

Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften  
der Naturwissenschaftlichen Fakultät III  
der  
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

## **Ökonomische Potenziale von Precision Farming unter Risikoaspekten**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades  
doctor agriculturarum (Dr. agr.)

vorgelegt von

Diplomagraringenieur Martin Schneider  
geb. am 02.03.1981 in Leipzig

*Gutachter:*

Univ.-Prof. Dr. P. Wagner  
Univ.-Prof. Dr. O. Christen  
Univ.-Prof. Dr. H. Auernhammer

Verteidigung am: 07.11.2011  
Dekan: Univ.-Prof. Dr. P. Wycisk

Halle/Saale 2011



Berichte aus der Agrarökonomie

**Martin Schneider**

**Ökonomische Potenziale von  
Precision Farming unter Risikoaspekten**

Shaker Verlag  
Aachen 2011

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Halle, Univ., Diss., 2011

Copyright Shaker Verlag 2011

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0720-6

ISSN 1617-7533

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Vorwort

Nach Abschluss der vorliegenden Arbeit möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Gelingen beigetragen haben:

Herrn Prof. Dr. Wagner für die Überlassung des Themas und die Betreuung, für seine Hinweise, Anregungen und die Geduld, aber vor allem auch für seine Förderung und Unterstützung und den gewährten Freiraum.

Herrn Prof. Dr. Spilke für die Unterstützung bei der Methodenfindung zur statistischen Auswertung der Feldversuche.

Allen Kolleginnen und Kollegen, die im Forschungsverbundprojekt *pre agro II* mitgearbeitet haben. Der interdisziplinäre Austausch war immer sehr interessant und befruchtend.

Den Mitarbeitern auf den drei Versuchsstandorten im Landwirtschaftsbetrieb Träger-Farny, der WIMEX Agrarprodukte Import & Export GmbH sowie den Mitarbeitern des Hofes Pfaffendorf.

Danken möchte ich auch allen Kolleginnen und Kollegen an der Professur für landwirtschaftliche Betriebslehre.

Nicht zuletzt gehört mein Dank meiner Familie und meinen Freunden.



# I Inhaltsverzeichnis

II	Tabellenverzeichnis	iii
III	Abbildungsverzeichnis	vi
IV	Abkürzungsverzeichnis	ix
1	Einleitung	
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Aufbau der Arbeit	3
2	Precision Farming	
2.1	allgemeine Begriffsabgrenzung	4
2.2	Funktionsweise des Precision Farming	5
2.2.1	Heterogenitätsindikatoren für Precision Farming	6
2.2.2	Entscheidungsregeln für Precision Farming	8
3	Stand der Forschung: Wirtschaftlichkeit des Precision Farming	
3.1	Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit	16
3.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen aus der Literatur	18
3.3	Fazit: Stand des Wissens in der Literatur	24
4	Material und Methoden	
4.1	Feldversuche	25
4.1.1	Allgemeine Vorgehensweise	25
4.1.2	Versuchsstandorte	27
4.1.3	Versuchsdesign	29
4.1.4	Versuchsauswertung	31
4.2	Wirtschaftlichkeitsaspekten des Precision Farming	
4.2.1	Allgemeine Vorüberlegungen	38
4.2.2	Kostenbetrachtung	40
4.2.3	Leistungsbetrachtung unter Unsicherheit	41
4.3	Umfragen unter Precision Farming Praktikern	
4.3.1	Umfrage zum Arbeitszeitbedarf für Precision Farming	49
4.3.2	Umfrage zu den indirekt bewertbaren Leistungen des Precision Farming	50
5	Einzelne Technologien des Precision Farming – Entscheidungsregeln und Effekte	
5.1	Teilflächenspezifische Aussaat	
5.1.1	Allgemeine Herangehensweise	51
5.1.2	Entscheidungsregeln für die teilflächenspezifische Aussaat	52
5.1.3	Effekte der teilflächenspezifischen Aussaat	53
5.2	Teilflächenspezifische Grunddüngung	
5.2.1	Allgemeine Herangehensweise	56
5.2.2	Entscheidungsregeln für die teilflächenspezifische Grunddüngung	61
5.2.3	Effekte der teilflächenspezifischen Grunddüngung	63

5.3	Teilflächenspezifische Stickstoffdüngung	71
5.3.1	Allgemeine Herangehensweise	71
5.3.2	Entscheidungsregeln für die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung	72
5.3.3	Effekte der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung	79
5.4	Teilflächenspezifischer Pflanzenschutz	
5.4.1	Allgemeine Herangehensweise	84
5.4.2	Entscheidungsregeln für den teilflächenspezifischen Pflanzenschutz	87
5.4.3	Effekte des teilflächenspezifischen Pflanzenschutzes	88
5.5	Weitere Technologien zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung	
5.5.1	Teilflächenspezifische Bodenbearbeitung	91
5.5.2	Teilflächenspezifische Bewässerung	93
5.6	Zusammenfassung und Zwischenfazit	94
6	Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit des Precision Farming unter Risikoaspekten	
6.1	Effekte des Precision Farming allgemein	96
6.1.1	Arbeitszeitbedarf für Precision Farming	97
6.2	teilflächenspezifische Aussaat	
6.2.1	Kostenbetrachtung	101
6.2.2	Leistungsbetrachtung	102
6.3	teilflächenspezifische Grunddüngung	
6.3.1	Kostenbetrachtung	104
6.3.2	Leistungsbetrachtung	105
6.4	teilflächenspezifische Stickstoffdüngung	
6.4.1	Kostenbetrachtung	108
6.4.2	Leistungsbetrachtung	110
6.5	gesamtbetriebliche Betrachtung	119
7	Diskussion und Schlussfolgerung	
7.1	Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse	124
7.2	Diskussion notwendiger Entwicklungspfade des Precision Farming	136
8	Zusammenfassung	141
9	Summary	144
10	Literatur	147
11	Anhang	163

## II Tabellenverzeichnis

- Tabelle 2.1: Aufstellung verschiedener „off-season“ Heterogenitätsindikatoren für Precision Farming und deren Herkunft
- Tabelle 2.2: Ergebnisse für ein Modellfeld mit drei unterschