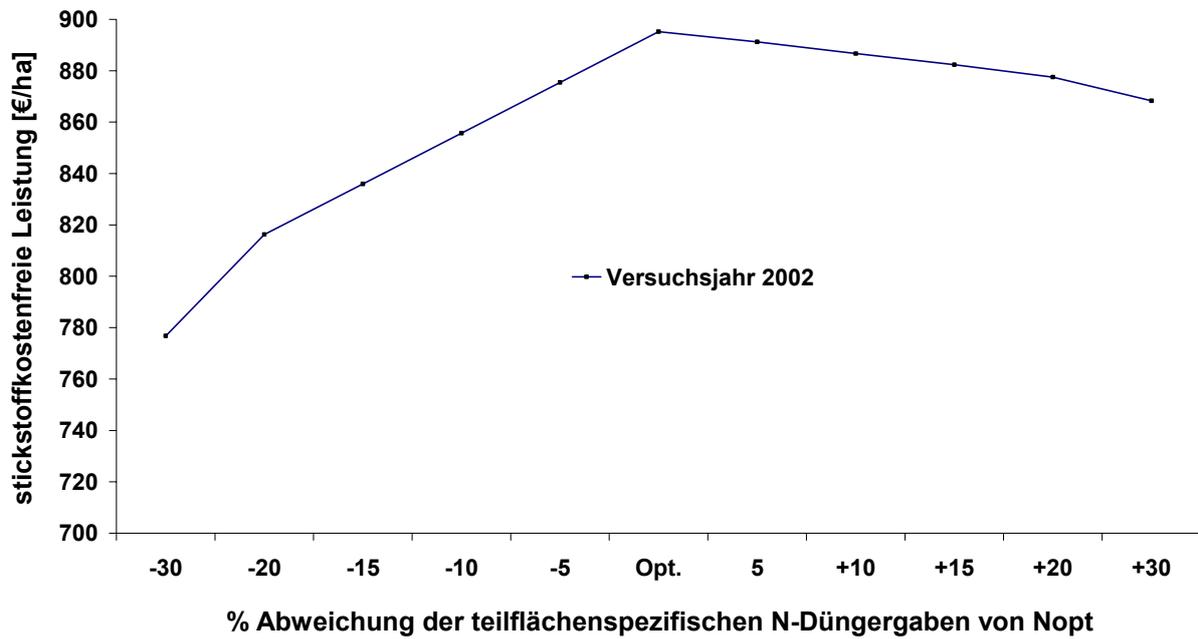
Beim exponentiellen Regressionsmodell (siehe Abbildung 14) zeigt sich ein ähnliches Bild wie beim quadratischen, jedoch mit dem Unterschied, dass der Verlauf der Funktion der stickstoffkostenfreien Leistung links und rechts vom Optimum weniger gleichmäßig verläuft als beim quadratischen Regressionsmodell.

Dies kommt dadurch zustande, dass beim exponentiellen Ertragsmodell bei einer Überdüngung immer noch minimale Ertragssteigerungen berechnet werden, da sich die teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen einem Maximalertrag asymptotisch annähern. Folglich führt eine Überdüngung nur zu höheren Stickstoffdüngerkosten und nicht zu zusätzlich niedrigeren Kornerträgen, wie dies bei quadratischen Produktionsfunktionen modelliert wird. Wird links vom Optimum gedüngt, so schmälern geringere Naturalerträge die stickstoffkostenfreie Leistung bei Annahme des exponentiellen Modells für die teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen.



**Abbildung 14: Sensitivitätsanalyse ökonomischer Potenziale der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung, Sieblerfeld 2002, exponentielles Regressionsmodell**  
Quelle: eigene Darstellung

Im Gegensatz zu den Sensitivitätsanalysen beim exponentiellen bzw. quadratischen Ertragsmodell, zeigt sich bei den Sensitivitätsanalysen für das linear limitationale Ertragsmodell ein völlig anderes Bild. Zum einen wird deutlich, dass bei einer Düngung links vom ökonomischen Optimum die stickstoffkostenfreie Leistung viel stärker abfällt als bei den beiden anderen Regressionsmodellen. Zum anderen ist auch rechts vom Optimum in abgeschwächter Form im Vergleich zu einer Unterdüngung ein stärkerer Rückgang der stickstoffkostenfreien Leistung zu verzeichnen. Das starke Abfallen der stickstoffkostenfreien Leistung kann dadurch erklärt werden, dass bei linear limitationalen Produktionsfunktionen bereits bei kleineren (negativen) Abweichungen vom Optimum Einbußen bezüglich des Kornertrags hingenommen werden müssen, die den Erlös schmälern. Bei einer Düngung über dem Optimum wird kein zusätzlicher Kornertrag erzielt und somit „nur“ der zusätzlich eingesetzte Stickstoff verschwendet, was sich aber auf die Höhe der stickstoffkostenfreien Leistung nicht in dem Maße auswirkt wie Verluste beim Kornertrag.



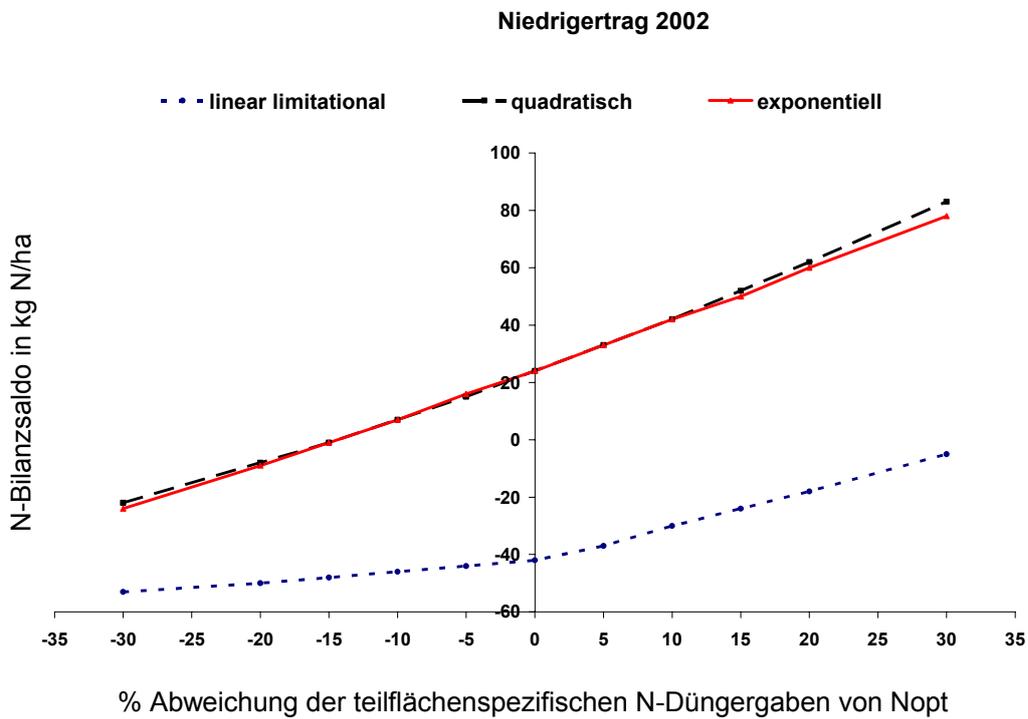
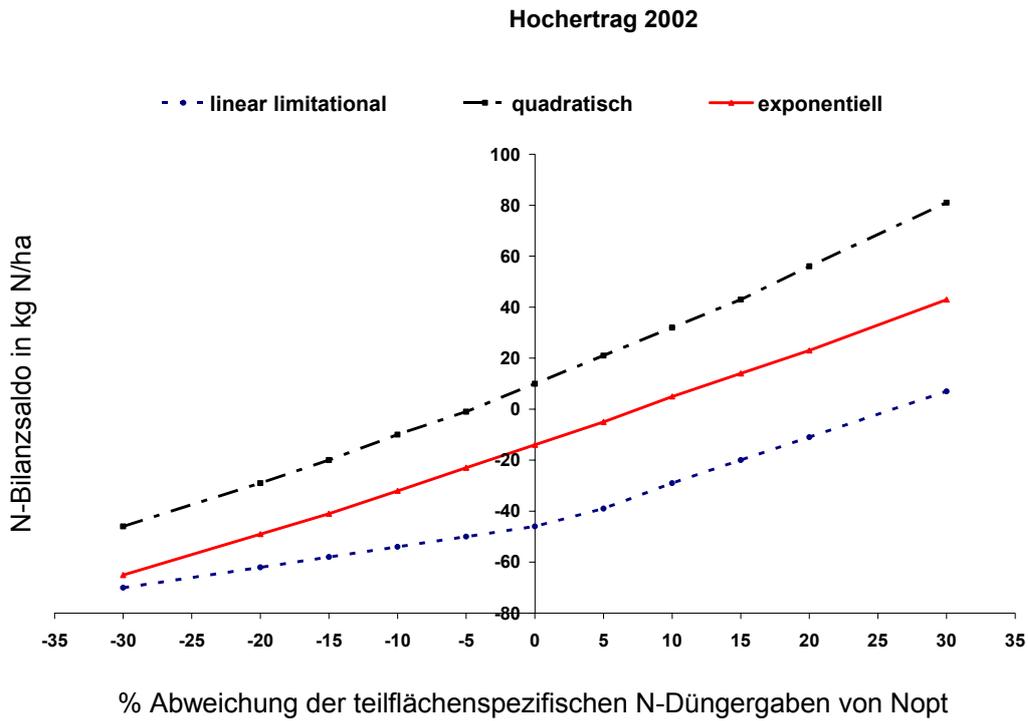
**Abbildung 15: Sensitivitätsanalyse ökonomischer Potenziale der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung, Sieblerfeld 2002, linear limitationales Regressionsmodell**  
Quelle: eigene Darstellung

## **Sensitivitätsanalyse der umweltrelevanten Potenziale**

Die exemplarische Sensitivitätsanalyse der umweltrelevanten Potenziale für das Versuchsjahr 2002 zeigt, dass bereits geringere positive Abweichungen (Überdüngung) von der ex post bestimmten teilflächenspezifischen optimalen Intensität einen Anstieg der N-Bilanzsalden nach sich zieht. Dies gilt in gleicher Weise für die untersuchten Regressionsmodelle (vgl. Abbildung 16); wobei vom absoluten Niveau her gesehen die Stickstoffbilanzsalden des linear limitationalen Ertragsmodells wesentlich niedriger sind, als die des quadratischen oder exponentiellen Ertragsmodells. Dies liegt, wie bereits erläutert, darin begründet, dass die optimalen speziellen Intensitäten beim linear limitationalen Modell ebenfalls wesentlich geringer sind als die der beiden anderen Modelle. Die Kornerträge sind aber vergleichbar hoch. Dieser Sachverhalt wirkt sich folglich positiv auf die Stickstoffbilanzsalden aus.

Die in Abbildung 16 dargestellten Funktionen für das quadratische und exponentielle Ertragsmodell scheinen einen annähernd linearen Verlauf aufzuweisen. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die Produktionsfunktionen dieser Modelle im Bereich der optimalen speziellen Intensität einen relativ flachen Verlauf zeigen. Folglich führt eine Steigerungen bzw. Senkung der Stickstoffgaben zu keinen größeren Veränderungen bezüglich des Kornertrags. Auf die Veränderung der Stickstoffbilanzsalden wirkt sich somit hauptsächlich die Veränderung der Stickstoffgaben aus (die ja in gleichen prozentualen Schritten ausgehend von der optimalen speziellen Intensität vermindert bzw. erhöht wird) und weniger der Stickstoffentzug durch das Erntegut. Dies führt letztlich zu einem annähernd linearen Anstieg der Stickstoffbilanzsalden beim quadratischen und exponentiellen Ertragsmodell.

Somit kann festgehalten werden, dass aus ökonomischer Sicht geringere Abweichungen der Stickstoffgaben vom geschätzten Optimum kaum negative Auswirkungen haben. Aus Umweltgesichtspunkten führen im Gegensatz dazu positive Abweichungen von 15% von der optimalen speziellen Intensität zu einer erheblichen umweltrelevanten Mehrbelastung.



**Abbildung 16: Sensitivitätsanalyse ökologischer Potenziale der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung, Sieblerfeld 2002.**

Quelle: eigene Darstellung

### 5.1.5 Zwischenfazit Potenzialberechnungen

Mit Hilfe des vorgestellten Modells lassen sich ökonomische sowie umweltrelevante Effekte der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung auf Basis kleinräumiger Produktionsfunktionen darstellen. Eine Anwendung des Modells auf zwei Stickstoffsteigerungsversuche am Versuchsschlag Sieblerfeld in den Jahren 2002 und 2004 zeigt, dass positive ökonomische sowie ökologische Potenziale durch teilflächenspezifische Stickstoffdüngung von Winterweizen erzielt werden können. Diese sind jedoch stark von der einheitlichen Referenzbewirtschaftung sowie vom zugrunde gelegten Regressionsmodell abhängig, wobei die ökonomischen Vorteile insgesamt hinter den Erwartungen zurückbleiben.

Eine detaillierte Produktionsfunktionsanalyse zeigt, dass ein hohes Bestimmtheitsmaß nicht zwangsläufig ein kurzes Vertrauensintervall für  $N_{opt}$  nach sich zieht. Lange, sich überschneidende teilflächenspezifische Vertrauensintervalle für  $N_{opt}$  können die nur begrenzten ökonomischen Vorteile der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung teilweise erklären. Eine detaillierte Analyse der Residuen der drei untersuchten Regressionsmodelle deutet darauf hin, dass sich aus ökonometrischer Sicht das quadratische und das linear limitationale Regressionsmodell besser eignen als das exponentielle Ertragsmodell. Ein Vorteil des linear limitationalen Modells ist darin zu sehen, dass die teilflächenspezifischen optimalen Intensitäten weit innerhalb des untersuchten Bereichs liegen. Abschließend führen die Ausführungen nicht zu einer Aussage, welche der drei Produktionsfunktionstypen die Ertragswirkung der Stickstoffdüngung realitätsnäher abbildet. Sie zeigen aber die Grenzen auf innerhalb derer sich die Potenziale einer teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung bewegen können.

Zudem kann gezeigt werden, dass mit einer Ausnahme (exponentielles Modell im Jahr 2004) unabhängig vom Regressionsmodell in beiden Versuchsjahren die optimale spezielle Intensität im Hohertrag höher ist als im Niedrigertrag und das bei sehr unterschiedlichen klimatischen Bedingungen. Folglich ist es ökonomisch nicht sinnvoll, bei den vorherrschenden Standortverhältnissen Niedrigertragsstandorte

höher zu düngen als Hohertragsstandorte, so wie dies bei online Verfahren teilweise propagiert wird.

Sensitivitätsanalysen zeigen, dass Abweichungen vom ex post bestimmten Optimum nur sehr begrenzt toleriert werden können, damit die ohnehin nur eingeschränkten Vorteile der teilflächenspezifischen N-Düngung nicht verloren gehen.

Folglich muss es mit Hilfe von teilflächenspezifischen Informationen gelingen, das ex post bestimmte ökonomische Optimum mit nur geringen Abweichungen ex ante zu erreichen, da sonst die erhofften Vorteile durch Teilflächenbewirtschaftung nicht erzielt werden können.

## **5.2 Ergebnisse der IKB Feldversuche zu verschiedenen teilflächenspezifischen Ansätzen zur Stickstoffdüngung (2002-2004)**

Im letzten Abschnitt wurde das mögliche Potenzial der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung von Winterweizen anhand von Modellkalkulationen auf Basis von teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen dargestellt. Im Gegensatz dazu stellen die folgenden empirischen Ergebnisse das derzeitig realisierbare ökonomische und ökologische Potenzial der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung für die im IKB-Projekt entwickelten Düngealgorithmen dar.

### **5.2.1 Versuchsergebnisse**

Zur ökonomischen Bewertung der Ergebnisse der Streifenversuche wird die stickstoffkostenfreie Leistung herangezogen. Zur Bewertung von umweltrelevanten Effekten der untersuchten Düngestrategien wird der Stickstoffbilanzsaldo als Agrarumweltindikator (siehe Abschnitt 4.2) verwendet. Die Berechnung der stickstoffkostenfreien Leistung erfolgt, wie bei den vorangegangenen Berechnungen auch, für einen Winterweizenpreis von 11 €/dt und einen Stickstoffpreis von 0,60 €/kg.

### **Feldversuch am Versuchsschlag Schafhof im Jahr 2002**

Da es sich bei der Versuchsanlage am Schafhof<sup>6</sup> im Jahr 2002 um einen unvollständig randomisierten Streifenversuch mit Großparzellen handelt (vgl. Kapitel 4.3.3), ist eine klassische varianzanalytische Auswertung, bei der die Streifenmittelwerte der untersuchten Varianten verglichen werden, aus statistischer Sicht problematisch. Zur Auswertung werden daher die Mittelwerte über alle Großparzellen je Variante berechnet. Zur besseren Interpretation dieser Mittelwerte wird der Standardfehler des Mittelwertes herangezogen.

---

<sup>6</sup> Die Standortbeschreibung für den Versuchsschlag Schafhof wird im Material und Methoden Teil (Kapitel 4.3.3) erläutert.

Wie Tabelle 20 zu entnehmen ist, konnte mit dem Mapping-Ansatz im Vergleich zur einheitlichen Referenzdüngung mit 180 kg N/ha ein leichter Ertragsvorteil von 1,1 dt/ha in Bezug auf den Kornertrag bei 86% (TS<sup>7</sup>) erzielt werden.

Im Gegensatz dazu ist es mit dem Mapping- mit Online Overlay-Ansatz nicht bzw. kaum gelungen, einen höheren Kornertrag zu erzielen. Da sich die untersuchten Stickstoffdüngesysteme erst in der dritten Stickstoffgabe, die sich mehr auf die Qualität als auf den Ertrag auswirkt, merklich unterscheiden, ist dieses Ergebnis auch nicht verwunderlich. Zudem ist der Anteil der Mittelertragszone, in der sich die Systeme kaum unterscheiden, mit fast 60% am Versuchsfeld sehr hoch.

Der höhere Kornertrag beim Mapping-Ansatz (bei gleicher durchschnittlicher Stickstoffdüngung) führt zu einer um 12 €/ha höheren stickstoffkostenfreien Leistung (NKL) als bei einheitlicher Düngung. Die NKL des Mapping- mit Online Overlay-Ansatzes und der zugehörigen einheitlichen Referenzdüngung unterscheiden sich dagegen nur marginal. Die geringen Unterschiede der teilflächenspezifischen und einheitlichen stickstoffkostenfreien Leistungen sind aufgrund der niedrigen Standortheterogenität (im Jahr 2002 beträgt der Variationskoeffizient<sup>8</sup> (VK) des Ertrags nur 9%) plausibel.

**Tabelle 20: Ergebnisse des Streifenversuchs am Schafhof (2002)**

Versuchsgröße	einheitlich 180 kg N/ha	Mapping 180 kg N/ha	einheitlich 192 kg N/ha	Mapping- mit Online Overlay 192 kg N/ha
Ertrag (86% TS <sup>7</sup> ) [dt/ha]	77.3 (0,7)*	78.4 (0,7)	78.2 (0,5)	78.4 (0,7)
NKL [€/ha]	743 (7,6)	754 (7,6)	745 (5,8)	747 (6,8)
N-Bilanzsaldo [kg N/ha]	2 (7)	0 (8)	6 (6)	6 (4)
Proteingehalt [%]	14.5 (0,17)	14.5 (0,13)	15.0 (0,13)	15.2 (0,25)

\* Werte in Klammern: Standardfehler des Mittelwertes

**Quelle:** eigene Berechnungen

Die schlagdurchschnittlichen Stickstoffbilanzsalden der teilflächenspezifischen Ansätze unterscheiden sich nicht von ihren einheitlichen Referenzvarianten, wobei der Mapping-Ansatz sowie die zugehörige einheitliche Variante einen etwas niedrigeren N-Saldo (aufgrund der insgesamt niedrigeren eingesetzten

<sup>7</sup> Trockensubstanz

<sup>8</sup> Variationskoeffizient des Ertrags = Standardabweichung des Ertrags/ Mittelwert des Ertrags, ermittelt aus den Großparzellenerträgen bei einheitlicher Düngung von 180 N [kg/ha]

Stickstoffmenge) aufweisen, als der Mapping- mit Online Overlay-Ansatz und deren einheitliche Referenzvariante.

Auch in Bezug auf die Qualität (gemessen am Proteingehalt im Korn) sind keine größeren Unterschiede festzustellen. Es zeichnet sich lediglich ab, dass durch die höheren Stickstoffgaben, die speziell durch die dritte Düngergabe hervorgerufen werden, auch etwas höhere Proteingehalte erzielt werden können.

### **Feldversuch am Versuchsschlag D4 im Jahr 2003**

Wie in Kapitel 4.3.3 beschrieben, wurde das Versuchsdesign des Streifenversuchs am Schlag D4 im Jahr 2003 in zwei wesentlichen Punkten verbessert.

Zum einen handelt es sich um einen vollständig randomisierten Streifenversuch, d.h. die einzelnen Streifen einer Variante können als unabhängige Wiederholungen angesehen werden. Die Streifenmittelwerte können somit klassisch varianzanalytisch ausgewertet werden.

Zum anderen wurde eine zusätzliche Variante eingeführt, in der verschiedene Stickstoffstufen untersucht werden. Diese Variante dient hauptsächlich der Weiterentwicklung von Entscheidungsregeln zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung in einem anderen Teilprojekt des IKB-Dürnast, sie kann aber auch dazu genutzt werden, teilflächenspezifische Produktionsfunktionen zu schätzen.

In Tabelle 21 sind die Ergebnisse des Versuchs zusammengefasst. Bei der Bewertung muss angemerkt werden, dass der untersuchte Mapping- mit Online Overlay-Ansatz mit den zugrunde gelegten Entscheidungsregeln zum ersten Mal angewandt wurde. Zum Vergleich werden einerseits wie beim Versuch am Schafhof (2002) die Mittelwerte über alle Großparzellen (Parzellenauswertung) sowie andererseits die Streifenmittelwerte (Streifenauswertung) berechnet. Dabei fällt auf, dass zwischen diesen beiden Auswertungsvarianten kaum Unterschiede bestehen (vgl. Tabelle 21).

Die folgenden Ausführungen beziehen sich nur noch auf die Auswertung der Streifenmittelwerte. Im Jahr 2003 kann am Schlag D4 mit dem Mapping- mit Online Overlay-Ansatz ein um 1,3 dt/ha höherer Kornertrag bei 86 % Trockensubstanz

erzielt werden als bei einheitlicher Düngung. Da jedoch bei diesem Düngeansatz im Vergleich zur einheitlichen Düngung um ca. 50 kg/ha mehr Stickstoff im Schlagdurchschnitt ausgebracht wurde, ist die stickstoffkostenfreie Leistung um 6 €/ha niedriger als bei einheitlicher Düngung. Beides, der Ertragsunterschied sowie der Unterschied in Bezug auf die stickstoffkostenfreie Leistung, sind jedoch bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% statistisch nicht signifikant.

Durch den wesentlich höheren Stickstoffeinsatz bei der teilflächenspezifischen Variante und der gleichzeitig nur geringen Ertragssteigerung ergibt sich beim Mapping- mit Online Overlay-Ansatz ein um 34 kg N/ha signifikant höherer Stickstoffbilanzsaldo.

**Tabelle 21: Ergebnisse des Streifenversuchs am Schlag D4, 2003**

Zielgrößen	betriebsübliche Düngung		Mapping- mit Online Overlay-Ansatz	
	Parzellen- auswertung <sup>2</sup>	Streifen- auswertung <sup>1</sup>	Parzellen- auswertung <sup>2</sup>	Streifen- auswertung <sup>1</sup>
Ertrag [dt/ha]	75,0 (0,8)**	75,1 <sup>A</sup>	77,3 (0,8)	77,4 <sup>A</sup>
NKL [€/ha]	735 (8)	736 <sup>A</sup>	728 (9)	730 <sup>A</sup> (768) <sup>3</sup>
N-Bilanzsaldo [kg/ha]	-6 (2,0)	-5,9 <sup>A</sup>	28 (2,5)	28 <sup>B</sup>
Protein [%]	13,4 (0,1)	12,9 <sup>A</sup>	14,1 (0,1)	13,9 <sup>B</sup>

<sup>1</sup>Streifenmittelwerte sind varianzanalytisch verrechnet. Signifikante ( $\alpha=5\%$ ) Mittelwertsdifferenzen werden durch unterschiedliche Buchstaben gekennzeichnet.

<sup>2</sup>Werte in Klammer: Standardfehler des Mittelwerts

<sup>3</sup> der höhere Proteingehalt wird mit 0,50 €/dt mitbewertet.

**Quelle:** eigene Berechnungen

Durch die höhere Stickstoffdüngung wurde jedoch die Kornqualität bei teilflächenspezifischer Düngung wesentlich verbessert. Der Proteingehalt ist um einen Prozentpunkt höher (absicherbar bei  $\alpha=5\%$ ) als bei einheitlicher Düngung. Da der höhere Proteingehalt nur schwer monetär zu bewerten ist, ist er in die ursprüngliche Berechnung der stickstoffkostenfreien Leistung (siehe Tabelle 21) nicht mit eingegangen. Würde man jedoch davon ausgehen, dass durch den höheren Proteingehalt ein um 0,50 €/dt<sup>9</sup> höherer Preis erzielt werden kann, also anstatt der ursprünglich angenommenen 11 €/dt Winterweizen 11,50 €/dt, so würde die stickstoffkostenfreie Leistung beim Mapping- mit Online Overlay-Ansatz 768 €/ha

<sup>9</sup> Aufgrund des höheren Proteingehalts bei teilflächenspezifischer N-Düngung wird ein um 0,50 €/dt höherer Winterweizenpreis als bei einheitlicher Düngung zugrunde gelegt. Der Winterweizenpreis beträgt somit bei teilflächenspezifischer Düngung 11,50 €/dt.

(Wert in Klammer siehe Tabelle 21) betragen und wäre damit um 32 €/ha höher als bei einheitlicher Düngung.

#### **Feldversuch am Versuchsschlag Schafhof im Jahr 2004**

Im Vergleich zum Streifenversuch am Versuchsfeld D4 im Jahr 2003 wurde das Versuchsdesign nochmals verbessert. Anstatt einen Streifen durchgängig mit einer Variante zu belegen, wurde jeder Großparzelle zufällig eine bestimmte Variante zugelost. Es handelt sich somit um eine vollständig randomisierte Versuchsanlage mit Großparzellen. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist darin zu sehen, dass jede Parzelle als Wiederholung in die varianzanalytische Auswertung eingehen kann. D.h. im Vergleich zum Streifenversuch am D4 (2003), bei dem die Streifen als Wiederholung verwendet werden, erhöht sich die Anzahl der Wiederholungen um das ca. 10-fache und damit erhöhen sich auch die Freiheitsgrade. Dies wiederum führt dazu, dass auch kleinere Mittelwertsdifferenzen unter Umständen statistisch abgesichert werden können.

Ein weiterer Vorteil ist darin zu sehen, dass eine Kovarianzanalyse mit einer Kovariablen, welche die Standortheterogenität beschreibt, durchgeführt werden kann. Wie bei GOMEZ und GOMEZ (1984, S. 424 ff.) beschrieben eignet sich speziell eine Kovarianzanalyse, um den versuchsbedingten Fehler auf heterogenen Versuchsflächen zu kontrollieren. Die Kovarianzanalyse ermöglicht es, bei diesem Versuch zu berücksichtigen, dass die untersuchten Bewirtschaftungsvarianten trotz Ertragsklassenbildung auf unterschiedlich guten Teilflächen angesiedelt sind. Denn eine genauere Analyse zeigt oft, dass die Standorteigenschaften der Böden über die Streifen ungleich verteilt waren, und diese den Naturalertrag stärker bestimmten als die Managementvarianten. Der Naturalertrag muss somit als Funktion von Bewirtschaftung und standörtlichen Faktoren gesehen werden. Durch die Kovarianzanalyse kann dies teilweise erreicht werden. Anders ausgedrückt werden bei der Erprobung von Precision Farming Technologien gezielt heterogenere Flächen ausgewählt, mit dem Problem, dass z.B. durch Bodengradienten die Varianzen innerhalb der zu untersuchenden Varianten sehr groß sind. Dies führt dann oftmals dazu, dass die zu untersuchenden Behandlungsunterschiede überdeckt werden. Mit der Kovarianzanalyse kann dieses Problem abgeschwächt werden, wenn eine

geeignete Kovariable vorhanden ist, mit der die Versuchsergebnisse auf einheitliche Standortbedingungen „normiert“ werden können.

Für die folgende Auswertung wird als Kovariable die scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens verwendet, da eine relativ hohe Korrelation zwischen diesen Werten und dem Kornertrag im Versuchsjahr 2004 besteht (siehe Abbildung 26, Anhang). Der Vorteil der Kovarianzanalyse zeigt sich bei diesem Versuch darin, dass die Quadratsumme der Abweichungen innerhalb der Varianten (Versuchsfehler) verringert werden kann. In diesem Fall ist es möglich, durch den Einsatz der Kovariable EM38<sup>10</sup> den Versuchsfehler um ca. 14% zu reduzieren (vgl. Tabelle 29, Anhang). Dies führt dann letztlich dazu, dass Mittelwertsunterschiede auch auf heterogenen Versuchsfeldern leichter statistisch abgesichert werden können. Bei dem hier ausgewerteten Versuch führt zwar auch eine Kovarianzanalyse zu keinen statistisch absicherbaren Ergebnissen (Tabelle 22), dies kann aber mehr auf die Versuchsanstellung im Vorjahr zurückgeführt werden (Erklärung siehe unten).

Die Ergebnisse des Versuchs sind in Tabelle 22 dargestellt. Es wird deutlich, dass bei gleicher, schlagdurchschnittlicher Stickstoffmenge durch den Mapping- mit Online Overlay-Ansatz ein leicht höherer Kornertrag um ca. 1 dt/ha erzielt werden kann, wohingegen mit dem Mapping-Ansatz ein leichter Ertragsrückgang von 0,8 dt/ha zu beobachten ist. Die Ertragsunterschiede sind jedoch wie bereits erwähnt nicht statistisch absicherbar. Entsprechend der Ertragsunterschiede kann beim Mapping- mit Online Overlay-Ansatz eine um 11 €/ha höhere stickstoffkostenfreie Leistung erwirtschaftet werden als bei einheitlicher Düngung. Beim Mapping-Ansatz ist diese aufgrund des niedrigeren Kornertrags um 10 €/ha niedriger. Die Stickstoffbilanzsalden sind bei allen drei untersuchten Varianten im negativen Bereich und nahezu identisch.

Die stark negativen Stickstoffbilanzsalden deuten darauf hin, dass durch das Erntegut wesentlich mehr Stickstoff entzogen als durch mineralische Stickstoffdüngung zugeführt wurde. D.h. es wurde entweder sehr viel Stickstoff im Boden durch Mineralisation freigesetzt, oder, was in diesem Fall wahrscheinlicher ist, haben sehr hohe, versuchsbedingte Stickstoffgaben (eines stabilisierten

---

<sup>10</sup> EM38 Sensor zur Messung der Bodenleitfähigkeit

Stickstoffdüngers) im Vorjahr, die aufgrund sehr geringer Niederschläge in der vegetationsfreien Zeit zudem nicht ausgewaschen wurden, zu einem Stickstoffüberangebot geführt.

**Tabelle 22: Ergebnisse des Streifenversuchs am Schafhof, 2004**

Zielgröße	Stickstoffdüngevarianten		
	betriebsüblich	Mapping-Ansatz	Mapping- mit Online Overlay-Ansatz
Ertrag [dt/ha]	100.8 <sup>A</sup>	100.0 <sup>A</sup>	101.7 <sup>A</sup>
NKL [€/ha]	1024 <sup>A</sup>	1014 <sup>A</sup>	1035 <sup>A</sup>
N-Bilanzsaldo [kg N/ha]	-81.8 <sup>A</sup>	-76.8 <sup>A</sup>	-82.5 <sup>A</sup>

Die statistische Auswertung erfolgt als Kovarianzanalyse mit EM38 als Kovariable, gleiche Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede bei  $\alpha=5\%$

**Quelle:** eigene Berechnungen

In Abbildung 17 sind teilflächenspezifische Produktionsfunktionen (aus den Daten der Zufallsdüngung und des Mapping- mit Online Overlay-Ansatzes geschätzt) für den Versuchsschlag dargestellt. Es wird dabei zum einen deutlich, dass sich die Ertragszonen stark überlagern, und zum anderen, dass bereits bei sehr niedrigen Stickstoffdüngergaben extrem hohe Erträge erzielt werden, was dazu führt, dass die Produktionsfunktionen sehr flach verlaufen. Dass die teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen am Versuchsfeld Sieblerfeld, das nur wenige Kilometer entfernt ist, im selben Jahr (vgl. Abbildung 11) eine wesentlich größere Steigung am Anfang besitzen, kann als Indiz dafür gewertet werden, dass die extrem hohen Stickstoffgaben des Vorjahres die Versuchsergebnisse am Schafhof im Jahr 2004 stark verzerren.

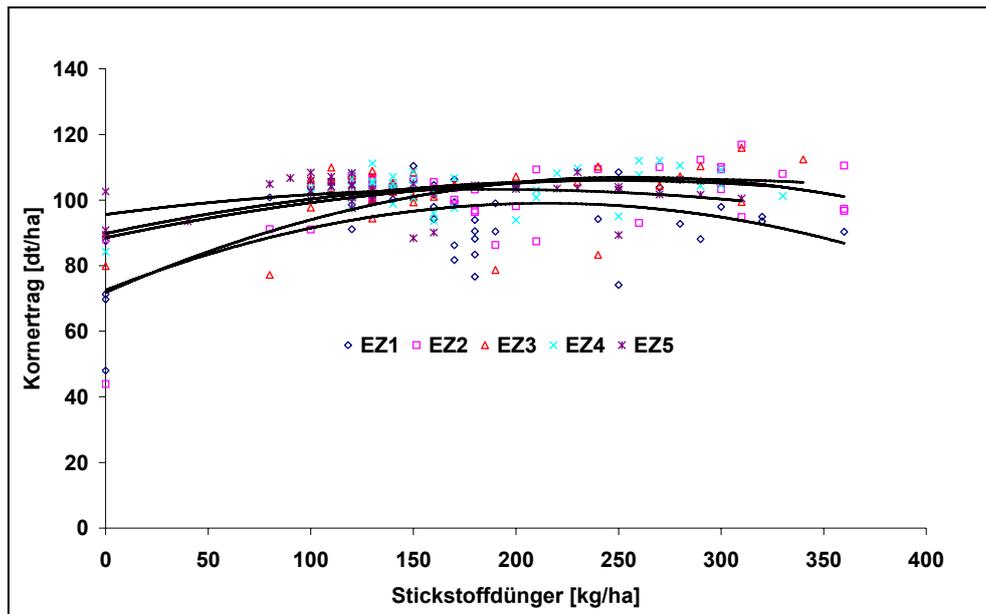


Abbildung 17: Teilflächenspezifische Produktionsfunktionen am Schafhof (2004) für 5 verschiedene Ertragszonen (EZ).

Quelle: eigene Darstellung

### 5.2.2 Überlegungen zur weiterführenden Bewertungsmethodik teilflächenspezifischer Düngealgorithmen

Ein Ziel von den besprochenen Streifenversuchen war es, verschiedene teilflächenspezifische Düngestrategien mit einer einheitlichen Düngung zu vergleichen. Ist das Ergebnis eines Versuchs, dass beispielsweise durch einen Mapping- mit Online Overlay-Ansatz keine oder nur sehr kleine Ertragsvorteile realisiert werden, (so wie dies bei den besprochenen Versuchen teilweise der Fall ist) so kann dies mehrere Ursachen haben:

Zum einen ist es möglich, dass die verwendete Entscheidungsregel zur teilflächenspezifischen Applikation von Stickstoff nicht geeignet ist. Zum anderen kann die Düngeregel qualitativ hochwertig sein, aber die Standortvoraussetzungen bieten aufgrund mangelnder Heterogenität kein Potenzial für Precision Farming.

Als dritte Ursache ist denkbar, dass zwar die angewandte Düngeregel und die Standortheterogenität zu einem Vorteil bei teilflächenspezifischer Stickstoffdüngung führen müssten, extreme Klimabedingungen diese Effekte jedoch überlagern.

Mit „herkömmlich“ angelegten Streifenversuchen (z.B. Versuch am Schafhof 2002) ohne integrierten Steigerungsversuch kann zwischen den beschriebenen Effekten

nicht ausreichend unterschieden werden. Bei der Bewertung einer Dünge­strategie ist es aber von großer Bedeutung, die Ursache für ein bestimmtes Ergebnis zu kennen, speziell wenn Entscheidungsregeln in einem Schritt evaluiert und weiterentwickelt werden sollen.

Eine Lösungsmöglichkeit für dieses Problem kann darin bestehen, zusätzlich zu den zu testenden Varianten eine Stickstoffsteigerungsvariante einzuführen (vgl. WEIGERT et al. 2004, S. 321). In dieser Stickstoffsteigerungsvariante werden Stickstoffgaben getestet, die weder in der einheitlichen noch in den anderen teilflächenspezifischen Varianten auftreten. Dieses Vorgehen ermöglicht es, teilflächenspezifische Produktionsfunktionen zu schätzen (siehe Kapitel Produktionsfunktionen), die dann Grundlage für folgende Überlegung sind:

Um die Qualität einer Entscheidungsregel zur ortsspezifischen Stickstoffdüngung bewerten zu können, ist es sinnvoll, sie nicht nur an einer einheitlichen Referenzdüngung zu messen, sondern auch an dem theoretisch vorhandenen, schlagspezifischen ökonomischen Potenzial der teilflächenspezifischen Düngung.

Dabei kann speziell zur Bewertung von Mapping-Ansätzen <sup>11</sup> folgendermaßen vorgegangen werden:

In einem ersten Schritt werden für die variabel gedüngten Ertragszonen teilflächenspezifische Produktionsfunktionen geschätzt. Mit Hilfe der Produktionsfunktionen des Stickstoff- und Winterweizenpreises kann dann die optimale spezielle Intensität der N-Düngung ( $N_{opt}$ ) je Ertragszone berechnet werden. Bei bekannten  $N_{opt}$ s und Flächenanteilen der Ertragszonen an der Gesamtfläche ist es möglich, für den Versuchsschlag das maximale ökonomische Potenzial einer auf Ertragszonen basierenden, teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung zu berechnen.

In einem zweiten Schritt wird im Vergleich dazu die empirisch ermittelte stickstoffkostenfreie Leistung einer teilflächenspezifischen Variante berechnet, sowie dies bei den drei beschriebenen Versuchen geschehen ist (siehe vorher).

---

<sup>11</sup> Mapping Ansätze eignen sich besonders für die beschriebene Evaluierung, da Produktionsfunktionen für die unterschiedlichen Managementzonen bestimmt werden können. Bei Sensor Ansätzen ist dies nicht möglich, da die Variation der Applikationsmenge nicht nach Ertragszonen sondern wesentlich kleinräumiger erfolgt.

Der Quotient aus der empirisch ermittelten stickstoffkostenfreien Leistung (NKL) des untersuchten Precision Farming Ansatzes und der stickstoffkostenfreien Leistung, die aus der Produktionsfunktionsanalyse ermittelt wird (das max. ökonomische Potenzial), kann als Maß für die Qualität der überprüften teilflächenspezifischen Düngeregel verwendet werden. Je näher sich der Quotient dem Wert 1 annähert, desto besser ist es mit der Düngeregel gelungen, das vorhandene ökonomische Potenzial auszuschöpfen. Der Erreichungsgrad kann somit als Erfolgskennzahl für die untersuchte Düngeregel verwendet werden.

$$\text{Erreichungsgrad} = \frac{\text{empirisch ermittelte NKL der teilflächenspezifischen Düngung}}{\text{max. ökonomisches Potenzial der teilflächenspezifischen Düngung}}$$

Die teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen geben zudem Auskunft über die Heterogenität des Versuchsschlages: Sind deren Steigung ähnlich und die Funktionen kaum voneinander zu unterscheiden, wie beispielsweise in Abbildung 17 für den Versuchsschlag Schafhof für das Jahr 2004 dargestellt, so kann gefolgert werden, dass die Heterogenität insgesamt gering ist. Die Aussagen über die Heterogenität des Schlags können dann zur weiteren Interpretation der Versuchsergebnisse herangezogen werden.

### **5.2.3 Zwischenfazit Streifenversuche**

Die Auswertung von drei Streifenversuchen zeigt, dass es mit einem Mapping- mit Online Overlay-Ansatz selbst auf schwach heterogenen Flächen gelingt, Ertragsvorteile im Bereich von ca. 1 dt/ha im Vergleich zur einheitlichen Bewirtschaftung zu erzielen. Zudem gelingt es tendenziell, die Kornqualität (Proteingehalt) durch diesen Ansatz zu verbessern. Die schlagdurchschnittlichen Stickstoffbilanzsalden konnten jedoch nicht positiv beeinflusst werden. Mit einem reinen Mapping-Ansatz, basierend auf Ertragskarten, konnten in einem der beiden Versuche keine ökonomischen Vorteile im Vergleich zur einheitlichen Bewirtschaftung erzielt werden. Qualitätsvorteile in Bezug auf den Proteingehalt, wie beim Mapping- mit Online Overlay-Ansatz, konnten ebenfalls nicht beobachtet werden. Auch auf die Stickstoffbilanzsalden hatte der Mapping-Ansatz keinen

nennenswerten Einfluss. Die Ergebnisse müssen jedoch vor dem Hintergrund betrachtet werden, dass die untersuchten Düngeregeln noch in der Entwicklungsphase sind. Es handelt sich daher um eine erste Zwischenbilanz.

Bei der Auswertung von Versuchen, die auf heterogenen Versuchsflächen durchgeführt werden müssen (wie dies bei der Erprobung von Precision Farming Technologien der Fall ist), kann eine Kovarianzanalyse beim Ausgleich eines Bodengradienten helfen. Bei den in dieser Arbeit ausgewerteten Versuchen hat sich die scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens als eine geeignete Kovariable herausgestellt, um den Versuchsfehler zu reduzieren.

Die Konzeption von Streifenversuchen lässt normalerweise keine Trennung von verschiedenen Effekten, wie z.B. den Einfluss der Standortheterogenität, der Witterungsbedingungen bzw. der eingesetzten Düngeregeln auf das Ergebnis zu. Daher werden weiterführende Überlegungen zur Bewertungsmethodik von teilschlagspezifischer Stickstoffdüngung durch Streifenversuche angestellt. Dabei kann zu dem Schluss gelangt werden, dass durch eine zusätzliche teilflächenspezifische Produktionsfunktionsanalyse eine Art Normierung der empirisch gefundenen Streifenergebnisse durchgeführt werden kann. Diese würde es erlauben, die oben genannten Effekte teilweise getrennt zu diskutieren, und führt zu einer Erfolgskennzahl zur Bewertung von Entscheidungsregeln zur Teilschlagdüngung. Um teilflächenspezifische Produktionsfunktionen schätzen zu können, muss jedoch die dazu notwendige Datengrundlage geschaffen werden. Dies kann beispielsweise durch zusätzliche Streifen, in denen Stickstoffsteigerungen angelegt werden, erreicht werden.

### 5.3 Investitionsbedarf für Technologien zur teilflächenspezifischen N-Düngung und Break-Even-Analysen

In den letzten Kapiteln erfolgte die ökonomische Bewertung der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung auf Basis der stickstoffkostenfreien Leistung. In diesem Kapitel sollen die durch die notwendigen Investitionen bedingten jährlichen Kosten betrachtet werden. Ziel ist es, den Einfluss der Höhe der Investitionsausgaben und den Umfang der Anbaufläche auf die Wirtschaftlichkeit der ortsspezifischen Stickstoffdüngung von Winterweizen zu untersuchen. Folgende drei Investitionsalternativen zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung werden betrachtet:

Alternative 1: Mapping-Ansatz, nur auf historischen Ertragskarten basierend

Alternative 2: Sensor-Ansatz

Alternative 3: Mapping- mit Online Overlay-Ansatz

Der Investitionsbedarf für die beschriebenen Ansätze zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung ist in Tabelle 23 aufgeführt. Die Preise der beschriebenen Precision Farming Technologien sind dem KTBL Taschenbuch (2002/2003) entnommen. Dabei ist anzumerken, dass es sich um Näherungswerte handelt, da die Preise von Anbieter zu Anbieter bzw. Händler sehr stark schwanken.

**Tabelle 23: Abschätzung des Investitionsbedarfs für die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung nach verschiedenen Ansätzen**

Ansatz zur teilflächenspezifischen N-Düngung	verwendete Informationsgrundlagen	notwendige Technik	Investitionsbedarf* (ca.)
Mapping-Ansatz	historische Erträge	teilflächenspezifische Applikationstechnik nach Ertragskarten	6.500 €
		Ertragserfassung	7.500 €
Sensor-Ansatz	Sensorinformationen	N-Sensor	20.000 €
Mapping- mit Online Overlay-Ansatz	historische Erträge und Sensorinformationen	Ertragserfassung	7.500 €
		N-Sensor	20.000 €

\*Quelle: KTBL Taschenbuch (2002/2003, S. 153)

### 5.3.1 Break-Even-Analysen

Die Berechnung der jährlichen Kosten (Annuität), die durch die Investition in einen der beschriebenen Ansätze zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung verursacht werden, erfolgt anhand der folgenden Formel:

$$a = K_0 * \frac{q^N * (q - 1)}{q^N - 1}$$

mit:

$a$  = Annuität

$K_0$  = Anschaffungsauszahlung

$q$  = Zins in % dividiert durch 100 plus 1

$N$  = Nutzungsdauer in Jahren

Der zugrunde gelegte Zins beträgt 8%, die Nutzungsdauer 5 Jahre.

In Tabelle 24 sind die Ergebnisse der Break-Even-Analyse für die Einführung verschiedener Ansätze zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung aufgeführt. Der Tabelle 24 ist zu entnehmen, dass die jährlichen Kosten für den Mapping-Ansatz 3506 € (bis 500 ha Getreidefläche), für den Sensor Ansatz 5009 € (bis 1000 ha Getreidefläche) und für den Mapping- mit Online Overlay-Ansatz 6888 € (bis 500 ha Getreidefläche) betragen. Ab 500 ha Getreidefläche wird unterstellt, dass eine weitere Ertragskartierung für den Mapping sowie den Mapping- mit Online Overlay-Ansatz notwendig wird. Die jährlichen Kosten der Investition in einen Mapping-Ansatz zur teilflächenspezifischen N-Düngung betragen dann 5385 € (bis 1000 ha) und die für den Mapping- mit Online Overlay-Ansatz 8766 € (bis 1000 ha).

In Tabelle 24 sind weiterhin beispielhaft die jährlichen Kosten der Investition auf 100 ha, 500 ha bzw. auf 1000 ha Getreidefläche bezogen, um dann die jeweils nötige Naturalertragserhöhung (Winterweizen) bzw. Faktoreinsparung (Stickstoff) zu berechnen, die zur Kostendeckung erreicht werden müssen. Für diese Kalkulationen wird ein Winterweizenpreis von 11 €/dt und ein Stickstoffpreis von 0,60 €/kg angenommen. Bei den Szenarien mit 100 ha (1000ha) Getreidefläche wird unter diesen Annahmen beim Mapping-Ansatz eine Kornertragssteigerung von 3,2 (0,5)

dt/ha, beim Sensoransatz von 4,6 (0,5) dt/ha und beim Mapping mit Sensor Overlay-Ansatz 6,3 (0,8) dt/ha benötigt, um den Break-Even zu erreichen.

Bei einer Betrachtung der notwendigen Stickstoffeinsparungen bis zur Kostendeckung ergeben sich für die 100 (1000) ha Szenarien beim Mapping-Ansatz 58 (9) kg/ha, beim Sensoransatz 83 (8) kg/ha und beim Mapping mit Sensor Overlay-Ansatz 115 (15) kg/ha.

**Tabelle 24: Break-Even-Analysen für verschiedene Ansätze zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung von Winterweizen**

Kennzahl	Mapping-Ansatz <sup>1</sup>			Sensor-Ansatz			Mapping- mit Online Overlay-Ansatz		
	100	500	1000	100	500	1000	100	500	1000
Getreidefläche [ha]	100	500	1000	100	500	1000	100	500	1000
Investitionsbedarf [€]	14000	14000	21500 <sup>2</sup>	20000	20000	20000	27500	27500	35000 <sup>2</sup>
Nutzungsdauer [Jahre]	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Zins [%]	8	8	8	8	8	8	8	8	8
jährliche Kosten [€]	3506	3506	5385	5009	5009	5009	6888	6888	8766
jährliche Kosten je ha [€/ha]	35	7	5	50	10	5	69	14	9
notw. Erhöhung des Natural- ertrags bis Break-Even [dt/ha]	3,2	0,6	0,5	4,6	0,9	0,5	6,3	1,3	0,8
notw. Reduktion des N-Einsatzes bis Break-Even [kg N/ha]	58	12	9	83	17	8	115	23	15

Winterweizenpreis: 11 €/dt; Stickstoffpreis: 0,60 €/kg

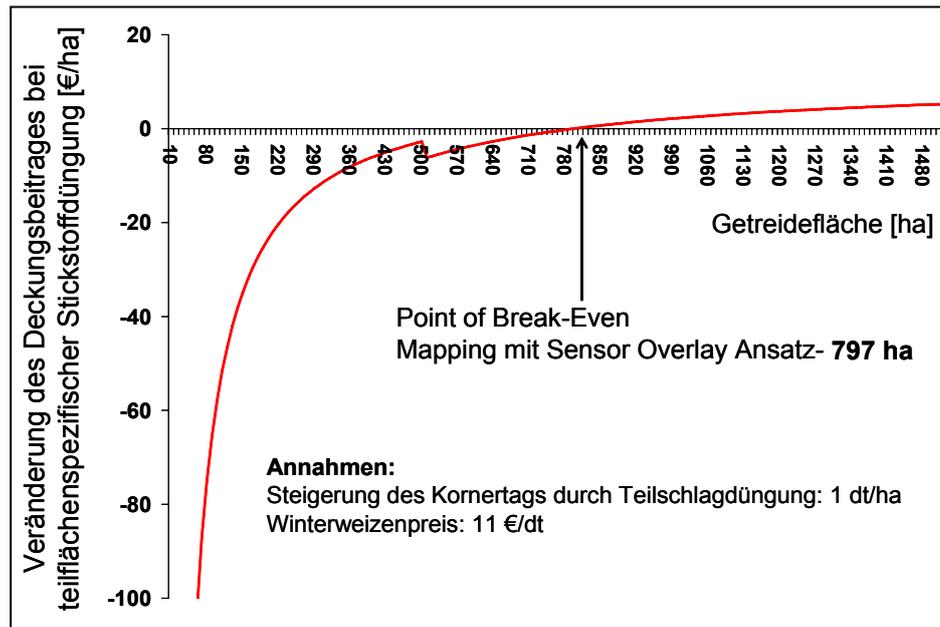
<sup>1</sup>Der Mapping-Ansatz wird rein auf Basis von Ertragskarten durchgeführt

<sup>2</sup>höhere Investitionen durch zusätzliche Ertragserfassung ab 500 ha Getreidefläche

**Quelle:** eigene Berechnungen

Im vorausgegangenen Kapitel wurden die Ergebnisse von zwei Streifenversuchen dargestellt, in denen ein Mapping- mit Sensor Overlay-Ansatz mit einer einheitlichen Stickstoffdüngung verglichen wird. Dabei konnte für die vorherrschenden Standort- und Witterungsverhältnisse ein möglicher Mehrertrag von ca. 1 dt/ha festgestellt werden. Legt man den Investitionsbedarf wie in Tabelle 24 dargestellt für diesen Ansatz zugrunde, so wäre der Break-Even bei 797 ha Getreidefläche erreicht. Abbildung 18 illustriert diesen Zusammenhang.

Da bei diesen Berechnungen mögliche ökonomische Vorteile durch höhere Kornqualitäten (Proteingehalt) nicht berücksichtigt sind, handelt es sich um ein eher vorsichtiges Szenario.



**Abbildung 18: Break-Even Analysen für den Mapping- mit Online Overlay-Ansatz zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung von Winterweizen.**

Quelle: eigene Darstellung

### 5.3.2 Zwischenfazit Break-Even-Analysen

Die angestellten Break-Even-Analysen machen zum einen deutlich, dass speziell für den Bereich der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung die ohnehin nur geringen Ertragsvorteile mit einem möglichst kapitalextensiven Ansatz erzielt werden müssen, damit der Einsatz wirtschaftlich rentabel ist. Zum anderen wird ersichtlich, dass erst ab Getreideflächen von ca. 800 ha der Einsatz eines technologisch aufwendigen Mapping- mit Online Overlay-Ansatz sinnvoll erscheint. Demzufolge ergibt sich für viele Betriebe die Notwendigkeit des überbetrieblichen Maschineneinsatzes.

Da der Focus dieser Arbeit auf der Bewertung der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung liegt, wurde diese bei den vorangegangenen Break-Even-Analysen isoliert betrachtet. An dieser Stelle muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass die zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung notwendigen Technologien auch in anderen Bereichen der Teilflächenbewirtschaftung nutzenbringend eingesetzt werden können. So könnten beispielsweise Ertragskarten auch dazu genutzt werden, die Aussaat teilflächenspezifisch durchzuführen. Dies hätte zur Folge, dass die jährlichen Kosten, die mit der Erstellung von Ertragskarten verbunden sind, nicht

nur durch Naturalertragssteigerungen infolge der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung bzw. durch eine damit verbundene Reduktion der Stickstoffdüngerkosten gedeckt werden müssen. Auch die geringeren Saatgutkosten bedingt durch die teilflächenspezifische Aussaat können dann dazu beitragen, die jährlichen Kosten der Investition für die automatische Ertragskartierung mit zu decken.

#### **5.4 Auswirkungen der teilflächenspezifischen N-Düngung auf das ökonomische Risiko sowie das Risiko hoher N-Bilanzüberschüsse**

Aufgrund der Tatsache, dass wesentliche Wachstumsfaktoren wie die Höhe und Verteilung der Niederschläge sowie der Temperaturverlauf für die Vegetationsperiode nicht vorhergesagt werden können, ist die Stickstoffdüngung von Winterweizen mit vielen Unsicherheiten behaftet, die indirekt sowohl ökonomische als auch ökologische Risiken (z.B. Nitratauswaschung ins Grundwasser) nach sich ziehen. Erfolgt beispielsweise eine Überdüngung eines Weizenbestandes bis hin zum Lager aufgrund einer falschen Entscheidung, die auf Basis von bestimmten Erwartungen getroffen wurde, bedeutet dies zum einen erhebliche Ertragseinbußen und kann zum anderen zu erhöhtem Nitrataustrag ins Grundwasser führen.

Durch technische und pflanzenbauliche Innovationen stehen dem Landwirt neben der konventionellen, einheitlichen Düngestrategie auch teilflächenspezifische Alternativen zur Stickstoffdüngung zur Verfügung.

Bei der Entscheidung für eine bestimmte Düngestrategie würden sich risikoneutrale Landwirte (= Entscheidungsträger) am Erwartungswert einer z.B. monetären Zielgröße (Deckungsbeitrag) orientieren. Handelt es sich um einen risikoaversen Entscheider, dann sind neben der Höhe des Erwartungswertes der Zielgröße auch deren Schwankungsbreite und somit das Risiko von ausschlaggebender Bedeutung.

Bei der Bemessung der N-Düngergabe muss eine Entscheidung unter Unsicherheit getroffen werden, da zum Zeitpunkt der Düngung die folgenden klimabedingten Wachstumsbedingungen nicht bekannt sind. Diese Unsicherheit führt dazu, dass die Stickstoffdüngung mit Risiken behaftet ist. In dem hier betrachteten Fall können diese ökonomischer (z.B. zu geringe Deckungsbeiträge) als auch ökologischer (z.B. erhöhte Nitratauswaschung) Natur sein.

#### **5.4.1 Handlungsmöglichkeiten zur Beeinflussung des Risikos**

Zur Beeinflussung des Risikos gibt es verschiedenste Handlungsmöglichkeiten. Diese können nach HANF (1991) in Anpassungs- und Vorsorgemaßnahmen eingeteilt werden.

Anpassungsmaßnahmen werden oft unter den Begriffen Steuerung und Regelung zusammengefasst. Sie sind dadurch charakterisiert, dass der Entscheider bereits eine Handlungsalternative ausgewählt hat und diese durch Steuerungs- oder Regelungsmaßnahmen anpasst, um das Risiko zu vermindern. Vorsorgemaßnahmen werden bereits vor der Entscheidung für eine bestimmte Handlungsalternative getroffen, und lassen sich wieder in verschiedene Bereiche untergliedern.

Handelt es sich bei Precision Farming um eine risikomindernde Handlungsalternative, dann kann es zum einen zu dem Bereich „Verminderung des Risikos einzelner Prozesse“ durch Informationsbeschaffung gezählt werden, da teilflächenspezifische Bewirtschaftungsmaßnahmen auf wesentlich größeren Informationsmengen basieren. Zum anderen kann es zur Verringerung der Varianz der Zielvariablen (stickstoffkostenfreie Leistung bzw. N-Salden) beitragen.

Außerdem bietet die Teilflächenbewirtschaftung mehr Möglichkeiten zur Verbesserung der nachträglichen Anpassung als einheitliche Bewirtschaftungsmethoden. Als Beispiel wäre hier die Stickstoffdüngung von Winterweizen zu nennen. Hier kann gezielt nach einer ersten einheitlichen Düngung in der zweiten Düngung mit Hilfe von Sensoren die optimale N-Düngermenge im „Onlineverfahren“ bestimmt werden. Es kann somit eine bessere nachträgliche Anpassung an die erste Düngergabe durchgeführt werden als dies bei einheitlicher Düngung möglich ist.

## **5.4.2 Einbeziehung der Unsicherheit in Entscheidungen durch Risikoanalysen**

Zur Einbeziehung der Unsicherheit bei der Entscheidung für oder gegen die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung werden im Folgenden Risikoanalysen auf Modellbasis durchgeführt. Dabei handelt es sich wie in Kapitel 5.1 um Potenzialberechnungen.

### **5.4.2.1 Modellbeschreibung zur Risikoanalyse**

Um den Einfluss des Risikos auf die Entscheidung für oder gegen die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung analysieren zu können, wird ein Schlag simuliert, der zwei Ertragszonen aufweist. Für jede der beiden Ertragszonen des Modellschlags werden ein langjähriger Ertragsmittelwert sowie eine Standardabweichung vorgegeben, um den die Erträge normalverteilt sind. Mit Hilfe der Annahmen über das langjährige Verhalten der teilflächenspezifischen Erträge können durch Monte-Carlo Simulationen Ertragspaare für die Hoch- und Niedrigertragszonen erzeugt werden.

Da in der Realität auch eine Abhängigkeit der Erträge voneinander in den verschiedenen Ertragszonen eines Feldes besteht, wird auch bei der Simulation der Ertragspaare von einer Korrelation ausgegangen. Die Korrelation der Erträge in den beiden Ertragszonen hat zur Folge, dass mit relativ großer Wahrscheinlichkeit bei hohen Erträgen im Hohertrag auch hohe Erträge im Niedrigertrag eintreten. Mit geringeren Eintrittswahrscheinlichkeiten sind aber auch gegensätzliche Erträge zu erwarten, was aus pflanzenbaulicher Sicht durchaus erwünscht ist. Denn bei sehr extremen Witterungsbedingungen (extrem hohe Niederschläge) ist es durchaus vorstellbar, dass auf Niedrigertragsstandorten innerhalb eines Schlages, der eine sehr leichte Bodenstruktur aufweist, ein gleicher oder aber auch höherer Ertrag erzielt werden kann als auf einem schweren Boden, der normalerweise ein höheres Ertragspotenzial aufweist, der aber aufgrund von zu starken Niederschlägen von Ertragsmindernder Staunässe betroffen ist.

Unter Zugrundelegung dieser Annahmen kann eine beliebige Anzahl von Ertragspaaren mit einer vorgegebenen Korrelation für diesen Modellschlag simuliert

werden. Durch die Verwendung eines spezifischen Stickstoffverwertungsfaktors (N-Faktor) nach DABBERT und KILIAN (2002, S. 431) kann die notwendige Stickstoffmenge zum Erzielen der simulierten Erträge abgeschätzt werden. Dazu wird zuerst der N-Faktor nach folgender Formel für einen simulierten Ertrag berechnet.

$$\text{N-Faktor} = 2,945 - 0,0091 * \text{Ertragsziel (Proteingehalt > 12 \%)}$$

Mit Hilfe dieses N-Faktors kann anschließend abgeschätzt werden, wie viel Stickstoff gedüngt werden muss, um den jeweiligen Ertrag zu erzielen. Dazu wird der N-Faktor mit dem Kornertragertrag multipliziert.

Sind auf diese Weise der Kornertrag und die zum Erzielen des Kornertragertrags notwendige Stickstoffdüngermenge für eine Ertragszone ermittelt, können teilflächenspezifische Produktionsfunktionen nach KRAYL (1993) bestimmt werden (siehe Kapitel 4.1.1.2, normierte Produktionsfunktionen).

Mit Hilfe der teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen der Faktor- und Produktpreise ist es jetzt möglich, für beliebig viele Simulationsjahre jeweils die stickstoffkostenfreie Leistung bei einheitlicher<sup>12</sup> und variabler Düngung zu berechnen.

Die berechneten stickstoffkostenfreien Leistungen bei einheitlicher und variabler Düngung stellen die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zielvariablen der beiden Handlungsalternativen dar, die einer Risikoanalyse mittels der Methode der stochastischen Dominanz unterzogen werden sollen.

Analog zu den stickstoffkostenfreien Leistungen werden Stickstoffsalden für beide Düngestrategien berechnet und ebenfalls einer Risikoanalyse unterzogen.

---

<sup>12</sup>Einheitliche Düngung erfolgt nach langjähriger Ertragserwartung

### 5.4.3 Ergebnisse der Risikoanalyse- Modellergebnisse

Mit Hilfe von Versuchsdaten des Forschungsprojektes FAM (Forschungsverbund Agrarökosysteme München) konnten für Hoch- und Niedrigertragsstandorte des Versuchsgutes Scheyern Ertragsmittelwerte und Standardabweichungen für Winterweizen abgeleitet werden. Wie in Tabelle 25 dargestellt, besitzt der Hohertragsstandort einen mittleren Winterweizenertrag von 74 dt/ha bei einer Standardabweichung von 8 dt/ha. Der Niedrigertragsstandort weist einen mittleren Ertrag von 63 dt/ha und 11 dt/ha Standardabweichung auf.

Die niedrigere Standardabweichung des Hohertragsstandortes kann durch höhere Puffereigenschaften erklärt werden, da Hohertragsstandorte widrige Klimaeinflüsse wie z.B. Wassermangel besser ausgleichen können.

**Tabelle 25: Ertragsmittelwerte (dt/ha) und Standardabweichung (dt/ha) für Winterweizen für Hoch- und Niedrigertragszonen**

Standort	Ertragsmittelwert* (dt/ha)	Standardabweichung* (dt/ha)
Hohertrag	74	8
Niedrigertrag	63	11

\*abgeleitet von den Schlägen A15-21 im Zeitraum von 1994 bis 1999 der Versuchsstation Scheyern

**Quelle:** eigene Berechnungen

#### 5.4.3.1 Auswirkungen der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung auf das ökonomische Risiko

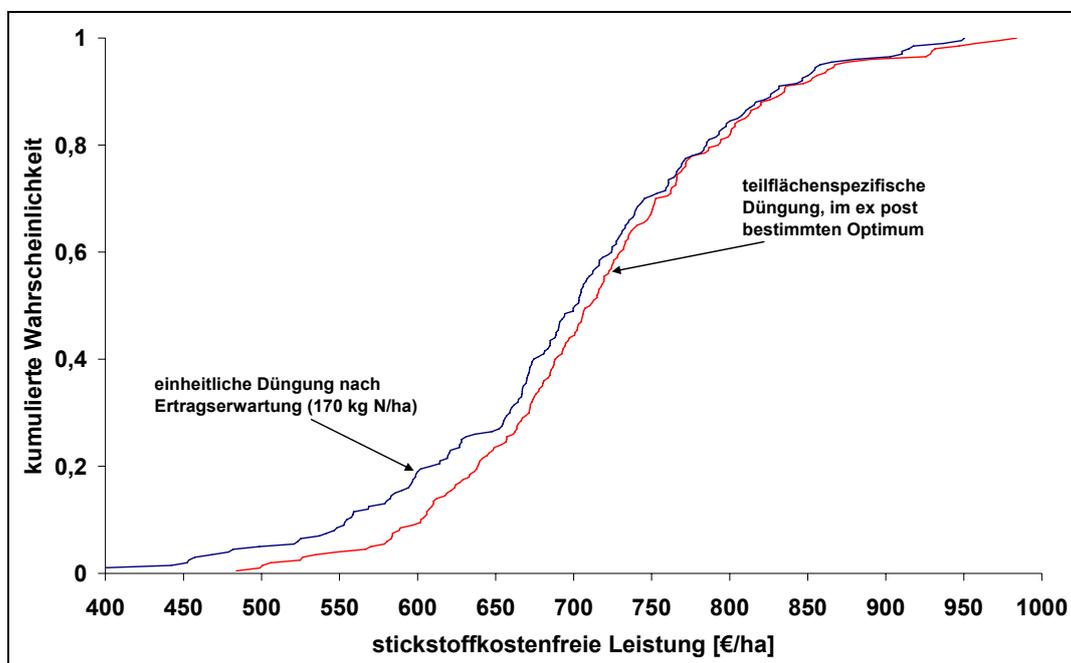
Die kumulierten Verteilungsfunktionen der stickstoffkostenfreien Leistungen bei einheitlicher und variabler Düngung sind für den beschriebenen Modellschlag in Abbildung 19 dargestellt.

Die stickstoffkostenfreie Leistung bei teilflächenspezifischer Düngung ist für den Fall dargestellt, dass genau im ex post bestimmten Optimum gedüngt wird. Bei einheitlicher Bewirtschaftung wird davon ausgegangen, dass nach der langjährigen Ertragserwartung gedüngt wird. Für die einheitliche Stickstoffdüngergabe wird dabei 170 kg N/ha angenommen.

Die beiden Düngezenarien stellen somit aus zwei Gründen eine Extremsituation dar: Erstens kann natürlich nicht davon ausgegangen werden, dass mit Hilfe von

Technologien zur Teilflächenbewirtschaftung das ex post bestimmte Optimum ex ante erreicht werden kann. Zweitens findet auch in der Praxis bei einheitlicher Düngung eine jährliche Anpassung der Stickstoffmenge an die jeweiligen Witterungsverhältnisse statt, was mit diesem Modell aber nicht dargestellt wird. Die folgenden Modellergebnisse stellen somit eine optimistische Situation aus der Sicht der Teilflächendüngung dar.

Aus Abbildung 19 wird deutlich, dass sich die beiden Verteilungsfunktionen der stickstoffkostenfreien Leistungen (NKL) bei einheitlicher und teilflächenspezifischer Düngung in Bezug auf Ihre Spannweite nur geringfügig unterscheiden. Abbildung 19 illustriert, dass mit Precision Farming auf jedem Wahrscheinlichkeitsniveau eine höhere stickstoffkostenfreie Leistung als mit einheitlicher Bewirtschaftung erzielt wird. Daher liegt die NKL-Verteilungsfunktion bei teilflächenspezifischer Düngung immer rechts von der NKL-Verteilungsfunktion bei einheitlicher Düngung, und es tritt keine Überschneidung auf. Somit kann gefolgert werden, dass die NKL-Verteilungsfunktion der teilflächenspezifischen Variante stochastisch dominant ersten Grades über der einheitlichen NKL-Verteilungsfunktion ist.



**Abbildung 19: Kumulierte Wahrscheinlichkeitsfunktionen der stickstoffkostenfreien Leistung bei teilflächenspezifischer und einheitlicher Düngung**

Quelle: eigene Darstellung

Werden dagegen zusätzlich 10 €/ha<sup>13</sup> jährliche Kosten, bedingt durch die Investition in einen Sensor-Ansatz mit berücksichtigt, hat dies zur Folge, dass sich die beiden Verteilungsfunktionen stärker annähern und zum Teil überschneiden. Somit ist keine stochastische Dominanz ersten Grades einer Variante festzustellen (siehe Abbildung 27, Anhang).

Aufgrund der Überschneidung kann jetzt die stochastische Dominanz zweiten Grades geprüft werden. Dabei kann festgestellt werden (siehe Kapitel 4.1.2.3.1), dass die Variante „teilflächenspezifisch“ dominiert, falls der Entscheidungsträger von Risikoaversion geprägt ist. D.h. auch bei der Berücksichtigung der jährlichen Kosten der Investition in einen Sensoransatz ist es auf diesem Schlag aus Risikogesichtspunkten sinnvoll, teilflächenspezifisch zu düngen, wobei der risikomindernde Effekt der Teilflächendüngung aus ökonomischer Sicht insgesamt begrenzt ist. Dies wird dadurch deutlich, dass die langjährige Varianz der stickstoffkostenfreien Leistung der teilflächenspezifischen Variante nicht wesentlich im Vergleich zur einheitlichen Variante verringert werden kann (vgl. Abbildung 19). Zudem können an dieser Stelle auch die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen aus Kapitel 5.1.4 angeführt werden. Hier zeigen die Ergebnisse bezüglich des quadratischen und exponentiellen Ertragsmodells deutlich, dass eine Abweichung von der optimalen speziellen Intensität der Stickstoffdüngung nur geringfügige Konsequenzen bezüglich der stickstoffkostenfreien Leistung nach sich zieht. Folglich wird die Varianz der stickstoffkostenfreien Leistung langfristig durch Abweichungen von der optimalen speziellen Intensität der Stickstoffdüngung nur geringfügig erhöht.

---

<sup>13</sup> 10 €/ha entsprechen den jährlichen zusätzlichen jährlichen Kosten eines Sensor-Ansatzes zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung bei einer Getreidefläche von 500 ha, siehe Kapitel 5.3.

#### **5.4.3.2 Auswirkungen der teilflächenspezifischen N-Düngung auf das Risiko hoher N-Bilanzüberschüsse**

Mit Hilfe des vorgestellten Modells lassen sich wie beschrieben zudem die Stickstoffbilanzsalden bei einheitlicher und teilflächenspezifischer Düngung vergleichen.

Dies geschieht, wie auch bei den stickstoffkostenfreien Leistungen, unter der Annahme, dass bei teilflächenspezifischer Düngung genau im ex post bestimmten Optimum gedüngt wird. Bei einheitlicher Bewirtschaftung wird nach der langjährigen Ertragsersparnis gedüngt. Wichtig für den folgenden Vergleich ist, dass im langjährigen Mittel die schlagdurchschnittlichen Stickstoffdüngergaben annähernd identisch sind. Bei teilflächenspezifischer Düngung werden 161 kg N/ha bei einheitlicher Düngung 170 kg N/ha im Durchschnitt der Jahre ausgebracht.

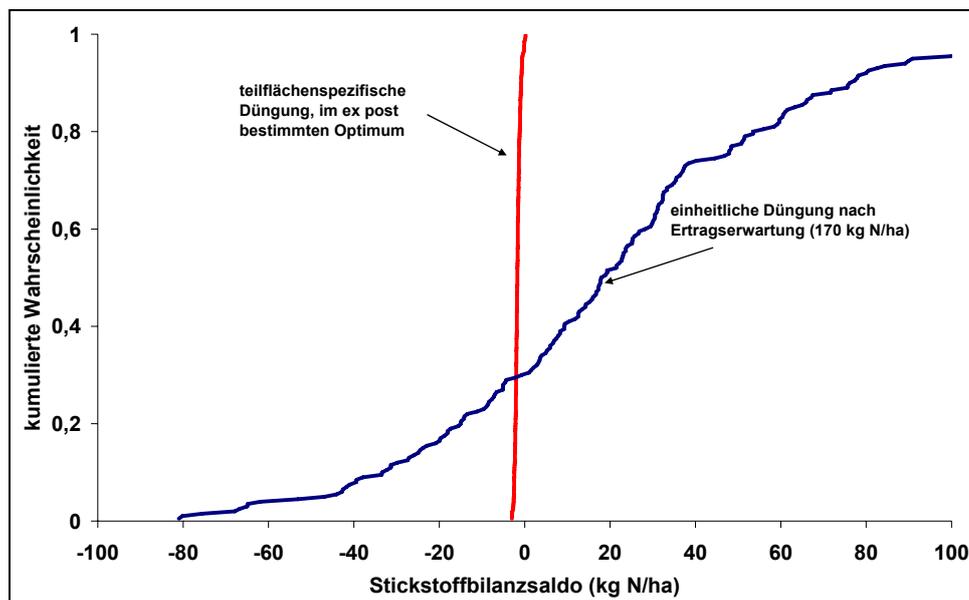
Um die Kriterien der stochastischen Dominanz auf die umweltrelevante Zielgröße Stickstoffbilanzsaldo anwenden zu können, werden für die Berechnungen die N-Salden mit  $-1$  multipliziert werden. Diese Transformation muss durchgeführt werden, da beim Konzept der stochastischen Dominanz davon ausgegangen wird, dass mit höheren Werten der jeweiligen Zielgröße auch ein höherer Nutzen verbunden ist. Im Fall des Stickstoffbilanzsaldos als relevante Zielgröße ist es aber genau umgekehrt. Hier sinkt der Nutzen mit höheren N-Bilanzsalden und steigt mit niedrigeren Bilanzsalden.

In Abbildung 20 sind die Verteilungsfunktionen der N-Salden bei einheitlicher (170 kg N/ha) und variabler Düngung ( $N_{opt}$ ) dargestellt.

Wie aus Abbildung 20 deutlich wird, führt eine Prüfung der stochastischen Dominanz ersten Grades zu keiner Differenzierung, da sich die beiden Verteilungsfunktionen überschneiden. Die Risikoanalyse mit Hilfe der Kriterien der stochastischen Dominanz zweiten Grades ergibt, dass die Verteilungsfunktion der N-Salden der teilflächenspezifischen Strategie stochastisch dominant zweiten Grades über der Verteilungsfunktion der einheitlichen Düngestrategie ist.

Ein Vergleich der Erwartungswerte der N-Salden zeigt, dass bei einheitlicher Düngung ein mit 20 kg N/ha höherer durchschnittlicher N-Saldo auftritt als bei

variabler Düngung mit  $-2 \text{ kg N/ha}$ . Aus Umweltgesichtspunkten ist jedoch weniger der langjährige Erwartungswert des Stickstoffbilanzsaldos entscheidend, bei dem unter Umständen sehr hohe Stickstoffbilanzüberschüsse mit negativen Stickstoffbilanzsalden verrechnet wurden. Entscheidend für das Ausmaß der Umweltbelastung ist die Anzahl bzw. die Häufigkeit der Jahre mit hohen positiven Stickstoffbilanzsalden. Hier zeigen die Modellergebnisse, dass der Vorteil der teilflächenspezifischen ökonomisch optimierten Stickstoffdüngung nicht nur aus dem geringeren Erwartungswert der N-Bilanzsalden besteht, sondern auch aus der geringen Varianz der N-Salden, wie aus Abbildung 20 grafisch deutlich wird. Aufgrund der geringeren Varianz der Stickstoffbilanzsalden treten bei teilflächenspezifischer Düngung im Gegensatz zur einheitlichen Düngung seltener Jahre mit hohen Stickstoffbilanzüberschüssen auf. Aus Umweltgesichtspunkten (gemessen am Stickstoffbilanzsaldo) ist es somit durch eine teilflächenspezifisch ökonomisch optimierte Stickstoffdüngung möglich, das Risiko hoher Stickstoffbilanzüberschüsse zu verringern.



**Abbildung 20: Kumulierte Verteilungsfunktionen der N-Salden bei einheitlicher und variabler Düngung.**

Quelle: eigene Darstellung

Die mit Hilfe des Modells berechneten N-Salden erscheinen relativ niedrig. Dies ist dadurch zu erklären, dass bei der Bilanzierung nur die mineralische Stickstoffdüngung als Input betrachtet wird. Für die Modellkalkulationen ist dies jedoch nicht nachteilig, da sich die betrachteten Bewirtschaftungssysteme nur in

Bezug auf die Höhe und Verteilung der mineralischen N-Düngung unterscheiden. Es ist nicht davon auszugehen, dass sich andere Posten der N-Bilanz, wie z.B. die Mineralisierung auf Grund der unterschiedlichen Düngestrategien, grundlegend ändern.

Die modellierten N-Salden bei der teilflächenspezifischen Variante sind wie bereits erläutert für den Fall berechnet worden, dass die ex post bestimmten optimalen speziellen Intensitäten ex ante durch entsprechende Technologien auch erreicht werden.

Da in der Praxis nicht davon ausgegangen werden kann, dass mit Precision Farming Techniken das jeweilige Optimum genau getroffen wird, wird sich auch hier in der Realität eine größere Varianz der Stickstoffbilanzsalden einstellen. Es kann jedoch trotzdem davon ausgegangen werden, dass aufgrund der vielfältigen Informationsgrundlagen, die im Precision Farming Verwendung finden, das ökonomische Optimum ex ante mit größerer Wahrscheinlichkeit erreicht werden kann, als bei einheitlicher Bewirtschaftung ohne diese Zusatzinformationen. Dies führt dann unweigerlich zu einer geringeren Varianz bei den N-Salden.

Dieser Umstand könnte beispielsweise in Wasserschutzgebieten gezielt genutzt werden. Folgendes Beispiel soll dies näher verdeutlichen:

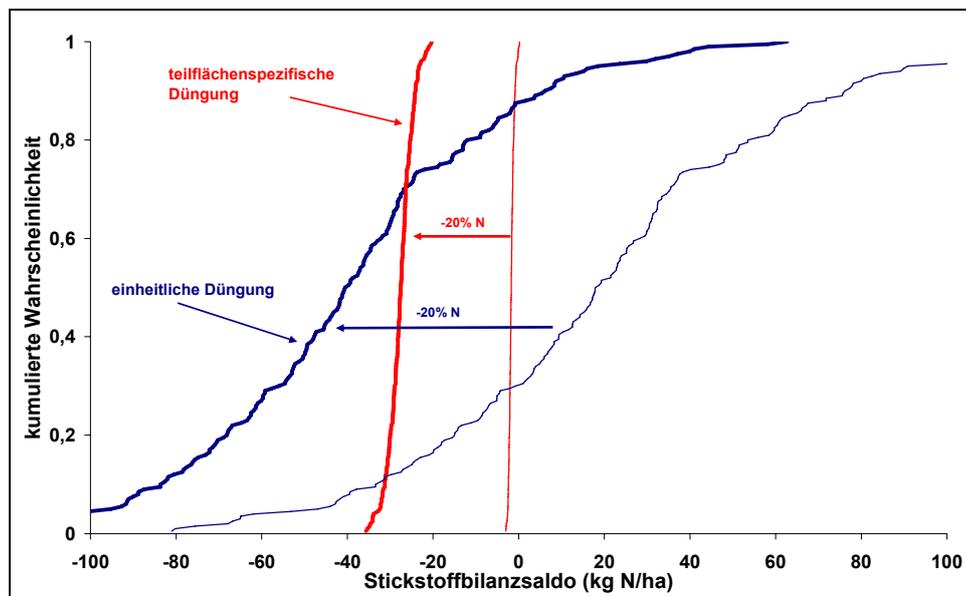
Mit Hilfe des YARA-N-Sensors® ist es möglich, neben der normalen ökonomisch optimierten Einstellung auch eine Einstellung vorzunehmen, die eine um 20% reduzierte Düngung (ausgehend von der optimierten Ausgangssituation) ermöglicht (vgl. KILIAN und GRABO, 2002).

In Abbildung 20 ist daher folgendes Szenario dargestellt: Ausgehend von dem in Abbildung 19 dargestellten Szenario werden jetzt für die beiden untersuchten Düngevarianten (einheitlich und teilflächenspezifisch) die Stickstoffbilanzsalden für den Fall berechnet, dass jeweils eine Reduzierung der Stickstoffdüngung um 20% vorgenommen wird.

Bei Betrachtung der Verteilungsfunktionen des Stickstoffbilanzsaldos in Abbildung 21 für die einheitliche Düngung wird deutlich, dass zwar der Erwartungswert der N-Salden über die Jahre durch eine reduzierte Stickstoffdüngung wesentlich gesenkt

werden kann, die Standardabweichung aber nahezu unverändert bleibt. Folglich treten selbst bei einer reduzierten einheitlichen Stickstoffdüngung immer noch in einigen Jahren hohe auswaschungsgefährdete Stickstoffbilanzüberschüsse auf. Mit der teilflächenspezifisch reduzierten Stickstoffdüngung gelingt es dagegen wesentlich besser, das System auf einen bestimmten tolerierbaren Überschuss „einzustellen“, der über die Jahre auch mit einer sehr kleinen Abweichung eingehalten werden kann (siehe Abbildung 21).

Wäre eine Ausgleichszahlung beispielsweise in Wasserschutzgebieten an eine 20% reduzierte Stickstoffdüngung (ausgehend vom betriebsüblichen Niveau) gebunden, so hätte die teilflächenspezifische Strategie in diesem Fall den Vorteil, dass bei einer reduzierten N-Düngung der angestrebte reduzierte N-Saldo auch über die Jahre wesentlich gezielter erreicht wird, d.h. mit einer kleineren Standardabweichung als bei einheitlicher Düngung. Zudem ist es relativ unproblematisch, wenn bereits Technologien zur Teilschlagdüngung vorhanden sind, die ausgebrachte Stickstoffmenge ortsspezifisch zu dokumentieren, und mit den Erträgen der automatischen Ertragserfassung zu verrechnen. Dies ermöglicht eine immer wieder diskutierte Dokumentation der Stickstoffbilanzsalden auf Schlag- oder sogar auf Teilschlagebene, wie in Abbildung 28 im Anhang dargestellt.



**Abbildung 21: Veränderung der Stickstoffbilanzsalden bei einer Reduzierung der Stickstoffdüngergaben um 20%**  
 Quelle: eigene Darstellung

#### 5.4.4 Zwischenfazit Risikoanalysen

Die Ausführungen machen deutlich, dass eine ökonomische Risikoanalyse von verschiedenen Düngestrategien anhand der Kriterien der stochastischen Dominanz zu schlüssigen Ergebnissen führt. Verhalten sich Standorte langfristig so, wie die betrachteten Flächen in Scheyern in Bezug auf den (langjährigen) mittleren Ertrag und dessen Standardabweichung, dann kann der Teilflächenbewirtschaftung einer einheitlichen Bewirtschaftung unter Annahme von Risikoaversität aus ökonomischen Gesichtspunkten der Vorzug gegeben werden. Hierbei ist der ökonomisch risikomindernde Effekt, z.B. durch Vermeidung von Lagergetreide aufgrund zu hoher Stickstoffgaben oder durch Vermeidung von Ertragseinbußen durch zu geringe Stickstoffgaben, insgesamt gesehen gering. Dies ist vor allem im flachen Verlauf der Produktionsfunktionen begründet. Eine vom ökonomischen Optimum abweichende Stickstoffdüngung führt daher meist nur zu geringen Naturalertragsverlusten und erhöht die Varianz des Naturalertrags und damit das Risiko nur geringfügig.

Auch eine „ökologische“ Risikoanalyse von verschiedenen Düngestrategien anhand der Kriterien der stochastischen Dominanz ersten und zweiten Grades führt zu schlüssigen Ergebnissen. Aufgrund der Modellkalkulationen kann abgeleitet werden, dass es mit Hilfe der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung gelingt, das Risiko hoher Stickstoffbilanzüberschüsse zu reduzieren. Besonders in Wasserschutzgebieten ist somit das Potenzial vorhanden, durch eine reduzierte teilflächenspezifische N-Düngung, die zudem sicher dokumentiert werden kann, das System auf einen langfristig maximal tolerierbaren Stickstoffbilanzsaldo „einzustellen“.

## **6 Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerungen**

Im Rahmen dieser Arbeit werden Ansätze zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung einer ökonomischen Bewertung unterzogen sowie hinsichtlich umweltrelevanter Auswirkungen beleuchtet. In diesem Zusammenhang muss beachtet werden, dass die angesprochenen Precision Farming Technologien erst am Anfang ihrer Entwicklung stehen.

Somit ist das primäre Ziel dieser Arbeit auch darin zu sehen, eine schlüssige Bewertungsmethodik darzustellen, die es erlaubt, auf die Besonderheiten dieser Technik einzugehen. Dazu gehört beispielsweise, geeignete Versuchsdesigns und Auswertungsmöglichkeiten vorzuschlagen, mit deren Hilfe Teilschlagtechniken mit einheitlichen Bewirtschaftungsstrategien unter heterogenen Standortverhältnissen verglichen werden können.

Ein weiteres Ziel besteht darin, für den derzeitigen Entwicklungsstand eine Zwischenbilanz in ökonomischer und ökologischer Sicht zu ziehen. Hierbei ist zu beachten, dass neu entwickelte Technologien am Anfang immer gewisse Probleme bereiten, und die anfangs erwarteten Wirkungen meist erst nach längerer Entwicklungszeit beurteilt werden können.

### **6.1 Diskussion der Produktionsfunktionsanalyse zur Ableitung teilflächenspezifischer optimaler spezieller Intensitäten**

Produktionsfunktionen sind der Schlüssel zum Verständnis der Auswirkungen einer teilflächenspezifischen Applikation von Betriebsmitteln. Es stellt sich jedoch die Frage, welche der verschiedenen Produktionsfunktionen zur Klärung dieses Sachverhalts zutreffender sind – in der aktuellen Diskussion befinden sich linear limitationale Funktionen bzw. Funktionsverläufe, die einen ertragsgesetzlichen Verlauf zeigen.

WAGNER (1995, S. 307 f.) berichtet in diesem Zusammenhang von einer Reihe von Studien, die zu folgendem Schluss kommen: es gibt keine eindeutige Rechtfertigung dafür, die Funktionen, die einen ertragsgesetzlichen Verlauf zeigen, gegenüber den linear limitationalen Funktionen vorzuziehen. WAGNER (1999, S. 40 ff.) geht weiterhin

davon aus, dass mit zunehmend homogeneren Managementeinheiten, wie dies bei der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung angestrebt wird, der Funktionsverlauf immer mehr einen linear limitationalen Verlauf aufweisen könnte. WATKINS et al. (1998, S. 411 ff.) beschäftigen sich im Rahmen einer Simulationsstudie auch mit der Wahl teilflächenspezifischer Produktionsfunktionen und kommen jedoch zu dem Schluss, dass eine quadratische Funktionsform die beste Kurvenanpassung und die realistischsten optimalen speziellen Intensitäten zeigt.

Um die Frage nach der „richtigen“ teilflächenspezifischen Produktionsfunktion im Zuge dieser Arbeit zu beantworten, wurden drei verschiedene Regressionsmodelle (quadratische, exponentielle und linear limitationale) hinsichtlich verschiedener Merkmale verglichen. Dies scheint besonders wichtig, da sich die derzeitigen Forschungsanstrengungen in diesem Bereich mehr darauf konzentrieren, quadratische Produktionsfunktionen durch die Anwendung räumlicher ökonometrischer Methoden exakter zu schätzen (vgl. MATELA et al. 2004; HURLEY et al. 2004; LAMBERT et al. 2002, MEYER-AURICH und LOWENBERG-DEBEOR, 2001 bzw. BONGIOVANNI und LOWENBERG-DEBOER 2001). Diese Arbeiten vernachlässigen aber die Diskussion, welche Auswirkungen unterschiedliche Funktionsformen auf die abgeleiteten Potenziale der Teilflächenbewirtschaftung haben (vgl. dazu auch WATKINS et al. 1998, S. 412 f.).

Eine detaillierte Analyse der Residuen auf Autokorrelation, Normalverteilung und Homoskedastizität ergibt, dass das exponentielle Ertragsmodell für den untersuchten Standort (Versuchsschlag Sieblerfeld) aus ökonometrischer Sicht weniger geeignet ist als das quadratische oder linear limitationale Modell. Die quadratischen und linear limitationalen Produktionsfunktionen genügen dagegen den meisten Modellannahmen der Regressionsanalyse (Methode der kleinsten Abstandsquadrate). Auch aufgrund der Bestimmtheitsmasse kann nicht auf die eindeutige Vorteilhaftigkeit eines der drei Modelle geschlossen werden.

Die berechneten teilflächenspezifischen Optima zeigen mit einer Ausnahme für alle drei Regressionsmodelle und für beide Untersuchungsjahre, dass es aus ökonomischer Sicht günstig ist, Hohertragszonen höher und Niedrigertragszonen niedriger zu düngen, wobei dies in Bezug auf die Stickstoffgesamtmenge gilt. Bei der ersten Stickstoffgabe zeigen Versuchsergebnisse von HEGE und OFFENBERGER

(2005, S. 35) bzw. WEIGERT (2005, unveröffentlicht), dass schlechte Standorte höher als gute Standorte gedüngt werden sollten. Beim Vergleich der verschiedenen Regressionsmodelle wird deutlich, dass die optimalen speziellen Intensitäten beim linear limitationalen Modell wesentlich niedriger sind als bei den beiden anderen Modellen (quadratisch und exponentiell). Zu diesem Schluss kommen auch CERRATO und BLACKMER (1990, S. 142) sowie WAGNER (1999, S. 39 f.).

Schließlich zeigen die Residuenanalyse sowie die abgeleiteten optimalen speziellen Intensitäten der verschiedenen Regressionsmodelle keinen eindeutigen Hinweis darauf, welches der drei untersuchten Ertragsmodelle zutreffender ist. Vielmehr liegen alle berechneten optimalen speziellen Intensitäten innerhalb eines realistischen Bereichs.

Es könnte aber gefolgert werden, dass die Optima, die mit dem linear limitationalen Modell geschätzt werden, die untere Grenze, und die mit neoklassischen Verläufen die obere Grenze eines Bereichs darstellen, innerhalb dem sich das „wahre“ ökonomische Optimum bewegt. Dies kann gefolgert werden, da in den meisten Fällen bei Stickstoffgaben die niedriger sind, als die mit linear limitationalen Funktionen geschätzten Optima, die Kornerträge rückläufig sind, wie dies auch Abbildung 11 illustriert. Düngergaben, die höher sind als die mit quadratischen oder exponentiellen Ertragsfunktionen geschätzten Optima sind dagegen aus Sicht der guten fachlichen Praxis, bei der sich die Düngung am Entzug orientieren soll, in den meisten Fällen zu hoch und auch aus ökonomischer Sicht nicht mehr sinnvoll.

Insgesamt spiegelt die beschriebene Uneindeutigkeit bei der Wahl des Ertragsmodells auch die seit langem vorhandenen Optimierungsprobleme bei der Stickstoffdüngung wieder (vgl. CERRATO und BLACKMER, 1990).

In diesem Zusammenhang muss auch das Konfidenzintervall für die optimale spezielle Intensität diskutiert werden. Es kann gezeigt werden, dass ein hohes Bestimmtheitsmaß des Regressionsmodells nicht zwangsläufig ein Zeichen dafür ist, dass die berechnete optimale spezielle Intensität innerhalb eines kurzen Vertrauensintervalls liegen muss. In beiden Versuchsjahren sind am Versuchsschlag Sieblerfeld die Vertrauensintervalle um  $N_{opt}$  sehr lang, wie dies bereits die sehr flach verlaufenden Funktionen der stickstoffkostenfreien Leistung und die Untersuchung der verschiedenen Ertragsmodelle haben vermuten lassen.

Es muss davon ausgegangen werden, dass die optimale spezielle Intensität der Stickstoffdüngung nicht auf einen Punkt beschränkt ist, sondern es sich um eine Bandbreite handelt (dies spiegelt sich auch in der Unsicherheit bezüglich des „richtigen Ertragsmodells“ wider), in welcher der Grenzerlös der Stickstoffdüngung immer mehr oder weniger dem Grenzertrag entspricht. Mit anderen Worten bedeutet dies, dass es einen größeren Bereich gibt, in dem man für den zusätzlich eingesetzten Stickstoffdünger in gleicher Höhe mit zusätzlichem Ertrag entlohnt wird. Welche Konsequenzen müssen aus den langen und sich teilweise überschneidenden Vertrauensintervallen für die geschätzten teilflächenspezifischen optimalen Intensitäten gezogen werden?

Tritt der Fall auf, dass trotz unterschiedlicher teilflächenspezifischer Ertragspotenziale jede Ertragszone mit derselben Stickstoffmenge im ökonomischen Optimum gedüngt werden kann, dann hätte dies zur Folge, dass eine teilflächenspezifische Stickstoffdüngung keine bzw. nur geringe ökonomische Vorteile mit sich bringen würde. Dieser Sachverhalt ist eine Erklärung dafür, dass die anfangs erhofften ökonomischen Vorteile der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung von Winterweizen nur selten in der Praxis erreicht werden konnten. Auch PANNELL (2004, S. 6) führt die oft geringen ökonomischen Vorteile der Teilflächenbewirtschaftung am Beispiel der Herbizidapplikation und Kalkung auf die flach verlaufenden „payoff functions“ (z.B. Funktion der stickstoffkostenfreien Leistung) zurück. Insgesamt führt die dargestellte Produktionsfunktionsanalyse zu einem besseren Verständnis der teilflächenspezifischen Reaktion des Ertrags auf die Stickstoffdüngung. Mit Hilfe der untersuchten Ertragsmodelle gelingt es somit, Spannen aufzuzeigen, innerhalb welcher sich die ökonomischen Optima bewegen können.

## **6.2 Diskussion der Potenzialberechnungen und Sensitivitätsanalysen**

LAMBERT und LOWENBER-DEBOER (2000, S. 22) stellen bei der Auswertung von 108 Studien fest, dass der Anteil von Studien, die positive ökonomische Auswirkungen der Teilflächenbewirtschaftung zeigen, bei denen, die auf Produktionsfunktionsanalysen basieren um 10% höher ist, als bei Studien die auf Feldversuchen beruhen. Dies ist auch weiterhin nicht verwunderlich, da bei Analysen basierend auf Produktionsfunktionen meist davon ausgegangen wird, dass die ex

post bestimmten teilflächenspezifischen optimalen Intensitäten ex ante mit Precision Farming Technologien genau erreicht werden. Wichtig für die Einordnung der folgenden Potenzialberechnungen ist aber, dass diese aufgrund des beschriebenen Sachverhalts eine optimistische Einschätzung in Bezug auf die Vorteilhaftigkeit der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung darstellen.

Die Anwendung des entwickelten Bewertungsmodells auf die Daten zweier Stickstoffsteigerungsversuche eines Schlages mit zwei ausgeprägten Ertragszonen zeigt, dass das ex post bestimmte ökonomische Potenzial einer teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung zum einen jährlichen Schwankungen unterworfen ist. Zum anderen üben das zugrunde gelegte Regressionsmodell zur Schätzung der Ertragsfunktion sowie die Wahl der einheitlichen Referenzdüngung einen entscheidenden Einfluss auf die modellierten Potenziale aus. Abhängig von der einheitlichen Referenzdüngung liegt das Potenzial für den Modellschlag in den zwei untersuchten Versuchsjahren zwischen 0 und 62 €/ha. Die relativ hohen Vorteile bei Annahme der linear limitationalen Produktionsfunktionen beruhen darauf, dass bei diesem Modell die teilflächenspezifischen optimalen speziellen Intensitäten wesentlich niedriger sind als die beiden einheitlich betrachteten Referenzdüngungen. D.h. der ökonomische Vorteil der Teilflächenbewirtschaftung beruht bei diesem Modell mehr darauf, dass durch kleinräumige Informationen erkannt wird, dass die betriebsübliche Intensität zu hoch ist, als auf der kleinräumigen Variation der Stickstoffgaben.

DABBERT und KILIAN (2002, S. 438) führen auch auf der Basis von Produktionsfunktionen Potenzialberechnungen für die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung von Winterweizen durch und finden in Abhängigkeit von der Standortheterogenität ein ähnliches Potenzial zur Steigerung des Deckungsbeitrages zwischen 5 und ca. 45 €/ha. HURLEY et al. (2004) und LAMBERT et al. (2002) führen ebenfalls Potenzialberechnungen anhand teilflächenspezifischer Ertragsfunktionen durch, allerdings nicht zu Weizen, sondern zu Mais. Aber auch bei dieser Kultur bewegt sich das Potenzial zur Steigerung des Deckungsbeitrages im Bereich von wenigen Euro je Hektar.

Die umweltrelevanten Potenziale der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung werden anhand des Stickstoffbilanzsaldos abgeschätzt. Die Spanne der möglichen

Ergebnisse ist dabei groß und, wie auch bei den ökonomischen Potenzialen, von der einheitlichen Referenzdüngung, dem Regressionsmodell, und dem Versuchsjahr abhängig. Die Modellergebnisse zeigen, dass durch eine ökonomisch optimierte teilflächenspezifische Stickstoffdüngung der Stickstoffbilanzsaldo im Vergleich zur einheitlichen Düngung in der Niedrigertragszone wesentlich reduziert werden kann. Dieser Effekt ist aus Umweltgesichtspunkten hervorzuheben, da speziell in Niedrigertragsbereichen Stickstoffbilanzüberschüsse aufgrund der meist leichteren Böden besonders auswaschungsgefährdet sind. In der Hohertragszone führt eine ökonomisch optimierte teilflächenspezifische Stickstoffdüngung meist zu höheren Stickstoffgaben (bei Annahme der exponentiellen und quadratischen Produktionsfunktionen) als eine einheitliche Düngestrategie, wodurch die Stickstoffbilanzsalden bei teilflächenspezifischer Düngung im Vergleich zur einheitlichen in der Hohertragszone teilweise ansteigen. Da die Stickstoffbilanzsalden bei einer teilflächenspezifisch optimierten N-Düngung im Hohertrag, mit Ausnahme bei Annahme der quadratischen Produktionsfunktionen, sich immer noch im negativen Bereich bewegen, ist dies aus Sicht der Umweltbelastung nicht problematisch.

Studien von anderen Autoren zeigen sehr unterschiedliche Ergebnisse hinsichtlich der umweltrelevanten Vorteile der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung. REICHE et al. (2002, S. 367) berichten von Szenariorechnungen mit dem Modell WASMOD für zwei Standorte, dass mit teilflächenspezifischer Stickstoffdüngung von Winterweizen die Nitratsickerwasserverluste um 8 bis 12 kg N/ha und Jahr reduziert werden können. Dabei wird bei einheitlicher und teilflächenspezifischer Düngung schlagdurchschnittlich gleich viel Stickstoff appliziert. EBERTSEDER et al. (2003) zeigen, dass durch die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung von Winterweizen die Stickstoffeffizienz verbessert werden kann. Es ist aber ebenso möglich, dass durch Precision Farming keine Verbesserung der Umweltbelastung eintritt, wie dies auch bei den in dieser Arbeit durchgeführten Modellrechnungen teilweise der Fall ist. Dies zeigt beispielsweise eine Studie von WATKINS et al. (1998, S. 401), die mit Hilfe eines Pflanzenwachstumsmodells bei Kartoffeln keine Reduktion der Nitratauswaschung mit teilflächenspezifischer Stickstoffdüngung nachweisen konnten. REDULLA et al. (1996, S. 1110) geben ein weiteres Beispiel dafür, dass es durch

teilflächenspezifische Stickstoffdüngung nicht zwangsläufig zu einer Verringerung der Umweltbelastung kommen muss. Sie konnten bei Mais weder eine signifikant höhere N-Effizienz noch eine signifikant niedrigere N-Auswaschung durch die Teilschlagdüngung feststellen.

Folgende zwei Ansätze müssen unterschieden werden, um die große Spanne der Umweltwirkungen der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung erklären zu können:

1. Die Düngergaben sind bei einheitlicher und teilflächenspezifischer Bewirtschaftung im Schlagdurchschnitt gleich. Der primäre, positive Effekt der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung wird bei dieser Vorgehensweise vielfach darin gesehen, in auswaschungsgefährdeten Niedrigertragsbereichen durch eine Reduzierung der Stickstoffdüngung die Umweltbelastung zu vermindern. Der eingesparte Stickstoff wird dann auf Hohertragsstandorten zusätzlich ausgebracht, um dort ein evtl. bei einheitlicher Düngung ungenutztes Ertragspotenzial auszuschöpfen. Insgesamt sind bei diesem Ansatz die schlagdurchschnittlichen Stickstoffmengen bei einheitlicher und teilflächenspezifischer Düngung identisch. Der umweltentlastende Effekt beruht damit rein auf der Umverteilung des Stickstoffdüngers.

2. Die Düngergaben sind bei einheitlicher und teilflächenspezifischer Bewirtschaftung im Schlagdurchschnitt unterschiedlich. Ist der Düngealgorithmus so ausgelegt, dass sich die schlagdurchschnittlichen Stickstoffmengen bei einheitlicher und teilflächenspezifischer Düngung unterscheiden können, so sind zusätzlich zu im Punkt 1 beschriebenen Umverteilungseffekt folgende Auswirkungen möglich:

Wird durch den Einsatz von Precision Farming Technologien erkannt, dass das einheitliche betriebsübliche Düngeniveau zu hoch ist, so führt die Teilflächendüngung durch eine insgesamt niedrigere Intensität noch zu einer weiteren Verminderung der Umweltbelastung, die über den Umverteilungseffekt hinausgeht.

Es kann aber auch der Fall eintreten, so wie dies die Modellkalkulationen mit den exponentiellen und quadratischen Produktionsfunktionen für das Jahr 2004 zeigen, dass die einheitliche Intensität zu niedrig gewählt ist. Dies hat dann zur Folge, dass

bei teilflächenspezifischer Düngung höhere Düngergaben appliziert werden als bei einheitlicher Düngung, was dann zu einer höheren Umweltbelastung führt. Der Einsatz von Precision Farming Technologien führt somit nicht per se zu einer Verbesserung der Umweltbelastung.

Die in Kapitel 5.1.4 durchgeführten Sensitivitätsanalysen zeigen, dass aufgrund der flach verlaufenden Funktionen der stickstoffkostenfreien Leistungen beim exponentiellen und quadratischen Ertragsmodell ex ante Abweichungen vom ex post bestimmten Optimum nur geringfügige ökonomische Konsequenzen nach sich ziehen. Bei Annahme des linear limitationalen Modells wirken sich Abweichungen dagegen stärker negativ aus. Auch in diesem Zusammenhang spricht das relativ lange Vertrauensintervall um  $N_{opt}$  dafür, dass Abweichungen in der Praxis ökonomisch nicht zu schwerwiegend ausfallen dürften.

### **6.3 Diskussion der Feldversuche**

Modellierte Potenziale der Teilflächenbewirtschaftung können durch Streifenversuche empirisch überprüft werden. Dabei ist es bei der Diskussion dieser Streifenversuche, in denen teilflächenspezifische Ansätze zur Stickstoffdüngung untersucht werden, zum einen wichtig, zwischen Mapping-, Sensor- bzw. einer Kombination aus beiden Ansätzen zu unterscheiden. Zum anderen muss für die einzelnen Ansätze zusätzlich beachtet werden, welche Ziele jeweils angestrebt werden.

Ein Mapping-Ansatz kann beispielsweise primär darauf ausgelegt sein, mit weniger Stickstoff denselben Ertrag zu erzielen als bei einheitlicher Bewirtschaftung. Im Gegensatz dazu wird im IKB-Projekt versucht, mit derselben Stickstoffmenge wie bei einheitlicher Düngung durch geschickte Umverteilung einen Mehrertrag zu erzielen. Ziel von manchen Sensor-Ansätzen ist es, einen Mehrertrag zu erlangen, unabhängig von der Stickstoffmenge die dazu nötig ist. Dazu ist der Düngealgorithmus beispielsweise so ausgelegt, dass an Standorten, an denen wenig Biomasse gemessen wird, viel Stickstoff, und dort, wo viel Biomasse gemessen wird, wenig Stickstoff ausgebracht wird. Somit wird deutlich, dass es nicht den „Mapping“- oder „Sensor“-Ansatz gibt, sondern diese sich in Bezug auf die jeweilige Zielstellung

stark voneinander unterscheiden. Dies macht folglich die Ergebnisse schwer vergleichbar, besonders im Hinblick auf umweltrelevante Effekte.

### **Mapping-Ansatz**

Die Auswertung der zwei im IKB-Projekt durchgeführten Streifenversuche, in denen ein Mapping-Ansatz untersucht wurde, zeigt, dass es mit diesem Ansatz, der auf historischen Ertragsdaten beruht, nur im Jahr 2002 gelungen ist, einen höheren Ertrag (1,1 dt/ha) als mit einheitlicher Düngung zu erzielen. Bei beiden Düngesystemen wird dabei durchschnittlich gleich viel Stickstoff ausgebracht. Qualität (Proteingehalt) und Stickstoffbilanzsaldo konnten nicht verbessert werden. Im zweiten Versuch im Jahr 2004 wurde dagegen mit dem Mapping-Ansatz ein um 0,8 dt/ha leicht niedrigerer Ertrag erzielt als bei einheitlicher Düngung.

GODWIN et al. (2003, S. 535) kommen bei einem Mapping-Ansatz, bei dem eine ähnliche teilflächenspezifische Düngeregulierung angewendet wird wie beim IKB Mapping-Ansatz, zu ähnlichen Ergebnissen. Für die Kulturen Weizen und Gerste ermitteln sie bezüglich der stickstoffkostenfreien Leistung einen Verlust von ca. 8 £/ha (ca. 12 €/ha) durch teilflächenspezifische Stickstoffdüngung. Wird jedoch der Mapping-Ansatz so verfolgt, dass die Hoch- und Mitteltragszonen wie bei einheitlicher Bewirtschaftung gedüngt werden, und die Niedrigertragszonen mit 25-30% mehr Stickstoff, dann kann im Vergleich zur einheitlichen Düngung ca. 8 £/ha (ca. 12 €/ha) mehr erzielt werden (vgl. GODWIN et al. 2003, S. 535). WELSH et al. (2003) kommen nach dreijährigen Untersuchungen zu dem Schluss, dass ein Mapping-Ansatz, basierend auf historischen Ertragskarten bei Winterweizen nicht geeignet ist, um die Stickstoffdüngung teilflächenspezifisch anzupassen. EBERTSEDER et al. (2003, S.195 ff.) testete bei Winterweizen einen Mapping-Ansatz, bei dem im Mitteltrags das einheitliche Düngenniveau appliziert wird, und die Hoch- und Niedrigertragsbereiche mit einer reduzierten Stickstoffgabe versorgt werden. Auch mit diesem Ansatz konnte kein Mehrertrag im Vergleich zur einheitlichen Düngung erzielt werden, es musste im Gegenteil eine leichte, nicht signifikante Ertragsminderung von ca. 1 dt/ha hingenommen werden. Da jedoch die schlagdurchschnittliche Stickstoffmenge beim Mapping-Ansatz geringer war, konnte die Stickstoffeffizienz um 3 Prozentpunkte verbessert werden.

Es wird deutlich, dass sich die gefundenen Ergebnisse aus Feldversuchen mit den Ergebnissen aus der Literatur weitgehend decken. Es stellt sich jedoch die Frage, warum die erhofften und theoretisch modellierten Vorteile dieses Einsatzes in der Praxis nicht zufrieden stellend realisiert werden können.

Ein Hinweis dafür ist bei BULLOCK et al. (2002, S. 242) zu finden. Es wird in dieser Studie basierend auf teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen festgestellt, dass der Vorteil der Teilflächenbewirtschaftung bei der Verwendung von einer größeren Menge kleinräumiger Informationen steigt. Einen weiteren Hinweis geben BLACKMORE et al. (2003, S. 458 f.). Sie stellen auf den untersuchten Flächen fest, dass sich einjährige Ertragsunterschiede über die Jahre ausgleichen. Einjährige Ertragskarten zeigen demnach zwar eine deutliche Heterogenität, werden jedoch viele dieser Karten mit einander verschnitten, so zeigt der Schlag ein homogenes Ertragsmuster. Eine weitere Erklärung dafür sind die langen, sich teilweise überschneidenden Vertrauensintervalle um die teilflächenspezifischen optimalen speziellen Intensitäten sowie die flachen teilflächenspezifischen Funktionen der stickstoffkostenfreien Leistungen (vgl. Ergebnisse der Produktionsfunktionsanalyse).

### **Mapping- mit Online Overlay-Ansatz**

Im Gegensatz zum reinen Mapping-Ansatz, wie er oben diskutiert wurde, gelingt es mit dem Mapping- mit Online Overlay-Ansatz durch zusätzliche Sensorinformationen, die das aktuelle Geschehen in der Vegetationsperiode widerspiegeln, in zwei der drei durchgeführten Streifenversuchen, eine höhere stickstoffkostenfreie Leistung zu erzielen als bei einheitlicher Düngung. In Bezug auf die Stickstoffbilanzsalden unterscheiden sich die beiden Düngesysteme jedoch kaum. Die Ergebnisse zeigen somit, dass eine Kombination verschiedener teilflächenspezifischer Informationen in ökonomischer Hinsicht viel versprechend ist. Diese Ergebnisse stellen jedoch nur eine erste Zwischenbilanz einer im IKB neu entwickelten Entscheidungsregel zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung dar.

Auch EBERTSEDER et al. (2003, S. 198) kommen bei ihrer Studie zu derselben Schlussfolgerung, nämlich dass eine Kombination von verschiedenen teilflächenspezifischen Informationen zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung im Vergleich zu einem reinen Mapping Ansatz viel versprechend ist. Auch MAIDL et

al. (2004, S. 1944) können mit einem kombinierten Mapping- mit Online Overlay-Ansatz bessere Resultate hinsichtlich des Kornertrags erzielen als mit einem Mapping-Ansatz.

Da dieser kombinierte Mapping- mit Online Overlay-Ansatz in dieser Form im IKB und FAM erstmals verfolgt wird, können vergleichend keine weiteren Ergebnisse aus anderen Studien diskutiert werden. In der Literatur sind jedoch Studien vertreten, in denen ein reiner Sensor-Ansatz verfolgt wird. EHLERT et al. (2004) stellen einen Pendelsensor vor und testen ihn in drei Streifenversuchen. Dabei können in zwei Versuchen Ertragsvorteile durch den Einsatz des Pendelsensors erzielt werden, in einem Versuch wurde jedoch ein Ertragsverlust verursacht (vgl. EHLERT et al., 2004, S. 271). Mit dem relativ weit verbreiteten YARA-N-Sensor® wurden vergleichende Studien zur einheitlichen Bewirtschaftung von verschiedenen Autoren durchgeführt. KILIAN und GRABO (2002, S. 36) können einen Ertragsunterschied von 2,6 dt/ha zur einheitlichen Düngung feststellen. Auch Studien von EBERTSEDER et al. (2003, S.196) und MAIDL et al. (2004, S. 1944) zeigen eine leichte Steigerungen des Kornertrags bei der Düngung mit dem YARA-N-Sensor®.

Abschließend soll anhand der drei diskutierten Streifenversuche die Wahl der einheitlichen Referenzdüngung diskutiert werden. Da die Potenzialberechnungen gezeigt haben, dass die Höhe der einheitlichen (betriebsüblichen) Düngung das Bewertungsergebnis stark beeinflusst, ist dies auch durchaus angebracht. Die Orientierung des einheitlichen Düngenniveaus am durchschnittlichen Düngenniveau der teilflächenspezifischen Variante hat zur Folge, dass auch die betriebsüblich einheitlich gedüngte Variante vom Informationsvorsprung der Precision Farming Variante profitiert. Bei diesem Vorgehen handelt es sich somit prinzipiell nicht mehr um eine „betriebsübliche“ Variante, da hier bereits die durchschnittliche Intensität mit Hilfe von Informationen bestimmt wird, die normalerweise (ohne den Einsatz von PF-Technologien) nicht zur Verfügung stehen würden. Dieses Vorgehen ist beim Versuch am Schafhof 2004 gewählt worden und daher kritisch zu beurteilen, da das Bewertungsergebnis verzerrt wird. Auf Flächen mit begrenzter Standortheterogenität führt diese Vorgehensweise zwangsläufig dazu, dass sich einheitliche und teilflächenspezifische Düngestrategien nur geringfügig unterscheiden.

Der umgekehrte Weg scheint dagegen weniger problematisch. Wird zuerst das einheitliche Düngenniveau festgelegt und dann versucht, mit Hilfe von PF Technologien dieselbe Stickstoffmenge auf einen heterogenen Schlag aus ökonomischen oder ökologischen Gesichtspunkten umzuverteilen, so wird prinzipiell eine andere Hypothese untersucht. Die Hypothese lautet dann, dass eine begrenzte Stickstoffmenge durch PF Technologien teilflächenspezifisch ökonomisch oder aber auch ökologisch sinnvoller eingesetzt werden kann. Dies wurde beispielsweise am Schafhofversuch 2002 durchgeführt.

Dieser Ansatz ist besonders dann von Interesse, wenn der Landwirt seine Flächen unter Berücksichtigung von Stickstoffkontingenten bewirtschaften müsste. Beispiele für dieses Vorgehen sind bei MAIDL et al. (2004) bei der Untersuchung von Mapping-Ansätzen oder teilweise bei GODWIN et al. (2003) zu finden.

Diese Herangehensweise verursacht jedoch große Optimierungsprobleme bei der Bemessung der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngergaben. Folgendes vereinfachte Beispiel soll dies veranschaulichen:

Ein Schlag besitzt zwei gleichgroße Ertragszonen (Hoch- und Niedrigertrag) die einheitlich mit 200 kg N/ha gedüngt werden. Bei der Optimierung der Precision Farming Variante wird für den Niedrigertrag anhand von Entscheidungsregeln festgestellt, dass dieser mit 160 kg N/ha gedüngt werden sollte. Folglich muss der Hohertrag, damit schlagdurchschnittlich die einheitliche Düngermenge von 200 kg N/ha eingehalten wird, mit 240 kg N/ha gedüngt werden, obwohl vielleicht die Anwendung der Entscheidungsregeln zur teilflächenspezifischen N-Düngung eine Stickstoffdüngergabe von nur beispielsweise 210 kg N/ha ergeben hätte.

Soll jedoch untersucht werden, ob es grundsätzlich möglich ist, durch den Einsatz von Precision Farming einen ökonomischen Vorteil zu erzielen, so ist es durchaus sinnvoll, dass die einheitliche und die teilflächenspezifische Variante vom Düngenniveau her unabhängig sind (vgl. Streifenversuch am Schlag D4, 2003). Auch EBERTSEDER et al. (2003, S. 194) bemessen die Stickstoffgaben bei einheitlicher Düngung nach betriebsüblichen Erfahrungswerten und Empfehlungen, die teilflächenspezifischen N-Gaben werden unabhängig davon nach verschiedenen Parametern abgeleitet. Dies erschwert zwar den anschließenden Vergleich, aber dieser Nachteil kann durch nachfolgende Überlegungen kompensiert werden:

## **Überlegungen zur Bewertungsmethodik von Ergebnissen aus Streifenversuchen**

Die beschriebenen Ergebnisse der Arbeit verdeutlichen, dass das Vergleichen von modellierten ökonomischen sowie umweltrelevanten Auswirkungen einer teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung mit den gefundenen empirischen Ergebnissen aus Streifenversuchen zur besseren Interpretation wichtig ist. Eine neu angedachte Bewertungsmethodik für Streifenversuche soll dies erreichen:

Der Quotient aus dem realisierten Potenzial und dem aus Modellkalkulationen mit teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen abgeleiteten theoretischen Potenzial stellt dabei einen Erreichungsgrad dar, der beschreibt, inwiefern es gelungen ist, mit einem bestimmten Ansatz zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung ein vorhandenes ökonomisches Potenzial auszuschöpfen. Das vorhandene ökonomische Potenzial ist dabei von der vorherrschenden Standortheterogenität, der angebauten Feldfrucht und den klimatischen Vegetationsbedingungen maßgeblich determiniert. Durch den Einsatz dieser Methode gelingt eine aussagekräftigere Evaluierung als dies durch einen reinen Streifenversuch ohne integrierten Stickstoffsteigerungsversuch möglich ist.

Besonders im Hinblick auf On-Farm-Research-Versuche kann dieser Ansatz zu einer tieferen Diskussion und damit zu einem besseren Systemverständnis beitragen. DABBERT und KILIAN (2002, S. 427 ff.) diskutieren einen ähnlichen Bewertungsansatz. Sie verwenden dazu allerdings normierte Produktionsfunktionen, da sie in ihren Versuchen keine Möglichkeit hatten, zusätzliche Streifen mit Stickstoffsteigerungen anzulegen, die es ermöglicht hätten, empirische Produktionsfunktionen zu schätzen.

### **6.4 Diskussion der Break-Even-Analysen**

Die Break-Even-Analysen dieser Arbeit zeigen, genauso wie die anderer Autoren (WAGNER, 2004, S. 35; DABBERT und KILIAN 2002, S. 443 ff.; OSTHEIM, 2000, S. 154), dass bei Anwendung eines kapitalintensiven Ansatzes zur Teilschlagdüngung wie dem Mapping- mit Online Overlay-Ansatz bei kleiner Flächenauslastung entweder ein sehr hoher, meist nur schwer zu erreichender Mehrertrag oder Inputreduktion erzielt werden muss, um den Break-Even zu erreichen. Die Kalkulationen zeigen

andererseits, wie sich der Break-Even in Richtung kleinerer Flächen bewegt, falls die Technik eines Mapping- mit Online Overlay-Ansatzes zum Preis eines Sensor-Ansatzes erhältlich wird. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass zukünftig die Ertragserfassung beim Mähdrusch zur Standardausrüstung gehören wird, d.h. bei Ersatzinvestitionen wird zukünftig diese Technologie bei einer Vielzahl von Betrieben zur Verfügung stehen.

Am Beispiel eines erzielten Mehrertrags von ca. 1 dt/ha (Streifenversuche) kann gezeigt werden, dass für den durchgeführten Mapping- mit Sensor Overlay-Ansatz der Break-Even im Bereich von 800 ha Getreidefläche liegt. Dabei muss beachtet werden, dass der berechnete Break-Even sehr sensibel auf Produktpreisveränderungen (Winterweizen) reagiert. GODWIN et al. (2003, S. 541 f.) stellen bei Break-Even-Analysen mit unterschiedlichen Ansätzen zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung ähnliche Ergebnisse fest. In Abhängigkeit vom eingesetzten System schwankt der Point of Break-Even zwischen etwa 80 und 300 ha. Bei diesen Kalkulationen wird zugrunde gelegt, dass durch teilflächenspezifische N-Düngung eine um 15 £/ha (ca. 22 €/ha) höhere stickstoffkostenfreie Leistung als bei einheitlicher N-Düngung realisiert werden kann.

## **6.5 Diskussion der Risikoanalysen**

Zur Risikoanalyse werden die Kriterien der stochastischen Dominanz ersten und zweiten Grades zu Grunde gelegt. Dieses Konzept wird in der Agrarforschung häufig zur Risikobewertung verwendet (HANF, 1991, S. 92 ff.; KUHLMANN, 2003, S. 110 ff.; EDER, 1993; ANDERSON et al., 1977, S. 282 ff.; LAMBERT et al. 2003). LOWENBERG-DEBOER (1999) verwendet es ebenfalls zum Bestimmen des Risikomanagement Potenzials von Precision Farming Technologien. Die Entscheidung für diese Methode ist aufgrund der Tatsache getroffen worden, dass der Grad der Risikoaversion des Entscheidungsträgers nicht wie bei anderen risikoanalytischen Konzepten (z.B. Sicherheitsäquivalente) quantifiziert werden muss. Um die Kriterien der stochastischen Dominanz anwenden zu können, genügen Annahmen über die Nutzenfunktion des Entscheidungsträgers. Die Ergebnisse der Risikoanalysen auf Basis der Modellrechnungen unter Verwendung normierter Produktionsfunktionen zeigen deutlich die möglichen Vorteile der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung aus Umweltgesichtspunkten. Die Modellergebnisse zeigen, wie die jährliche Varianz

der Stickstoffbilanzsalden durch eine teilflächenspezifische Stickstoffdüngung, die das ex post bestimmte Optimum ex ante erreicht, verringert werden kann. Verschiedene Szenariokalkulationen veranschaulichen dabei, dass es durch eine reduzierte teilflächenspezifische N-Düngung im Gegensatz zu einer reduzierten einheitlichen N-Düngung besser gelingt, das System auf max. tolerierbare Stickstoffbilanzsalden einzustellen. Besonders an diesem Sachverhalt ist die Vorteilhaftigkeit einer Risikoanalyse sichtbar. Würde man sich nur am Erwartungswert der Stickstoffbilanzsalden orientieren, so würden sich die beiden Düngesysteme voneinander unwesentlich unterscheiden. Erst die kumulierten Verteilungsfunktionen verdeutlichen die Tatsache, dass auch bei einheitlicher, reduzierter N-Düngung (im Gegensatz zur reduzierten teilflächenspezifischen Düngung) in einigen Jahren immer noch sehr hohe umweltbelastende Stickstoffbilanzsalden auftreten können.

Aus ökonomischer Sicht unterscheiden sich die untersuchten Düngesysteme kaum. Dies ist auch weiter nicht verwunderlich, da der größte Teil der Varianz der Deckungsbeiträge durch jährlich stark schwankende klimatische Wachstumsbedingung verursacht wird. Ein exakteres „treffen“ des ökonomischen Optimums kann das grundsätzlich vorhandene ökonomische Risiko nur geringfügig reduzieren. Dabei muss aber zudem beachtet werden, dass im Falle falscher Interpretation und Anwendung von teilflächenspezifischen Informationen das ökonomische Risiko im Vergleich zur einheitlichen Bewirtschaftung sogar steigen kann. Dies muss unter dem Aspekt gesehen werden, dass menschliche Fehler bei kapitalintensiven Technologien schwerwiegendere Konsequenzen nach sich ziehen als bei kapitalextensiven Bewirtschaftungsformen. Dieses Risiko ist allerdings mit dem beschriebenen Modell und der angewandten Risikoanalyse nicht beurteilbar. Es werden hier somit auch die Grenzen einer Risikoanalyse deutlich. COOK und BRAMLEY (2000, S. 2) kommen zu einem ähnlichen Ergebnis: sie sehen in Precision Farming ein geeignetes Instrumentarium, das Risiko von N- und P-Austrägen in die Umwelt zu reduzieren. LOWENBERG-DEBOER (1999, S. 284) kommt für den Fall der teilflächenspezifischen P- und K-Düngung zu dem Schluss, dass Precision Farming aus ökonomischer Sicht risikomindernd wirken kann. Ergebnisse von DILLON et al. (2003, S. 38) belegen die risikomindernde Wirkung bezüglich der Varianz des Gewinns durch eine teilflächenspezifische Aussaat. Eine Simulationsstudie von LEIVA

et al. (1997) zeigt das Potenzial von Precision Farming (Düngung, Pflanzenschutz) Umweltrisiken zu reduzieren. Auch POWERS et al. (2004) schlagen zum betrieblichen Risikomanagement „risk maps“ vor, die auf der Grundlage von mehrjährigen Ertragskarten erstellt werden können. Eine „risk map“ veranschaulicht in diesem Zusammenhang für Schläge bzw. Teilschläge nicht nur den Erwartungswert des Naturalertrags, wie dies von langjährigen Ertragskarten bekannt ist, sondern auch die Varianz der Naturalerträge oder aber auch der Deckungsbeiträge. Mit Hilfe der „risk maps“ können Schläge bzw. Teilschläge ermittelt werden, die bezüglich der Varianz der Naturalerträge bzw. der Deckungsbeiträge besonders sensibel sind, und es kann entsprechend bei der Bewirtschaftung darauf reagiert werden. Precision Farming besitzt also selbst als Bewirtschaftungsform ein Potenzial zur Minderung des ökonomischen Risikos sowie des Risikos erhöhter Umweltbelastung und bietet zugleich die Möglichkeit (Datengrundlage) für ein erweitertes betriebliches Risikomanagement.

## **7 Ausblick**

Der folgende Ausblick soll mögliche Auswirkungen eines zukünftig vermehrten Einsatzes von Precision Farming Technologien auf die Betriebsstruktur und -organisation geben. Zudem sollen mögliche Vorteile des On-Farm-Research mit PF Technologien angesprochen werden. Schließlich werden politische Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Precision Farming Technologien abgeleitet. Diese Szenarien sind unter dem Vorbehalt zu betrachten, dass die verschiedenen Precision Farming Technologien zukünftig eine höhere Entwicklungsreife erreicht haben werden, die zu hoher Akzeptanz auf Seiten der Landwirte führt, da ökonomische sowie umweltrelevante Vorteile erhöht und einheitliche Standards geschaffen werden.

### **7.1 Auswirkungen von Precision Farming auf die zukünftige Betriebsstruktur und Organisation**

Die Integration von Precision Farming Technologien in die landwirtschaftliche Produktion hat grundsätzlich zur Folge, dass Entscheidungen auf der Basis immer größerer Mengen an Informationen getroffen werden können. Damit diese neue Fülle von Informationen nutzenbringend eingesetzt werden kann, erfordert sie ein sinnvolles Informationsmanagement. Der Arbeitsplatz des Landwirts kann sich dabei grundlegend wandeln.

Die Auswirkungen von Precision Farming auf die zukünftige Betriebsorganisation sind in starkem Maße abhängig von der Struktur der Agrarlandschaft und der damit meist eng verbundenen Betriebsgröße. Die Implementierung von Precision Farming Technologien bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen führt zu unterschiedlichen Konsequenzen in Bezug auf die zukünftige Betriebsorganisation. Folgende Betriebs- und Entscheidungsbereiche werden durch den Einsatz von Precision Farming Technologien maßgeblich beeinflusst:

- Investitionsentscheidungen: Eigenmechanisierung vs. überbetriebliche Arbeitserledigung
- Qualifikation des Betriebsleiters und der Arbeitskräfte
- Innerbetriebliche Entscheidungsautonomie
- Innerbetriebliches Controlling/ Rückverfolgbarkeit und gläserne Produktion
- Organisation des Datenmanagements

Im Folgenden werden die Auswirkungen eines Precision Farming Einsatzes auf die angesprochenen Bereiche näher beschrieben.

### **Investitionsentscheidungen:**

#### **Eigenmechanisierung vs. überbetriebliche Arbeitserledigung**

Da der Investitionsbedarf für die verschiedenen PF Technologien sehr hoch ist und der Break-Even erst bei größerer Flächenausstattung erreicht wird (siehe Kapitel 5.3, Break-Even-Analysen), ist davon auszugehen, dass bei einer klein strukturierten Agrarlandschaft, wie sie beispielsweise in Süddeutschland anzutreffen ist, der Einsatz von PF Technologien vornehmlich überbetrieblich organisiert werden wird, z.B. mit Hilfe von Maschinenringen oder landwirtschaftlichen Lohnunternehmern. Alternativ zur rein überbetrieblichen Arbeitserledigung ist die gemeinschaftliche Anschaffung von Maschinen denkbar, speziell im Hinblick auf eine Gewannebewirtschaftung. Es ist jedoch davon auszugehen, dass zumindest einige der zur Teilflächenbewirtschaftung notwendigen Technologien (wie beispielsweise die automatische Ertragerfassung im Mähdrescher) zukünftig zur Standardausstattung gehören werden. Dies hat zur Folge, dass diese Technologien in absehbarer Zeit bei Ersatzinvestitionen vielen Betrieben zur Verfügung stehen werden.

Im Gegensatz zu Betrieben in Süddeutschland haben Betriebe in Ostdeutschland oft die nötige Flächenausstattung, die eine Investition in betriebseigene Maschinen wirtschaftlich sinnvoll macht. Die Art der durchgeführten Mechanisierung beeinflusst in erheblichem Maße die Ausbildungsanforderungen an das eventuell eingesetzte Personal sowie die Aufgaben des Betriebsleiters.

## **Qualifikation des Betriebsleiters und der Arbeitskräfte**

Bei der notwendigen Qualifikation der Arbeitskräfte muss für den Fall der innerbetrieblichen und den der überbetrieblichen Arbeitserledigung unterschieden werden. Beim überbetrieblichen Einsatz sind keine zusätzlichen Qualifikationen des Betriebsleiters notwendig, sondern nur eine grundsätzlich positive Einstellung gegenüber der Teilflächenbewirtschaftung und der damit verbundenen Technologien. Bei der innerbetrieblichen Arbeitserledigung würde der Einsatz der Precision Farming Technologien dazu führen, dass gut qualifizierte Arbeitskräfte benötigt werden, die die anspruchsvollen Maschinen bedienen können und ein gewisses Grundverständnis über die eingesetzten Technologien besitzen.

Hierbei verlangen die unterschiedlichen Ansätze zur Teilschlagbewirtschaftung sehr unterschiedliche Kenntnisse und Fertigkeiten. Beispielsweise müssen bei der Düngung nach einem Mapping-Ansatz Applikationskarten auf Basis von Ertragskarten erstellt werden. Dazu ist es notwendig, die Daten der automatischen Ertragsfassung beim Mähdrusch entsprechend weiter zu verarbeiten. Dies erfordert spezielle Kenntnisse, beispielsweise bei der Anwendung von Spezialsoftware. Wird jedoch die Teilschlagdüngung mit Hilfe des Yara-N-Sensors® verwirklicht, so entfällt diese Arbeit, da die online gemessenen Sensorwerte direkt in eine Stickstoff-Applikationsmenge umgesetzt werden. Erfahrungen von Praktikern, die bereits Precision Farming Technologien einsetzen zeigen, dass die Implementierung eines Teilschlagmanagements das auf einem Mapping-Ansatz basiert anspruchsvoller ist (speziell im Hinblick auf die Verarbeitung teilflächenspezifischer Daten), als ein Sensor-Ansatz.

## **Innerbetriebliche Entscheidungsautonomie**

Aufgrund der Komplexität teilflächenspezifischer Bewirtschaftungsmethoden kann der Einsatz von Precision Farming Technologien unter Umständen die Entscheidungsautonomie des Landwirts (je nach Organisationsform) beeinflussen. Als Entscheidungsautonomie wird die Freiheit verstanden, alle Entscheidungen im Laufe des Produktionsprozesses selbstständig, ohne Beeinflussung von Dritten (z.B. anderen Landwirten, Lohnunternehmern oder sonstige Dienstleistern), zu treffen.

Die Höhe der Beeinflussung der Entscheidungsautonomie wird jedoch stark davon abhängig sein, ob der Einsatz der Precision Farming Technologien, überbetrieblich (z.B. Maschinenringe), gemeinschaftlich (z.B. in Form einer Gewannebewirtschaftung) oder durch Eigenmechanisierung durchgeführt wird.

Wird die Teilflächenbewirtschaftung mit Hilfe von überbetrieblichen Dienstleistungen von Maschinenringen oder Lohnunternehmern durchgeführt, so haben diese auch einen gewissen, eventuell einschränkenden, Einfluss auf die Entscheidungsautonomie des Landwirts. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen: Wird die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung von einem Lohnunternehmer durchgeführt, so ist davon auszugehen, dass dieser die zur teilflächenspezifischen Düngung notwendigen Informationen auswertet und aufgrund dieser Informationen letztlich über die Höhe und Verteilung der Stickstoffgaben sowie den Düngezeitpunkt entscheidet. Im Extremfall wird der Landwirt nicht in diesen Entscheidungsprozess mit einbezogen. Dies wird vermehrt auftreten, wenn Betriebe im Nebenerwerb bewirtschaftet werden.

Auch eine gemeinschaftliche Arbeitserledigung im Rahmen einer Gewannebewirtschaftung kann zu einer Einschränkung der persönlichen Entscheidungsautonomie bezüglich des Produktionsprozesses führen. Im Falle einer Gewannebewirtschaftung müssen Entscheidungen über Sortenwahl, Pflanzenschutzmaßnahmen oder dem Erntezeitpunkt gemeinschaftlich im Konsens getroffen werden. Dies führt nicht selten zu Abstimmungsproblemen (vgl. Rothmund et al., 2003, S. 11) unter den betroffenen Landwirten und schränkt die individuellen Entscheidungsfreiheiten teilweise ein.

Fällt die Entscheidung, PF Technologien durch Investitionen in den eigenen Maschinenpark zu implementieren, so ist die Wahrscheinlichkeit, dass Einschränkungen in Bezug auf die Entscheidungsautonomie des Landwirts auftreten, relativ gering. Mögliche Einschränkungen können aber eventuell entstehen, wenn zur Durchführung der Investition Beratungsleistungen von außen in Anspruch genommen werden. Einschränkungen können zudem entstehen, wenn Arbeitsschritte zu Dienstleistern ausgelagert werden.

## **innerbetriebliches Controlling/ Rückverfolgbarkeit und gläserne Produktion**

Durch den Einsatz von Precision Farming Technologien steht dem Betriebsleiter zukünftig eine große Datenmenge zur Verfügung, die nicht nur zur teilflächenspezifischen Applikation von Betriebsmitteln eingesetzt werden, sondern auch als Datengrundlage für ein betriebliches Controlling-System dienen kann.

Mit Hilfe der Ertragerfassung beim Mähdrusch und von so genannten Applikationskarten von teilflächenspezifisch ausgebrachten Betriebsmitteln wird es möglich, Deckungsbeitragskarten für einzelne Schläge zu erstellen, wie in Abbildung 29 (Anhang) dargestellt. Die so erstellten „Profitkarten“ können beispielsweise bei Stilllegungen als Entscheidungsgrundlage herangezogen werden (vgl. MASSEY et al. 2004). AUGSBURGER (2002) stellt dazu ein „teilflächenspezifisches“ Kostenrechnungssystem vor. POWERS et al. (2004) schlagen außerdem „risk maps“, die auf der Grundlage von mehrjährigen Ertragskarten erstellt werden können, zur betrieblichen Entscheidungsfindung vor. Die Erfassung von Prozessdaten im Rahmen der pflanzenbaulichen Produktionen mit den entsprechenden Precision Farming Technologien, wie z.B. Einsatzzeiten, Applikations- und Erntemengen usw. ermöglicht es, weitere betriebswirtschaftliche Kennzahlen zu bestimmen. Die Analyse und Verwendung der gesammelten Prozessdaten sowie weiterer pflanzenbaulicher Parameter ermöglicht nicht nur, ein betriebliches Controlling-System zu implementieren, sondern zugleich die zunehmend vom Handel und Verbraucher geforderte Dokumentation des Produktionsprozesses.

Precision Farming kann somit zur „gläsernen Produktion“ in der Landwirtschaft beitragen und ist ein weiterer Baustein auf dem Weg zu einer gesicherten Rückverfolgbarkeit in der Produktionskette von Lebensmitteln. GUTSCHE et al. (2004) zeigen in diesem Zusammenhang Möglichkeiten auf, wie durch Precision Farming Abstandsaufgaben zu Gewässern eingehalten und dokumentiert werden können.

Abschließend bleibt anzumerken, dass die im Zuge von Precision Farming anfallende Datenflut zuerst sinnvoll kanalisiert werden muss, um sie nutzenbringend zur Rückverfolgbarkeit und Dokumentation einsetzen zu können. An dieser Stelle ist zukünftiger Forschungsbedarf vorhanden.

## Organisation des Datenmanagements

Innerbetriebliche Informationssysteme sind ein wesentlicher Bestandteil von Precision Farming, da sie notwendig sind, um die gesammelten teilflächenspezifischen Daten in Informationen, und die Informationen in Entscheidungen umzuwandeln (MURAKAMI et al., 2002, S. 1712). Da die teilflächenspezifische Bewirtschaftung nur mit Hilfe einer großen Menge an teilflächenspezifischen Daten ökonomisch und ökologisch erfolgreich scheint, müssen diese zukünftig in Datenbanken abgespeichert werden, die dann Grundlage für ein betriebliches Decision-Support-System sind (LINSEISEN, 2002). Die notwendige Datenhaltung kann unterschiedlich organisiert werden und unter Umständen die innerbetriebliche Organisation nachhaltig beeinflussen. Erfolgt die Datenhaltung bezüglich der Informationen zum teilflächenspezifischen Management nicht betriebsintern, so bestehen nach LOWENBERG-DEBOER (1996) verschiedene Alternativen für die Organisation und Durchführung der Datenhaltung. So ist es beispielsweise nach LOWENBERG-DEBOER (1996) denkbar, dass die zur teilflächenspezifischen Optimierung notwendigen Informationen von AgroChemie-Konzernen und Betriebsmittellieferanten, von staatlichen Forschungs- und Beratungseinrichtungen oder von kommerziellen Dienstleistern bzw. non-profit Dienstleistern im Bereich Datenhaltung abgespeichert und den Landwirten zur Verfügung gestellt werden.

Die gewählte Datenhaltungsform kann Änderungen in Bezug auf die Betriebsorganisation bzw. auf das Management hervorrufen. LOWENBERG-DEBOER (1996) hält folgende Optionen für möglich:

Landwirte könnten die zum teilflächenspezifischen Management notwendigen Informationen gemeinsam sammeln und nutzen, bleiben aber bei ihren innerbetrieblichen Entscheidungen unabhängig. Dies würde zu einer „*Information Agriculture*“ führen und wäre eine zukunftsweisende Herangehensweise.

Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, dass Großkonzerne die Datenhaltung steuern, was zu einer Abhängigkeit der Landwirte führen und die Pflanzenproduktion verstärkt industrialisieren würde. Der schlechteste Fall wäre nach LOWENBERG-DEBOER (1996), dass Daten nicht geteilt werden und jeder Betrieb versucht, mit seinen eigenen begrenzten Daten die Produktion zu optimieren. Dies könnte in einer

technologischen Sackgasse enden, da die begrenzte Datenlage unter Umständen zur teilflächenspezifischen Optimierung nicht ausreicht.

Die hier beschriebenen Effekte werden bei kleineren Betrieben stärker zutreffen als bei Großbetrieben, da kleinere Betriebe mehr darauf angewiesen sind, externe Daten zur teilflächenspezifischen Steuerung zu verwenden. Großbetriebe haben im Gegensatz zu den kleineren Betrieben eher die Möglichkeit, selbstständig eine eigene ausreichend große Datenbank mit teilflächenspezifischen Informationen aufzubauen.

## **7.2 On-Farm-Research**

Der Begriff „On-Farm-Research“ bzw. „On-Farm-Trials“ ist ursprünglich im Zusammenhang mit „farming systems research“ als ein partizipativer Ansatz vor allem in den internationalen landwirtschaftlichen Forschungszentren entwickelt und propagiert worden. Das Ziel ist eine an den Fragestellungen des Landwirts orientierte Forschung, die auch von und mit den Landwirten selbst durchgeführt werden kann (vgl. PETERSEN, 1994, S. 318 ff.).

Klassischerweise wird die betriebsübliche Bewirtschaftung mit einer verbesserten Bewirtschaftung unter Praxisbedingungen verglichen. Das Ziel dieser Herangehensweise ist (neben dem Vergleich von unterschiedlichen Bewirtschaftungsvarianten) eine größere Praxisnähe und schnellere Diffusion von Innovationen. Spätestens mit der Entwicklung von PF Technologien erfährt der „On-Farm-Research“-Ansatz wieder Bedeutung. Das Potenzial von PF Technologien für On-Farm-Versuche wurde früh erkannt (z.B. OYARZABAL et al., 1996), bisher fehlen allerdings geeignete Versuchspläne und Interpretationshilfen, die den Landwirten helfen können, ihre Versuche zu planen und auszuwerten.

Ansätze zur Anlage und Auswertung von On-Farm-Versuchen wurden von ADAMS und COOK (2000) sowie LOWENBERG-DEBOER et al. (2003) beschrieben.

Nach WAGNER (2004, S. 41 f.) eignen sich beispielsweise folgende Versuchsfragen für On-Farm-Research:

- Unterscheiden sich zwei verschiedene Herbizide hinsichtlich ihrer Ertragswirksamkeit?
- Unterscheiden sich zwei unterschiedliche Düngestrategien im Ertrag?
- Unterscheiden sich zwei verschiedene Aussaatstärken einer Sorte hinsichtlich des Ertrages?

Die Versuchsdurchführung kann entweder vom Landwirt selbst oder von einem Dienstleister übernommen werden. Durch die Kombination von Precision Farming Technologien und der Idee des On-Farm-Research wird dem Landwirt die Möglichkeit geboten, z.B. eine Investitionsentscheidung in einen N-Sensor durch eigene Versuchserfahrungen abzusichern. Er ist somit nicht mehr von Herstellerangaben oder von externen Versuchsergebnissen abhängig, die evtl. unter völlig anderen Standortvoraussetzungen und Rahmenbedingungen entstanden sind.

### **7.3 Politische Handlungsoptionen zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Precision Farming zur Ausschöpfung ökologischer Vorteile**

Prinzipiell kann davon ausgegangen werden, dass eine Förderung des Einsatzes umweltfreundlicher Precision Farming Technologien auch zu einer Entlastung der Umwelt führt. Als mögliche Handlungsoptionen von Seiten der Politik zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Precision Farming können aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit drei Bereiche identifiziert werden.

#### **1. Honorierung der Dokumentation**

Werden Rückverfolgbarkeit und Dokumentation honoriert bzw. verpflichtend, so wirkt sich dies als Triebfeder für die Verbreitung von Precision Farming aus (vgl. AUERNHAMMER, 2003). Mit Hilfe von Precision Farming Technologien könnten Umweltpolitiken gezielter umgesetzt und aufgrund der teilweise automatischen Dokumentationsmöglichkeiten kontrolliert werden. So könnte eine mit PF Technologien erbrachte ökologische Leistung, bei der das teilflächenspezifische Management dokumentiert wird (z.B. durch Applikationskarten), eine besondere Honorierung erhalten, da Kontroll- und Monitoringkosten reduziert sind.

#### **2. Schaffen einheitlicher Standards**

Die unzureichende Kompatibilität von verschiedenen Software- und Technikkomponenten und fehlende Benutzerfreundlichkeit stellt derzeit ein wesentliches Akzeptanzhemmnis von Precision Farming Technologien bei der Einführung in die landwirtschaftliche Praxis dar (vgl. Kapitel 3.3). Einheitliche Standards der Technik sind daher als wesentliches Ziel in der Entwicklung von Technologien zur Teilflächenbewirtschaftung zu nennen, da sie die Rentabilität des Einsatzes verschiedener Precision Farming Technologien wesentlich verbessern könnten (vgl. AUERNHAMMER, 2003).

### **3. Forschungs- und Investitionsförderung**

Precision Farming Technologien stehen erst am Anfang ihrer Entwicklung. Durch weitere Forschung können eine ausgereifere Technik und bessere pflanzenbauliche Algorithmen zur teilflächenspezifischen Applikation von Betriebsmitteln entwickelt werden. Dies führt langfristig zu einer Verbesserung der ökonomischen und ökologischen Vorteile der Technologie und letztlich zu einer größeren Akzeptanz von Seiten der Landwirte. Unterstützend führt ein größeres Beratungsangebot zu einem Abbau des momentan bestehenden Informationsdefizits über Precision Farming (vgl. dazu auch FRIEDRICHSEN et al., 2004). Unterstützend könnte eine Investitionsförderung von umweltschonenden Precision Farming Technologien in Betracht gezogen werden, um die derzeit begrenzte Wirtschaftlichkeit aufgrund des hohen Investitionsbedarfs zu verbessern. Dies hätte zur Folge, dass der Absatz steigt und langfristig bei größeren produzierten Stückzahlen die Preise für die Technologien sinken könnten.

## 8 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Bewertung von Precision Farming am Beispiel der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung von Winterweizen. Die Literaturanalyse zu ökonomischen und ökologischen Auswirkungen von Precision Farming zeigt keine einheitliche Aussage. Vielmehr zeichnen die Analysen ein sehr heterogenes Bild mit negativen und positiven Effekten auf die Wirtschaftlichkeit. Der Literaturüberblick zeigt weiterhin, dass eine Reduktion der Umweltbelastungen (Nitrat auswaschung) durch einen effizienteren Einsatz des Stickstoffdüngers in vielen Bereichen erreicht werden kann. Verschiedene Autoren berichten, dass derzeitige Akzeptanzhemmnisse bezüglich der Einführung von Precision Farming Technologien vor allem die unsicheren ökonomischen Vorteile und die mangelnde Kompatibilität der einzelnen Technologiekomponenten und Softwareprodukte sind.

Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Methoden zur Bewertung der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung erstrecken sich von Potenzialberechnungen mit Hilfe verschiedener teilflächenspezifischer Produktionsfunktionen (quadratisch, linear limitational bzw. exponentiell) auf Basis kleinräumiger Stickstoffsteigerungsversuche über die statistische Auswertung von Streifenversuchen, die das derzeit realisierbare Potenzial darstellen, bis hin zu Risikoanalysen (stochastische Dominanz). Letztere sollen die langfristigen Auswirkungen der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung auf ökonomische sowie umweltrelevante Zielgrößen untersuchen. Zudem werden Break-Even-Analysen für verschiedene Investitionsalternativen zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung beleuchtet. Umweltrelevante Auswirkungen der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung werden jeweils anhand von Agrarumweltindikatoren abgeschätzt.

Als wesentliches Ergebnis der Potenzialberechnungen kann festgehalten werden, dass aus ökonometrischer Sicht die quadratischen und linear limitationalen Produktionsfunktionen (für den betrachteten Versuchsstandort) geeigneter sind, die Ertragswirkung der Stickstoffdüngung zu modellieren, als ein exponentielles Regressionsmodell. Zwischen dem linear limitationalen bzw. quadratischen Modell kann jedoch keine eindeutige Entscheidung für oder gegen das eine oder andere

aufgrund der Residuenanalyse getroffen werden. Die aus den verschiedenen Regressionsmodellen abgeleiteten teilflächenspezifischen optimalen speziellen Intensitäten ( $N_{opt}$ ) der Stickstoffdüngung weisen für den untersuchten Standort eine sehr große Spannweite auf. Sie bewegen sich beispielsweise im Versuchsjahr 2002 zwischen 127 und 198 kg N/ha in der Niedrigertragszone und zwischen 179 und 239 kg N/ha im Hohertragsbereich. Die Analyse der Vertrauensintervalle für die teilflächenspezifischen  $N_{opts}$  zeigt, dass diese abhängig vom gewählten Regressionsmodell zum einen relativ lang sind und sich zum anderen teilweise in großen Bereichen überschneiden. Die Produktionsfunktionsanalysen legen die Schlussfolgerung nahe, dass es sich bei den linear limitationalen Funktionen geschätzten  $N_{opts}$  um die untere Grenze, und bei den mit quadratischen Produktionsfunktionen bestimmten  $N_{opts}$  um die obere Grenze eines Bereichs handelt, in dem sich das ökonomische Optimum bewegt. Die langen Vertrauensintervalle sind zum einen auf die Versuchsanstellung zurückzuführen, zum anderen auch auf den grundsätzlich flachen Verlauf der Ertragsfunktionen. Letzterer kann als ein wichtiger Hinweis für die oft hinter den Erwartungen zurückbleibenden Vorteile bei der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung identifiziert werden.

Die Modellierung ökonomischer Potenziale auf Basis verschiedener teilflächenspezifischer Produktionsfunktionen zeigt für den Versuchsstandort Sieblerfeld, dass diese innerhalb der beiden untersuchten Jahre schwanken und von ihrer Höhe stark abhängig von der gewählten einheitlichen Referenzdüngung (einheitlich praktiziertes Intensitätsniveau) sowie vom zugrunde gelegten Verlauf der teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen sind. Die mögliche Steigerung der stickstoffkostenfreien Leistung durch eine ökonomisch optimierte teilflächenspezifische N-Düngung bei Winterweizen reicht dabei von 0 bis 62 €/ha.

Die Potenzialberechnungen zeigen weiterhin, dass eine ökonomisch optimierte teilflächenspezifische Stickstoffdüngung speziell in der auswaschungsgefährdeten Niedrigertragszone des Versuchsschlages Sieblerfeld teilweise zu einer wesentlichen Reduzierung der Stickstoffbilanzüberschüsse führen kann. Hierbei hängt das Ausmaß der Reduzierung stark von der gewählten einheitlichen Referenzdüngung sowie von der Annahme über den Verlauf der Produktionsfunktionen ab. In der Hohertragszone des Versuchsfeldes kann eine ökonomisch optimierte

teilflächenspezifische Stickstoffdüngung jedoch auch dazu führen, dass höhere Stickstoffgaben ausgebracht werden als bei einheitlicher betriebsüblicher Düngung. Die Modellkalkulationen zeigen dann auch höhere Stickstoffbilanzsalden bei teilflächenspezifisch optimierter N-Düngung als bei einheitlicher Bewirtschaftung. Die N-Bilanzsalden bei teilflächenspezifisch optimierter N-Düngung befinden sich im Hohertrag bei den in dieser Arbeit angestellten Modellrechnungen noch überwiegend im negativen Bereich und sind somit aus Umweltgesichtspunkten unkritisch.

Sensitivitätsanalysen für die ermittelten Potenziale zeigen, dass geringere positive wie auch negative Abweichungen von den teilflächenspezifischen optimalen speziellen Intensitäten nur mäßige ökonomische Konsequenzen nach sich ziehen. Da die ökonomischen Vorteile durch teilflächenspezifische Stickstoffdüngung in vielen Fällen jedoch insgesamt begrenzt sind, können Abweichungen aus Sicht der Teilflächenbewirtschaftung nur in sehr geringem Maße toleriert werden, damit sie vorteilhaft im Vergleich zur einheitlichen Düngung bleibt.

Die Auswertung von drei Feldversuchen, in denen einheitliche und teilflächenspezifische Stickstoffdüngesysteme untersucht wurden, bestätigt insgesamt das gewonnene Bild aus den dargestellten Potenzialberechnungen sowie der Literaturanalyse. Die ökonomischen Vorteile durch teilflächenspezifische Stickstoffdüngung von Winterweizen bewegen sich dabei beim Mapping- mit Online Overlay-Ansatz von +2 €/ha bis zu +32 €/ha (inkl. der monetären Bewertung des höheren Proteingehalts durch Teilflächenbewirtschaftung) und beim Mapping-Ansatz zwischen -10 €/ha und +11 €/ha. Die Stickstoffbilanzsalden der untersuchten Düngesysteme unterscheiden sich jedoch kaum. Die hier dargestellten Ergebnisse der Feldversuche müssen dabei als Zwischenevaluierung betrachtet werden, da sich die untersuchten Düngealgorithmen derzeit noch in der Entwicklungs- und Testphase befinden. Da Streifenversuche, in denen Teilschlagtechnologien untersucht werden, zwangsläufig auf heterogenen Versuchsflächen durchgeführt werden, wird zur Auswertung eine Kovarianzanalyse empfohlen. Als Kovariable hat sich bei den hier ausgewerteten Versuchen die scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens als geeignet erwiesen, um den durch Bodenheterogenität bedingten Versuchsfehler zu

reduzieren. Bei der Interpretation von Ergebnissen aus Streifenversuchen wird als zentrales Ergebnis eine Bewertungsmethodik abgeleitet, die auf der zusätzlichen Analyse von teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen beruht. Die vorgeschlagene Bewertungsmethodik erlaubt es, zwischen verschiedenen Effekten, die auf das Bewertungsergebnis wirken (wie z.B. der Standortheterogenität oder der Güte des Düngealgorithmus) zu unterscheiden.

Die Analyse des Investitionsbedarfs für verschiedenen Ansätze zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung sowie weiterführende Wirtschaftlichkeitsrechnungen zeigen, dass sich bei einer hohen Flächenauslastung von 1000 ha die jährlichen Kosten der Investition in verschiedene Ansätze zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung im Bereich von ca. 5 €/ha für einen Mapping-Ansatz bis ca. 9 €/ha für einen Mapping mit Online Overlay-Ansatz bewegen. Ausgehend von einer Steigerung des Naturalertrags bei Teilschlagdüngung von 1 dt/ha (Winterweizen) und einem Winterweizenpreis von 11 €/dt würde der Break-Even für einen Mapping- mit Online Overlay-Ansatz bei ca. 800 ha liegen.

Mit Risikoanalysen werden langfristige ökonomische sowie umweltrelevante Auswirkungen der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung im Vergleich zur einheitlichen Düngung untersucht. Die Risikoanalysen werden dabei mit Hilfe der Kriterien der stochastischen Dominanz durchgeführt. Modellergebnisse zeigen, dass das ökonomische Risiko durch die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung nur geringfügig verringert werden kann. Aus Umweltgesichtspunkten kann jedoch gezeigt werden, dass das Risiko hoher umweltbelastender Stickstoffbilanzüberschüsse reduziert werden kann, wenn es gelingt, durch entsprechende Düngealgorithmen die teilflächenspezifischen optimalen speziellen Intensitäten gezielter zu erreichen als mit einheitlicher Düngung.

Ein Ausblick auf mögliche zukünftige Entwicklungen durch den Einsatz von Precision Farming Technologien auf die Betriebsstruktur sowie auf mögliche Kosteneinsparungen im Bereich der Betriebsmittelbereitstellung ergibt folgendes Bild: Die überbetriebliche Einführung von PF Technologien kann dazu führen, dass pflanzenbauliches Wissen der Landwirte partiell durch Sensoren und Algorithmen ersetzt wird. Die Entscheidungsautonomie des Landwirtes kann dadurch eingeschränkt werden. In großstrukturierten Agrarlandschaften ist der betriebliche Einsatz von PF Technologien wahrscheinlicher und führt dazu, dass auf dem Betrieb entsprechend gut qualifizierte Arbeitskräfte benötigt werden, die die anspruchsvollen Maschinen bedienen können. Durch PF Technologien wird es zukünftig möglich sein, betriebliche Entscheidungen durch eigene auf On-Farm-Research beruhende Informationen zu stützen. Der Einsatz von Precision Farming Technologien bringt grundsätzlich die Möglichkeit mit sich, den Produktionsprozess zu dokumentieren und kann langfristig zur gläsernen Produktion führen. Um dies zu erreichen, müssen aber zuerst Konzepte (Datenmanagement- und Auswertung) entwickelt werden, welche die „Datenflut“ kanalisieren und verdichten.

Mögliche politische Handlungsoptionen, die langfristig die Akzeptanz von Precision Farming Technologien verbessern können sind beispielsweise eine Honorierung der Dokumentation, einheitliche Standards bei Software und Technik sowie weitere Forschungsförderung, speziell zur Verbesserung der Entscheidungsregeln zur teilflächenspezifischen Applikation von Betriebsmitteln.

## 9 Summary

The work presented here is concerned with the evaluation of precision farming using the example of site-specific nitrogen fertilization of winter wheat. The initial literature review provided only inconsistent conclusions to economic and environmental benefits of precision farming. Rather, the analysis revealed very heterogeneous results with both negative and positive effects of site-specific management on economic efficiency. The literature review also shows that environmental impacts (i.e. nitrogen leaching) could be significantly reduced through a more efficient site-specific nitrogen fertilizer application. Various authors report that the uncertainty of economic advantages and the insufficient compatibility of the individual technical components and software products create a strong adoption constraint of precision farming technologies.

In the presented work, methods for evaluating the site-specific nitrogen fertilization include potentiality calculations with the help of various site-specific nitrogen response functions (quadratic, linear plus plateau and exponential) based on site-specific nitrogen rate trials, as well as the statistical evaluation of strip trials, which represent the current feasible potential of site-specific nitrogen fertilization, and finally a risk analysis using stochastic dominance criteria. The latter should examine the long-term effects of the site-specific nitrogen fertilization on economic as well as environmental target values. In addition, break-even-analyses are carried out for various investment alternatives for site-specific nitrogen fertilization. Environmental impacts from site-specific nitrogen fertilization are estimated based on agri-environmental indicators.

As a substantial result of the potentiality calculations, it can be determined for the trial site that the quadratic and linear plus plateau response functions are econometrically more suitable for modelling the yield response to nitrogen as a response function based on exponential regression models. However, between the linear plus plateau and the quadratic models, respectively, no certain decision can be made for or against one or the other based on the residue analysis. The site-specific economic optimum nitrogen rates ( $N_{opt}$ ) derived from the various regression models yield a wide

range for the study site. For example, in trial year 2002 the values range between 127 and 198 kg N/ha in the low yield zone and between 179 and 239 kg N/ha in the high yield zone. The analysis of the confidence intervals for the site-specific  $N_{\text{opts}}$  shows that, depending on the form of the response function, these are for one, relatively large and for the other, are partially overlapping. The response function analysis supports the conclusion that the linear plus plateau function estimates  $N_{\text{opts}}$  for the lower limit and the quadratic response function determined  $N_{\text{opts}}$  for the higher limit of an area, in which the economic optimum is found. The length of the confidence intervals can be explained on the one hand by the field trial design, and on the other hand on principle of the flat slope of the nitrogen response function. The latter can be identified as an important indication of the small economic benefits of site-specific nitrogen fertilization.

Modelling the economic potential for the study site based on the different site-specific response functions reveals fluctuations within the two study years and according to their extent, a strong dependence on the chosen uniform reference application (uniform fertilization level) as well as on the type of the underlying site-specific response function. By means of an economically optimized site-specific N-fertilization of winter wheat, the potential increase in returns above N-fertilizer cost is between 0 to 62 €/ha. The potentiality calculations further show that an economic optimum site-specific nitrogen fertilization, especially in the low yield zones of the trial site which have a high nitrogen leaching potential, can lead to a substantial reduction in the nitrogen balance surplus. Here, the extent of the reduction strongly depends on the chosen uniform reference fertilization as well as on the response function. However, in the high yield zone of the trial site, an economically optimized site-specific nitrogen application rate can also lead to higher fertilization levels than the uniform nitrogen management. The model calculations then also show a higher nitrogen balance surplus with site-specific optimized N-fertilization as compared to uniform management. According to model calculations performed in this study, the nitrogen balance surplus with site-specific optimized N-fertilization in the high yield zone is still predominately negative and, therefore, not considered as environmentally critical.

The sensitivity analyses for the calculated potentials show that slightly positive or negative deviations from the site-specific economic optimum N-rates only involve moderate economic consequences. However, since the economic advantages of site-specific nitrogen fertilization are overall often limited, deviations in site-specific fertilization can only be tolerated to a small degree so that the economic advantages over uniform fertilization remain.

Overall, the evaluation of the three field trials, in which uniform and site-specific nitrogen fertilization systems were examined, confirms the insights gained through the presented potentiality calculations and the literature review. Using the Mapping-with Online Overlay-Approach, the economic advantages of site-specific nitrogen fertilization of winter wheat range from +2 €/ha to +32 €/ha (including the monetary evaluation of the higher protein content with site-specific management) and with the Mapping-Approach the range was between -10 €/ha and +11 €/ha. However, the nitrogen balance hardly differs between the two fertilizer systems examined. Nonetheless, the presented results of the field trials can only be considered as an intermediate evaluation since the examined fertilization algorithms are still in the development and test phase. Since the strip trials, in which site-specific management approaches are tested, are inevitably performed on heterogeneous trial fields, a covariance analysis is recommended. In the evaluated trials, the soil electrical conductivity seems to be a suitable covariate in order to reduce the trial error caused by soil heterogeneity. During the interpretation of the strip trial results, a central result is the derivation of an evaluation method which deals with the additional analysis of site-specific response functions. The suggested evaluation method allows a differentiation between the effects which affect the evaluation results (e.g. soil heterogeneity or the quality of the fertilizer algorithm).

The analysis of the investment needs for different approaches to site-specific nitrogen fertilization along with further economic calculations show that the annual costs range between 5 €/ha for a Mapping-Approach to approximately 9 €/ha for a Mapping- with Online Overlay-Approach, calculated for a cropped area of 1000 ha. Assuming an increase in yield with site-specific nitrogen fertilization from 1 dt/ha

(winter wheat) and a winter wheat price of 11 €/dt, the break-even for a Mapping-with Online Overlay-Approach would be approximately by 800 ha.

Using a risk analyses, long-term economic and environmental effects of site-specific nitrogen fertilization are compared with uniform fertilization. The risk analyses are conducted with the help of the stochastic dominance criteria. Model results show that the economic risk of site-specific nitrogen fertilization can only marginally be reduced. However, it can be shown that the environmental risk (high nitrogen balance surplus), can be reduced when the corresponding fertilization algorithms succeed in attaining more accurate site-specific economic optimal nitrogen rates than with uniform fertilization.

The outlook to possible future business development due to the use of precision farming technologies creates the following view: By relying on external sources for the introduction of precision farming, it is possible that the farmer's agricultural know-how could be partially replaced by sensors and algorithms. This might result in a limited autonomy of farmers. Business-run use of precision farming technology is more likely in large scale farming and leads to the need for well trained workers, who can deal with the demanding high-tech machinery. In the future, precision farming technology will possibly support business decisions with information provided through trustworthy on-farm research. The use of precision farming technology principally offers the possibility for documentation of production processes and can contribute to a transparent production process. To reach this point, concepts need to be developed (data management and evaluation) which help to channel and compress the flow of information.

Political actions which would improve the long-term acceptance of precision farming could be, for example, a reward for the documentation with precision farming technologies, uniform standards for software and technology and further research support, especially for the improvement of decision rules for site-specific application of inputs.

## 10 Literatur

- ADAMS, M.L.; COOK, S.E. (2000): On-farm Experimentation: Application of Different Analytical Techniques for Interpretation. In: Proceedings of the 6th International Conference on Precision Agriculture, S.1-17.
- ANDERSON, J.R.; DILLON, J.L.; HARDDAKKER, B. (1977): Agricultural Decision Analysis. Iowa State University Press.
- AUGSBURGER, C. (2002): Konzeption und Implementierung eines Leistungs-Kostenrechnungsmodells zur Auswertung kleinräumiger Daten. Dissertation TU-München, Agrarwirtschaft Sonderheft 173, AGRIMEDIA Verlag, Bergen/Dumme.
- AUERNHAMMER, H. (2004): VDI-MEG Jahrbuch Agrartechnik (Hrsg. H.J. Matthies und F. MEIER), VDI-Verlag, Düsseldorf, 2004, S. 31-38.
- AUERNHAMMER, H. (2003): Wie weiter bei Precision Farming? – Entwicklungsstand und Trends. In: DLG-Pressemitteilung Nr. 3, 10.11.03.
- AUERNHAMMER, H. (2001): Precision farming- the environmental challenge. Computers and Electronics in Agriculture 30 (2001), Elsevier Publishers, Amsterdam, S. 31-43.
- AUERNHAMMER, H. (1994): Global positioning systems in agriculture. Computers and Electronics in Agriculture 11 (1994). Elsevier Publishers, Amsterdam, S.1.
- BACHMAIER, M.; GANDORFER, M. (2004): A Confidence Interval for the Optimal Nitrogen Fertilization. In: Mulla, D.J. (ed.), Proceedings of the 7th International Conference on Precision Agriculture. July 25-28, 2004, Minneapolis, Minnesota, S. 796-807.
- BATTE, M.T.; VANBUREN, F.N. (1999): Precision Farming -- Factors Influencing Profitability. Paper presented at the Northern Ohio Crops Day meeting, Wood County, Ohio, January 21, 1999, S.1-12.  
URL:<http://aede.ag.ohio-state.edu/resources/docs/pdf/BDC23D62-7D22-11D5-ABF200C00D014775.pdf>
- BERG, E. (1997): Der Einfluss von Unsicherheit und Risikoeinstellung auf die Intensität und das Produktionsprogramm im Ackerbau, S.1-18.  
URL: <http://pu.ilb.uni-bonn.de/pu/Publikationen/RiskBe97.pdf>
- BLACKMORE, S.; GODWIN, R.J.; FOUNTAS, S. (2003): The Analysis of Spatial and Temporal Trends in Yield Map Data over Six Years. Biosystem Engineering 84 (4), S. 455-466.

- BONGIOVANNI, R.; LOWENBERG-DEBOER, J. (2004): Precision Agriculture and Sustainability. Precision Agriculture (5), S. 359-387.
- BONGIOVANNI, R.; LOWENBERG-DEBOER, J. (2001): Precision Agriculture: Economics of Nitrogen Management in Corn Using Site-specific Crop Response Estimates from a Spatial Regression Model. Selected Paper auf American Agricultural Economics Association (AAEA) Tagung in Chicago vom 5.-8.8.2001, S. 1-26. URL: <http://agecon.lib.umn.edu/>
- BULLOCK, D.S.; LOWENBERG-DEBOER, J.; SWINTON, S.M. (2002): Adding value to spatially managed inputs by understanding site-specific yield response. Agricultural Economics 27, S. 233-245.
- CERRATO, M. E.; BLACKMER, A. M. (1990): Comparison of Models for describing corn yield Response to Nitrogen Fertilizer. Agronom. J., 82, S. 138-143.
- COOK, S.; BRAMLEY, R. (2000): Precision agriculture: Using paddock information to make cropping systems internationally competitive. Emerging Technologies in Agriculture: From ideas to adoption (Conference 25-26 July 2000), S. 1-8. URL: [www.brs.gov.au](http://www.brs.gov.au)
- DABBERT, S.; KILIAN, B. (2002): Ökonomie. In: Precision Agriculture – Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis. Tagungsband Precision Agriculture Tage 13.-15. März in Bonn. KTBL-Sonderveröffentlichung 038. Hrsg.: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt, S. 423-446.
- DILLON, C.R; ISAACS, S.; FLEMMING, R.; IBENDAHL, G. (2003): An Economic Assessment of Precision Agriculture and Decision Aids. In: Developing and Assessing Precision Agriculture Technologies for Kentucky Producers, 2003 Research Report. S. 37-40. URL: <http://www.bae.uky.edu/~precag/PrecisionAg/PAconference1.pdf>
- DOLESCHEL, P.; FINK, K.; GRAF, R.; SCHMIDT, M. (2003): Integrierter Pflanzenbau in Bayern, Ergebnisse aus Feldversuchen, Ernte 2003, Winterweizen. Hrsg.: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). URL: <http://www.versuchsberichte.de/VIPDOKVOLLPFLANZEN/DDD/4beb0.pdf>
- EBERTSEDER, TH.; GUTSER, R.; HEGE, U.; BRANDHUBER, R.; SCHMIDHALTER, U. (2003) Strategies for site-specific nitrogen fertilization with respect to long-term environmental demands. In: Precision Agriculture (Eds. Stafford, J., Werner, A.). Wageningen Academic Publishers, S. 193-198.
- EDER, M. (1993): Risikoanalyse mit Hilfe der Stochastischen Dominanz- Fallbeispiel mit Versuchsdaten ausgewählter Marktfrüchte. Die Bodenkultur 44, S. 275-288.

- EHLERT, D.; DAMMER, K.-H. (2002): Herbizide, Fungizide und Wachstumsregler. In: Precision Agriculture – Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis. Tagungsband Precision Agriculture Tage 13.-15. März in Bonn. KTBL-Sonderveröffentlichung 038. Hrsg.: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt, S. 275-292.
- EHLERT, D.; SCHMERLER, J.; VOELKER, U. (2004): Variable Rate Nitrogen Fertilization of Winter Wheat Based on a Crop Density Sensor. Precision Agriculture, 5, S. 263-273.
- ENGLISH, B.C.; MAHAJANASHETTI, S.B.; ROBERTS, R.K. (1999): Economic and Environmental Benefits of Variable Rate Application of Nitrogen to Corn Fields: Role of Variability and Weather. Paper presented at American Agricultural Economics Association Meeting, Nashville, 8.-11.8.1999. S. 1-15.
- FINCK, H.-F.; HAASE, K. (1987): Nitratbelastung des Grundwassers, ökonomische Beurteilung von Alternativen. In: Schriftenreihe des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Reihe A, Heft 347. Münster-Hiltrup.
- FRIEDRICHSEN, M.S.; NGANJE, W.E.; WILSON, W.W.; GUSTAFSON, C.R.; FRANZEN, D.W. (2004): Marginal Impact of Education, Financial Performance and Government Programs on the Adoption of Precision Agriculture Technology. In: Mulla, D.J. (ed.), Proceedings of the 7th International Conference on Precision Agriculture. July 25-28, 2004, Minneapolis, Minnesota, S. 724-738.
- GODWIN, R.; RICHARDS, T.; WOOD, G.; WELSH, J.; KNIGHT, S. (2003): An Economic Analysis of the Potential for Precision Farming in UK Cereal Production. In: Biosystems Engineering 84 (4), S. 533-545.
- GOMEZ, K.A.; GOMEZ, A.A. (1984): Statistical procedures for agricultural research. Inter-national Rice Research Institute. Second Edition. John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.
- GUMPERTSBERGER, E.; JÜRGENS, C. (2003): Acceptance of precision agriculture in Germany – results of a survey in 2001. In: Precision Agriculture (Eds. Stafford, J., Werner, A.). Wageningen Academic Publishers Wageningen, S. 259-264.
- GUTSCHE, V.; GOLLA, B.; GANZELMEIER, H. (2004): Forschungsreport. Verbraucherschutz - Ernährung - Landwirtschaft. Hrsg.: Senat der Bundesforschungsanstalten im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft. 1/2004 (Heft 29).
- HANF, C. (1991): Entscheidungslehre: Einführung in die Informationsbeschaffung, Planung und Entscheidung unter Unsicherheit. München-Wien, Oldenburg.

- HARTL, L.; FINK, K.; GRAF, R.; SCHMIDT M. (2004): Versuchsergebnisse aus Bayern 2004- Faktorieller Sortenversuch Winterweizen. Hrsg.: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung. URL:  
<http://www.versuchsberichte.de/VIPDOKVOLLPFLANZEN/DDD/4c2ac.pdf>
- HEGE, U.; OFFENBERGER, K. (2005): Am Anfang wenig. Optimale N-Verteilung bei Winterweizen. Bayrisches Landwirtschaftliches Wochenblatt, Heft 5, 2005, S. 34-35.
- HEIßENHUBER, A. (2000): Mit Precision Farming ins neue Jahrtausend.  
In: Mais 28, 2000 H.3, S.102.
- HEIßENHUBER, A. (1999): Stoff- und Energiebilanzen Wichtige Indikatoren für die Umweltverträglichkeit von Produktionsverfahren. In: Agrarwirtschaft 48(1999) H.7, S. 249-250.
- HERBST, R.; LAMP, J. (1998): Zur kleinräumigen Heterogenität der Böden Deutschlands und zum Akzeptanzpotential der Teilflächenbewirtschaftung - KTBL (Hrsg.), Darmstadt, 264, S. 33-41.
- HURLEY, T.M.; MALZER, G.L.; KILIAN, B. (2004): Estimating Site-Specific Nitrogen Crop Response Functions: A Conceptual Framework and Geostatistical Model. Agron. J. 96, S. 1331-1343.
- JÜRSCHIK, P. (1999): Teilflächenspezifische Düngung – Grundlagen, Konzepte, technische Lösungen. DLG Merkblatt 315, Frankfurt am Main, S.1-22.
- KILIAN, B.; GRABO, A. (2002): Wirkungsweise des Hydro-N-Sensors umfassend untersucht. Neue Landwirtschaft, 8, 2002. S. 34-36.
- KLEMISCH, M. (1999): Untersuchungen zur genotypischen Variabilität der Stickstoff-Effizienz bei Wintergerste. Dissertation TU-München, Herbert Utz Verlag, München.
- KRAYL, E. (1993): Strategien zur Vermeidung der Stickstoffverluste aus der Landwirtschaft. Landwirtschaft und Umwelt, Schriften der Umweltökonomik, Band 8 Kiel.
- KTBL TASCHENBUCH LANDWIRTSCHAFT (2002/2003): Daten für betriebliche Kalkulationen in der Landwirtschaft. Hrsg. Kuratorium f. Technik u. Bauwesen in d. Landwirtschaft e.V., Landwirtschaftsverlag, Münster.
- KUHLMANN, F. (2003): Betriebslehre der Agrar- und Ernährungswirtschaft. 2. Auflage, DLG Verlag, Frankfurt am Main.

- KÜHBAUCH, W. (2002): Fernerkundung – Eine Zukunftstechnologie im Präzisionspflanzenbau. In: Precision Agriculture – Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis. Tagungsband Precision Agriculture Tage 13.-15. März in Bonn. KTBL-Sonderveröffentlichung 038. Hrsg.: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt, S. 79-87.
- LAMBERT, D.M.; LOWENBERG-DEBOER, J. (2003): Economic Analysis of Row Spacing for Corn and Soybean. *Agron. J.*, 95, S. 564-573.
- LAMBERT, D.; LOWENBERG-DEBOER, J.; BONGIOVANNI, R. (2002): Spatial Regression, an alternative statistical analysis for landscape scale on-farm trials: case study of variable rate nitrogen application in Argentina. In P.C. Robert et al. (ed): Proceedings of the 6th International Conference on Precision Agriculture. S. 1-18.  
URL: <http://www.agriculturadeprecision.org/analecon/SpatialRegression.zip>
- LAMBERT, D.; LOWENBERG-DEBOER, J. (2000): Precision Agriculture Profitability Review. Staff Paper. Site Specific Management Center, Purdue University, West Lafayette, Indiana.  
URL: <http://www.agriculture.purdue.edu/ssmc/Frames/newsoilsX.pdf>
- LARK, R.M.; WHEELER, H.C. (2003): A Method to Investigate Within-Field Variation of the Response of Combinable Crops to an Input. *Agron. J.* 95. S. 1093-1104.
- LEIVA, F. R.; MORRIS, J.; BLACKMORE, B. S. (1997): Precision Farming Techniques for Sustainable Agriculture. Proceeding of the 1st European Conference on Precision Agriculture. edited by J. V. Strafford (BIOS Scientific Publishers Oxford, UK), S. 957-966.
- LIEBLER, J. (2003): Feldspektroskopische Messungen zur Ermittlung des Stickstoffstatus von Winterweizen und Mais auf heterogenen Schlägen. Herbert Utz Verlag.
- LINSEISEN, H. (2003): Entwicklung eines Management-Informationssystems für Entscheidungen im Precision Farming. Dissertation TU-München-Weihenstephan.
- LISSE, H. (2003): GPS-gestützte Teilflächenbewirtschaftung. RKL-Schrift 4.1.0, S. 1123-1143.
- LOWENBERG-DEBOER, J.; LAMBERT, D.; BONGIOVANNI, R. (2003): Appropriate On-Farm Trial Designs for Precision Farming. Proceedings of the 4th European Conference on Precision Agriculture, J. Stafford & A. Werner, editors, Wageningen Academic Publishers, Netherlands, 2003. S. 361-366.
- LOWENBERG-DEBOER, J. (1999): Risk Management Potential of Precision Farming Technologies. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 31, 2, S. 275-285.

- LOWENBERG-DEBOER, J.; SWINTON, S. M. (1997): Economics of site –specific management in agronomic crops. In Pierce, F.J., Sadler, E.J. (Hrsg.): The state of site specific management for agriculture. ASA, CSSA, SSSA, Madison, USA. S. 369-396.
- LOWENBERG-DEBOER, J. (1996): Economics of Precision Agriculture: Payoff in the Future. Newsletter des Site-Specific Management Center, College of Agriculture, Purdue University.
- LÜTTICKEN, R. (1996): Realisierung des Raum-Zeit-Bezugs von Daten zur Umsetzung teilflächenspezifischer Bewirtschaftungsmaßnahmen im Pflanzenbau. Dissertation. Hrsg.: Koch, W. Verlag: W. und S. Koch, Stuttgart.
- MAIDL, F.X.; SCHÄCHTL, J.; HUBER, G. (2004): Strategies for Site-Specific Nitrogen Fertilization on Winter Wheat. In: Mulla, D.J. (ed.), Proceedings of the 7th International Conference on Precision Agriculture. July 25-28, 2004, Minneapolis, Minnesota, S. 1938-1949.
- MAIDL, F.X.; HUBER, G.; SCHÄCHTL, J. (2002): Möglichkeiten der berührungslosen Bonitur von Pflanzenbeständen als Voraussetzung für eine ressourcenschonende Landbewirtschaftung. Hrsg. P.Schröder, B. Huber, J.C. Munch. Beitrag zum FAM Statusseminar am 27.-29. November 2002, FAM Bericht 55, S. 61-64.
- MAIDL, F.X.; SCHÄCHTL, J.; HUBER, G. (2000): Ergebnisse von Streifenversuchen zur Untersuchung unterschiedlicher N-Düngungsstrategien im Precision Farming. Berichte der Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft 13, S. 123-126.
- MASSEY, R.E.; KITCHEN, N.R.; MYERS, D.B. SUDDUTH, K.A.; DRUMMOND, S. (2004): Site-Specific Profitability, Methods, Analysis and Decisions. In: Mulla, D.J. (ed.), Proceedings of the 7th International Conference on Precision Agriculture. July 25-28, 2004, Minneapolis, Minnesota, S. 739-755.
- MATELA, N.; NELL, W.T.; ZERIHUN, G.A. (2004): Yield response functions to N, P and plant populations under variable rate and standard applications in the Bothaville District, South Africa. In: Mulla, D.J. (ed.), Proceedings of the 7th International Conference on Precision Agriculture. July 25-28, 2004, Minneapolis, Minnesota, S. 702-714.
- MEYER-AURICH, A.; LOWENBERG-DEBOER, J. (2001): Application of spatial econometrics on strip trials in Germany to identify optimal site specific input rates. Poster auf American Agricultural Economics Association (AAEA) Tagung in Chicago vom 5.-8.8.2001.
- MITCHELL, G. (1996): Problems and fundamentals of sustainable development indicators. International Journal of Sustainable Development and World Ecology, 4, S. 1-11.

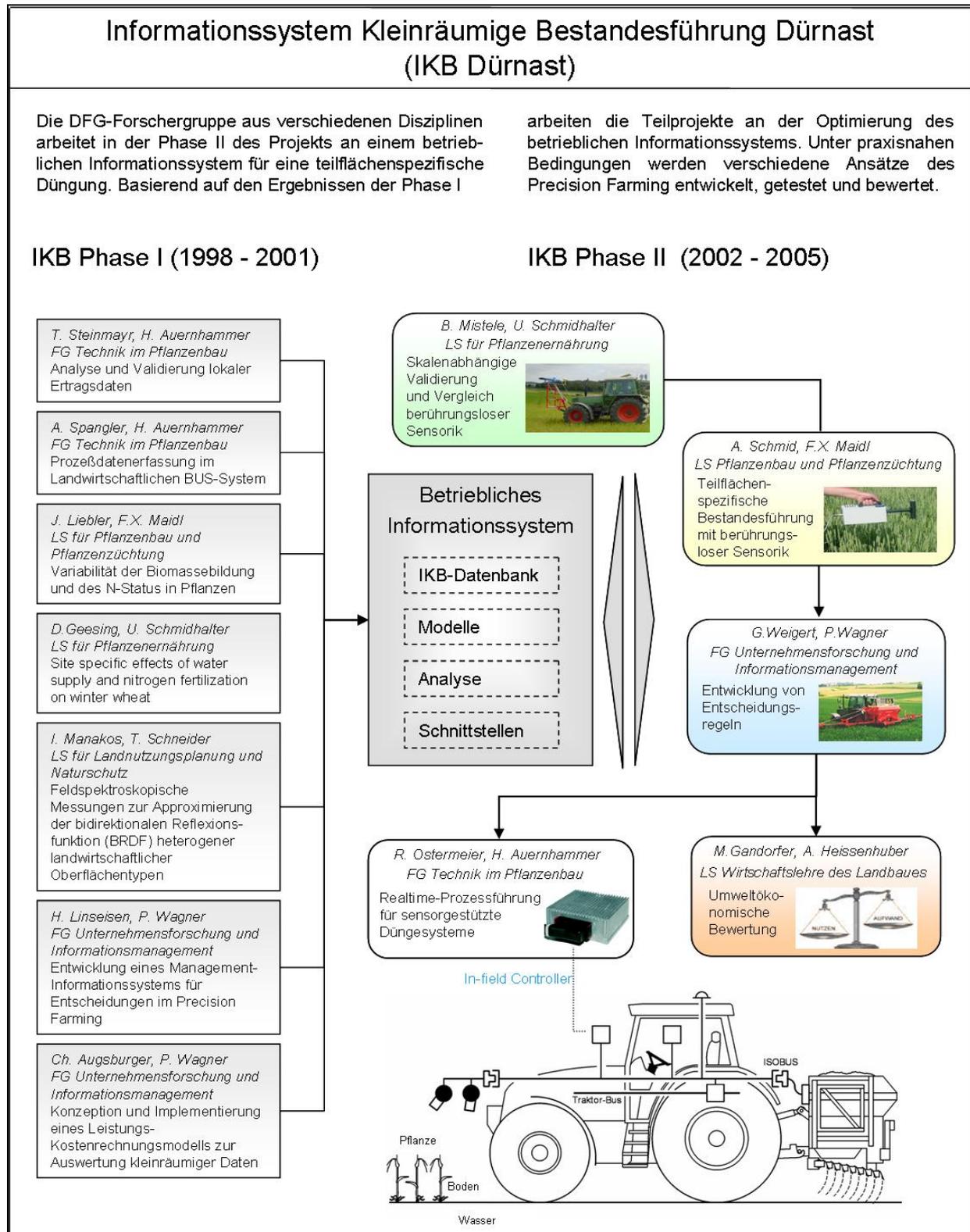
- MULLA, D.J.; BHATTI, A.U.; HAMMOND, M.W.; BENSON, J.A. (1992): A comparison of winter wheat yield and quality under uniform versus spatially variable fertilizer management. *Agric. Ecosys. Environ.* 38. S. 301-311.
- MURAKAMI, E.; RIBEIRO, L.C.M.; SARAIVA, A.M.; CUGNASCA, C.E. (2002): An Infrastructure for development of Information Systems for Precision Agriculture. *Proceedings of the Sixth International Conference on Precision Agriculture*, Minneapolis, S. 1712 - 1722.
- MÜNCHHAUSEN, H. VON; NIEBERG, H. (1997): Agrar-Umweltindikatoren: Grundlagen, Verwendungsmöglichkeiten und Ergebnisse einer Expertenbefragung. In: Diepenbrock, W.; Kaltschmitt, M.; Nieberg, H. und G. Reinhardt: *Umweltverträgliche Pflanzenproduktion - Indikatoren, Bilanzierungsansätze und ihre Einbindung in Ökobilanzen*. Reihe Initiativen zu Umweltschutz 5, Zeller Verlag, Osnabrück, S. 13-29.
- OSTHEIM, K-W. (2000): Prüfung der ökologischen Vorzüglichkeit einer GPS-gestützten teilflächenspezifischen Landbewirtschaftung. *Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup*.
- OYARZABAL, E.S.; MALLARINO, A.P.; HINZ, P.N. (1996): Using precision farming technologies for improving applied on-farm research. In P.C. Robert et al. (ed.) *Precision agriculture. Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture*, Minneapolis, MN. 23–26 June 1996, S. 379–388.
- PANELL, D.J. (2004): Flat-earth economics: The far-reaching consequences of flat payoff functions in economic decision making.  
URL: <http://www.general.uwa.edu.au/u/dpannell/dp0402.htm>
- PETERSEN, R.G. (1994): *Agricultural Field Experiments – Design and Analysis*. Marcel Dekker, New York.
- POWERS, L.A.; DILLON, C.R.; ISAACS, S.G.; SAGHAIAN, S. (2004): Development and Use of Risk Maps in Precision Agriculture. In: Mulla, D.J. (ed.), *Proceedings of the 7th International Conference on Precision Agriculture*. July 25-28, 2004, Minneapolis, Minnesota, S. 780-795.
- PRECHT, M.; KRAFT, R. (1993): *Bio-Statistik 2*. R. Oldenburg Verlag, München Wien.
- REDULLA, C.; HAVLIN, J.; KLUITENBERG, G.; ZHANG, N.; SCHROCK, M. (1996): Variable N management for improving groundwater quality. In: P. C. Robert, R. H. Rust and W. E. Larson (ed.), *Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture*., S. 1101–1110.

- REICHE, E.-W.; RINKER, A.; WINHORST, W.; KERSEBAUM, K.-C.; LORENZ, K.; PLACHTER, H.; JANßEN, B. (2002): Untersuchungen zu möglichen ökologischen Auswirkungen teilschlagspezifischer Pflanzenbaumaßnahmen. In: Precision Agriculture – Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis. Tagungsband Precision Agriculture Tage 13.-15. März in Bonn. KTBL-Sonderveröffentlichung 038. Hrsg.: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt, S. 365-368.
- ROSSKOPF, K.; WAGNER, P. (2003): Akzeptanz neuer Technologien in der Landwirtschaft – Ergebnisse empirischer Studien. In GIL: Mobile Information - Chancen für die Agrarwirtschaft und ihre Partner. Referate der 24. GIL-Jahrestagung, Göttingen, S. 126-130.
- ROTHMUND, M. (2003): Gewannebewirtschaftung. DLG Merkblatt 334.
- SCHÄCHTL, J. (2004): Sensorgestützte Bonitur von Aufwuchs und Stickstoffversorgung bei Weizen- und Kartoffelbeständen. FAM-Bericht 65. Shaker Verlag, Aachen.
- SCHEELE, M.; ISERMEYER, F.; SCHMITT, G. (1993): Umweltpolitische Strategien zur Lösung der Stickstoffproblematik in der Landwirtschaft; Agrarwirtschaft, 43, Heft 8/9, S. 294-313.
- SCHMERLER, J.; HEISIG, M.; SCHOBER, H.; SCHELLPEPER, G.; ADAMEK, R.; GROTHE, K.; GIEBEL, A.; FELMMING-FISCHER, E.; FRANK, U.; ANLAUFF, A.; WENDT, U. (2001): Forschungsberichte des ATB: Ergebnisse über Verfahren zur teilflächenspezifischen Pflanzenproduktion. Institut für Agrartechnik Bornim e. V., Potsdam-Bornim.
- SCHMIDHALTER, U.; JUNGERT, S.; EBERTSEDER, T.; DUDA, R.; GUTSER, R.; GERL G. (2003): Erfassung repräsentativer Kenngrößen der Wasserverfügbarkeit und des N-Haushaltes von Teilschlägen. In: FAM-Jahresbericht 2002, Teilprojekt WS2, S. 109-116.
- SCHWAIBERGER, R. (2004): Abschätzung der N-Versorgung von beständen mit dem Hydro N-Sensor. In Precision Farming, Analyse, Planung, Umsetzung in der Praxis. KTBL-Schrift 419, S. (3.2) 91-98.
- SHEPHERD, M.A. (1993): Measurement of soil mineral nitrogen to predict the response of winter wheat to fertilizer nitrogen after applications of organic manures or after ploughed-out grass. Journal of Agric. Sci. (Cambridge) 121 S. 223-231.
- SOMMER, C.; VOßHENRICH, H.H. (2002): Bodenbearbeitung. In: Precision Agriculture – Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis. Tagungsband Precision Agriculture Tage 13.-15. März in Bonn. KTBL-Sonderveröffentlichung 038. Hrsg.: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt, S. 237-249.

- SRU (Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen) (1985): Umweltprobleme der Landwirtschaft. Sondergutachten März 1985, Stuttgart und Mainz: Verlag Kohlhammer.
- SWINTON, S.; LOWENBERG-DEBOER, J. (1998): Evaluating the Profitability of Site-Specific Farming. *Journal of Production Agriculture*, 11, S. 439-446.
- TIMMERMANN, C., GERHARDS, R., KÜHBAUCH, W. (2003): The Economic Impact of Site-Specific Weed Control. *Precision Agriculture*, 4, S. 249-260.
- TOTTMANN, D.R. (1987): The decimal code for growth stages of cereals, with illustrations. *Ann.Biol.*110. S. 441-454.
- VORGRIMLER, D.; WÜBBEN, D. (2001): Prognose der Entwicklung des Agrartechnikmarktes – Eine Expertenbefragung nach der Delphi-Methode. Arbeitsbericht 7, Institut für Agrarpolitik und Landwirtschaftliche Marktlehre (420) der Universität Hohenheim.  
URL: <http://opus-ho.uni-stuttgart.de/hop/volltexte/2005/78/>
- WAGNER, P. (2004): Wirtschaftlichkeit von Precision Farming- Methoden und Möglichkeiten der Wirtschaftlichkeitsprüfung im landwirtschaftlichen Unternehmen. In *Precision Farming, Analyse, Planung, Umsetzung in der Praxis*. KTBL-Schrift 419, S. 31-53.
- WAGNER, P. (1999): Produktionsfunktionen und Precision Farming. In: *Zukunftsorientierte Betriebswirtschaft und Informationstechnologien in der Agrarwirtschaft*. Gießener Schriften zur Agrar- und Ernährungswirtschaft, Heft 29, S.39-66.
- WAGNER, P. (1995): Überlegungen zur Modellierung von Produktionsfunktionen. In: Noell, Chr. und Pohlmann, J. M. (Hrsg.), *Berichte der GIL*, Band 7, Kiel 1995, S.306-313.
- WATKINS, K.B.; LU, Y.-C.; HUANG, W.Y. (1998): Economic and Environmental Feasibility of Variable Rate Nitrogen Fertilizer Application with Carry-Over Effects. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 23, 401-426.
- WEIGERT, G.; GANDORFER, M., MEYER-AURICH, A., HEIßENHUBER, A., WAGNER, P. (2004): Evaluation of Decision Rules for Site Specific N-Fertilization in Strip Trials. *International Conference on Information Systems & Innovative Technologies in Agriculture, Food and Environment*; Thessaloniki (Greece). In: M. Vlachopoulou, V. Manthou, L. Illiadis, S. Gertsis and M. Salampasis (eds.). *Proceedings Volume II*. S. 320-323.

- WEINGARTEN, P.; KREINS, P. (2004): Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers vor Nitrateinträgen aus der Landwirtschaft: Umweltrechtliche und agrarpolitische Rahmenbedingungen, Kostenwirksamkeit und Handlungsbedarf. Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues e.V., Band 39, S. 435-444.
- WELSH, J.P.; WOOD, G.A.; GODWIN, J.R.; TAYLOR, J.C.; EARL, R.; BLACKMORE, S.; KNIGHT, S.M. (2003): Developing Strategies for Spatially Variable Nitrogen Application in Cereals, Part II: Wheat. Biosystems Engineering, 84 (4), S. 495-511.

# 11 Anhang



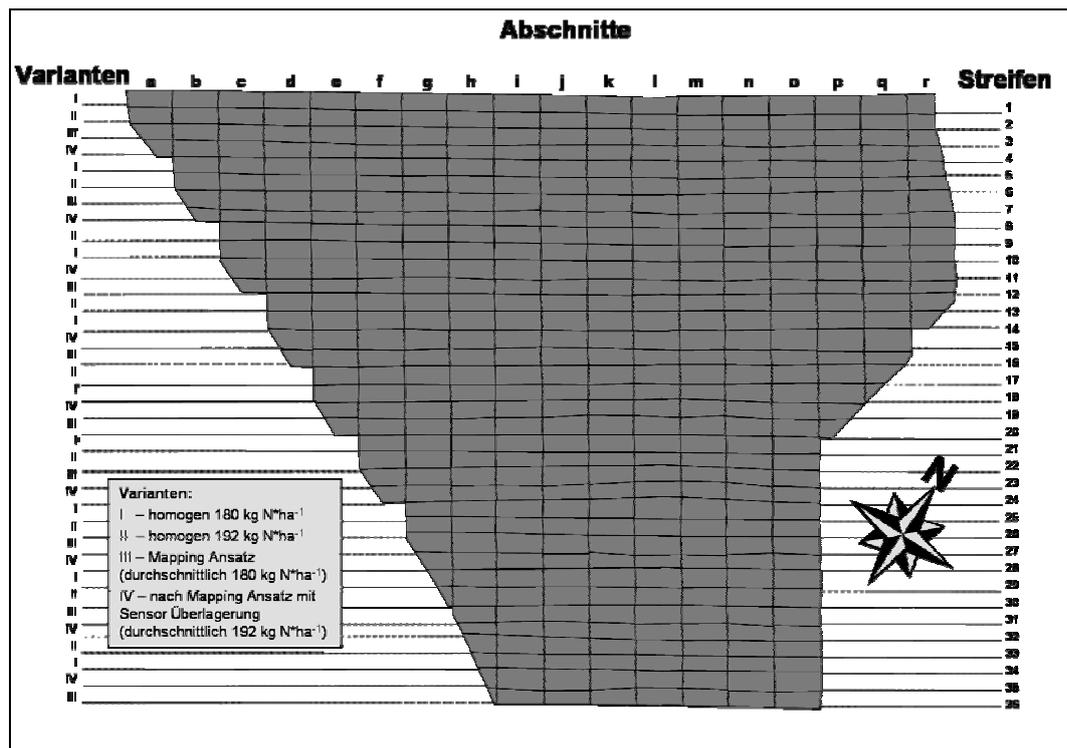


Abbildung 23: Versuchsanlage am Schafhof 2002.

Quelle: WEIGERT (2005, unveröffentlicht)

Tabelle 26: Algorithmus zur dritten N-Gabe des Mapping- mit Online Overlay-Ansatzes am Schafhof 2002

```

IF (EZ = N)
    SREIPts = 726.9;
    DGts = (SREIPts - IREIPts) * fa + NBts;
ELSE IF (EZ = M)
    SREIPts = 727.0;
    DGts = (SREIPts - IREIPts) * fa + NBts;
ELSE (EZ = H)
    SREIPts = 727.4;
    DGts = (SREIPts - IREIPts) * fa + NBts;
END IF

```

Darin sind:

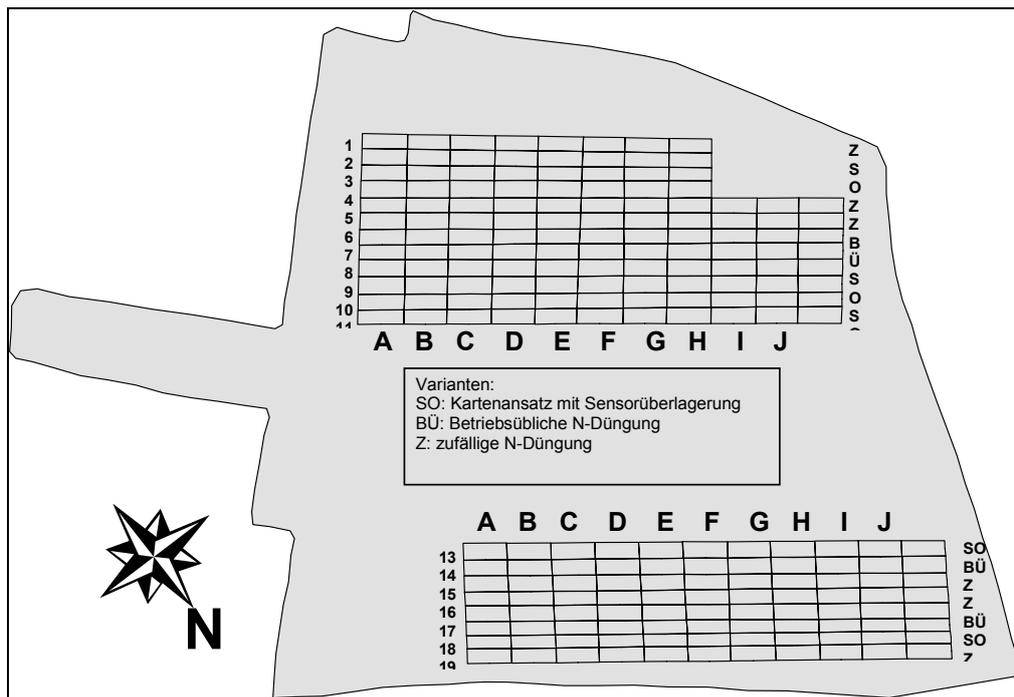
EZ = Ertragszone, abgeleitet aus der Ertragsersparung  $EE_{ts}$  ( $EE_{ts} = \emptyset$  Ertrag<sub>ts</sub> (1996,1998))N, M, H= Ertragszonen (Niedrig, Mittel, Hoch)SREIP<sub>ts</sub>= Soll-Kennzahl in nm als Indikator für einen optimalen N-Versorgungszustand eines Teilstreifens (ts).IREIP<sub>ts</sub> = Ist-Kennzahl ermittelt aus Reflexionsmessungen in nm für jeden Teilstreifen (ts).

fa = Umrechnungsfaktor von Soll-Ist-Abweichung in nm zu einer aktuellen Unterversorgung (+) bzw. Überversorgung (-) der Pflanzen in kg N/ha eines Teilstreifens mit fa = 25. Akzeptierte Spanne der Werte: +20 bis -5 kg N/ha.

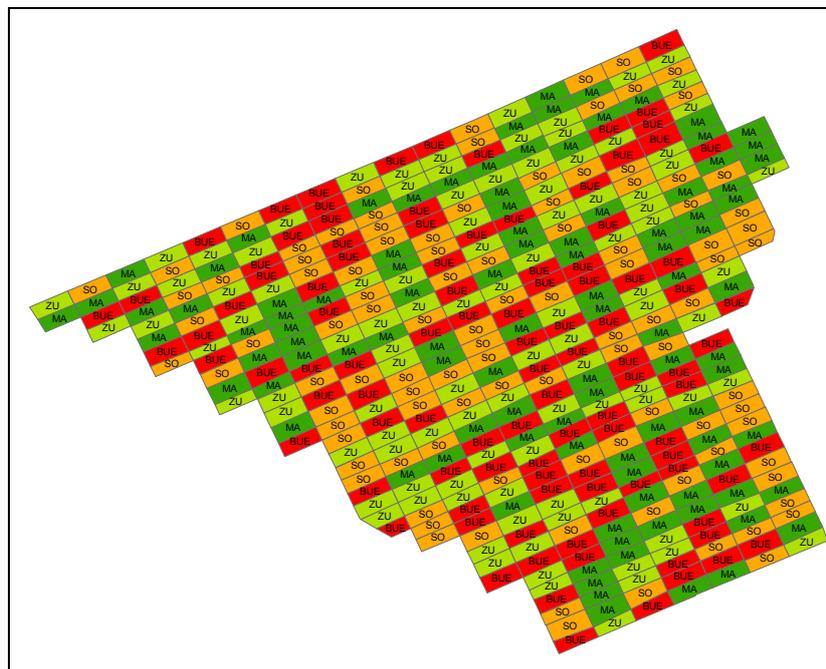
NB<sub>ts</sub> = N-Bedarf der Pflanze zwischen EC 49 und Ernte in Abhängigkeit von der Ertragsersparung als  $EE_{ts}$  - 10 in kg N/ha.

Die Gesamtdüngermenge darf nur Werte zwischen 60 und 90 kg N/ha annehmen

Quelle: LINSEISEN (2002, unveröffentlicht)



**Abbildung 24: Versuchsanlage am Versuchsfeld D4 im Jahr 2003.**  
 Quelle: WEIGERT et al. (2004)



**Abbildung 25: Versuchsanlage am Schafhof 2004**  
 MA: Mapping-Ansatz, ZU: N-Steigerung, SO: Mapping- mit Online Overlay-Ansatz, BUE:  
 einheitliche Düngung  
 Quelle: WEIGERT (2005, unveröffentlicht)

**Tabelle 27: Geschätzte Winterweizenerträge in dt/ha bei einheitlicher N-Düngung von 200 und 220 kg N/ha für die Hoch- und Niedrigertragszone am Sieblerfeld**

	Jahr	einheitliche Düngung: 200 kg N/ha			einheitliche Düngung: 220 kg N/ha		
		exponentielles Modell	quadratisches Modell	LL <sup>1</sup> Modell	exponentielles Modell	quadratisches Modell	LL <sup>1</sup> Modell
Hohertrag	2002	99,7	101,4	102,4	100,8	103,3	102,4
	2004	113	114,4	119,6	114,4	117,8	119,6
Niedrigertrag	2002	78,3	79,6	77,0	79,2	80,3	77,0
	2004	97,8	99,9	102,5	99,4	102,7	102,5

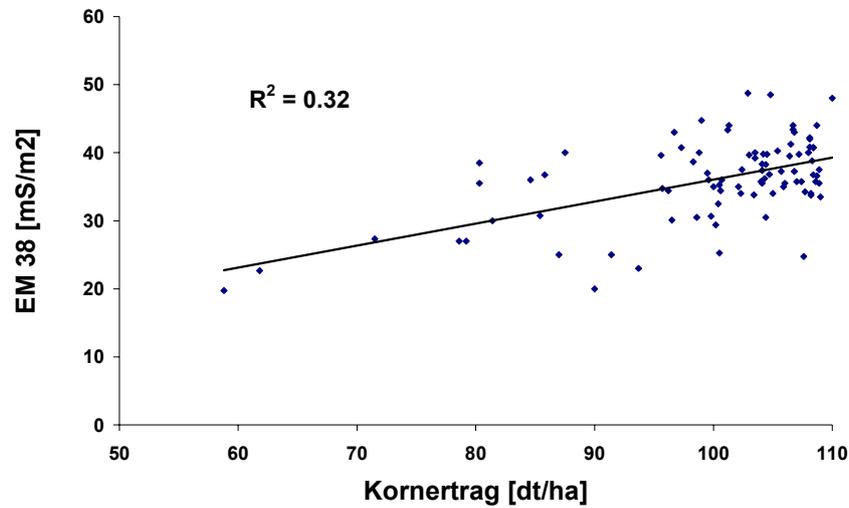
<sup>1</sup>LL: linear limitational

**Quelle:** eigene Berechnungen

**Tabelle 28: Geschätzte Winterweizenerträge in dt/ha bei teilflächenspezifisch optimierter N-Düngung für die Hoch- und Niedrigertragszone am Sieblerfeld**

	Jahr	Regressionsmodell		
		exponentiell	quadratisch	linear limitational
Hohertrag	2002	100,1	104,6	102,4
	2004	115,4	129,2	119,6
Niedrigertrag	2002	78,1	79,6	77,0
	2004	100	106,3	102,5

**Quelle:** eigene Berechnungen



**Abbildung 26: Beziehung zwischen der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit (EM 38) und dem Kornertrag am Schafhof 2004**

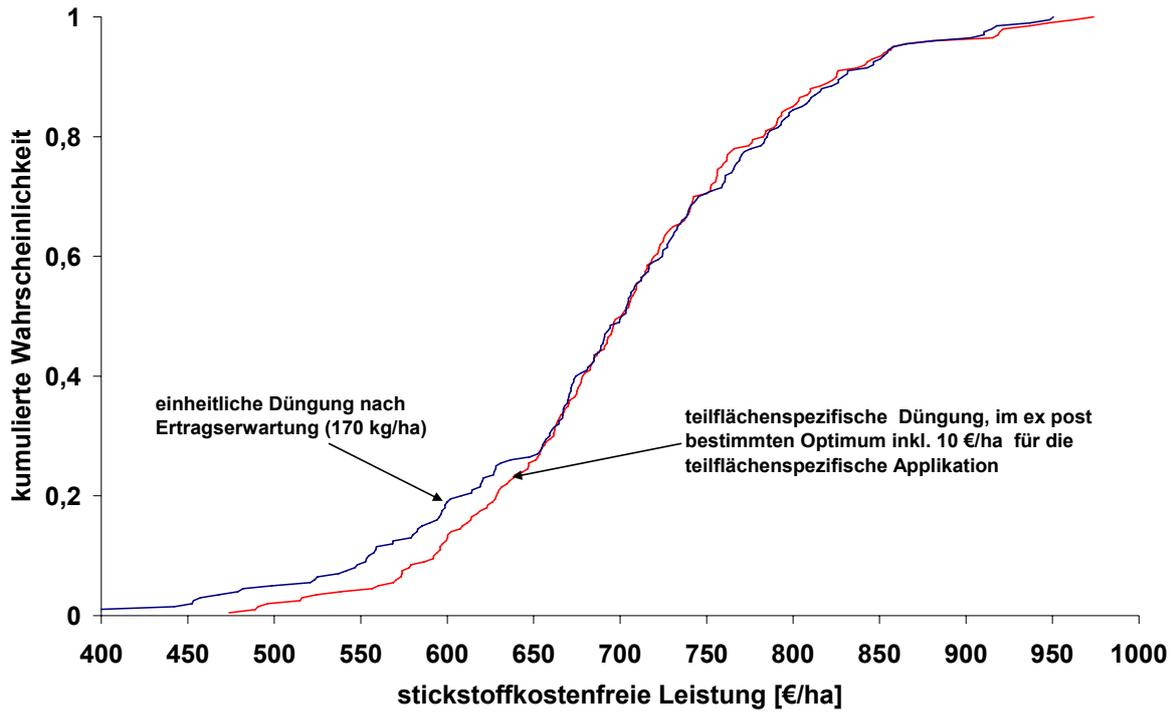
Quelle: eigene Darstellung

**Tabelle 29: Ergebnisse der Varianz- und Kovarianzanalyse in Bezug auf den Winterweizenertrag der untersuchten Düngesysteme am Schafhof (2004)**

Abhängige Variable: Kornertrag	Quadratsumme	Freiheitsgrade	Mittel der Quadrate	F-Wert	Signifikanz
<b>Varianzanalyse</b>					
zwischen den Gruppen (Variante)	177,06	3	59,02	0,721	0,54
innerhalb der Gruppen (Fehler)	23586,21	288	81,89		
<b>Kovarianzanalyse<sup>1</sup></b>					
zwischen den Gruppen (Variante)	169,94	3	56,54	0,799	0,49
innerhalb der Gruppen (Fehler)	20317,4	287	70,79		

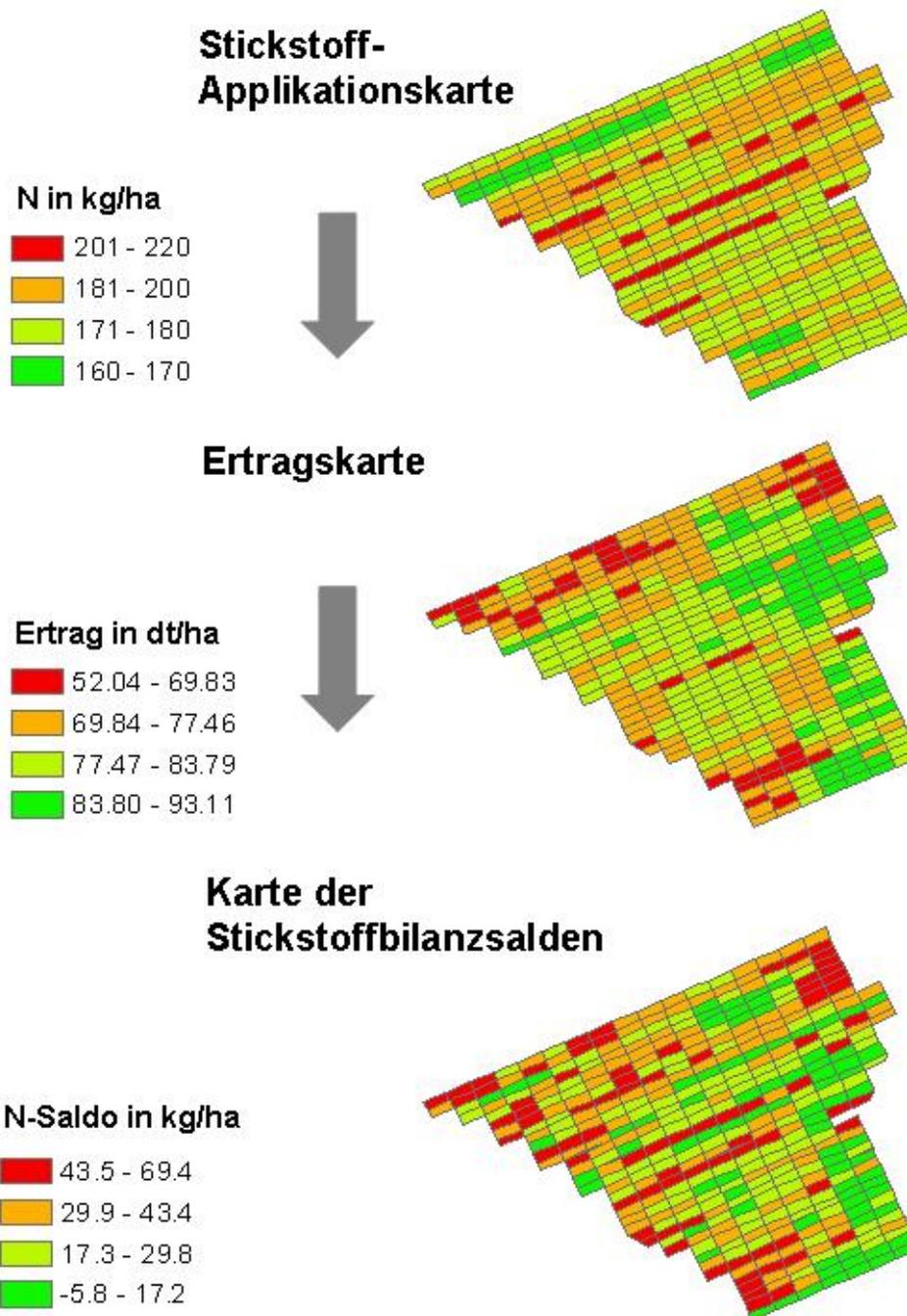
<sup>1</sup>Kovariablen: EM38

Quelle: eigene Berechnungen

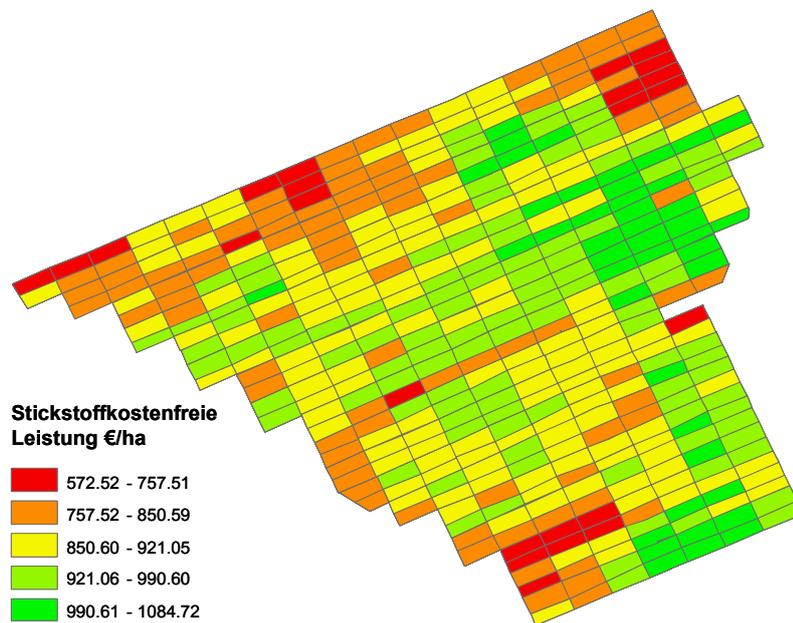


**Abbildung 27: Kumulierte Wahrscheinlichkeitsfunktionen für die stickstoffkostenfreie Leistung bei variabler (inkl. 10 €/ha für die teilflächenspezifische Applikation) und einheitlicher Düngung.**

Quelle: eigene Darstellung



**Abbildung 28: Karte teilflächenspezifischer Stickstoffbilanzsalden am Versuchsfeld Schafhof im Jahr 2002,  
Quelle: eigene Darstellung**



**Abbildung 29: Beispiel einer Deckungsbeitragskarte eines Winterweizenschlages, Schafhof 2002.**

Quelle: eigene Darstellung

## Lebenslauf

Name: Gandorfer  
Vorname: Markus  
Geburtsdatum: 7.1.1977  
Geburtsort: München  
Familienstand: ledig

### Schul- und berufliche Ausbildung und beruflicher Werdegang

1983– 1987	Grundschule (Moosburg an der Isar)
1987 – 1996	Karl – Ritter- von- Frisch- Gymnasium (Moosburg an der Isar)
Nov. 1996 – April 2002	Studium der Gartenbauwissenschaften an der Technischen Universität München – Weihenstephan
1.5.1999 – 30.8.1999	Praktikum bei der Fachberatungsstelle, der Erzeugerringe für ökologischen Land- und Gartenbau Bioland/Naturland
1.9.1999 – 31.10.1999	Praktikum beim Gärtnerhof Löwenzahn, Bioland Gemüsebaubetrieb, Wasserburg am Inn
1.3.2000 – 30.4.2000	Praktikum bei der Gärtnerei Wolf, Zierpflanzenbaubetrieb, Haag an der Amper
seit Mai 2002	wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaues, Technische Universität München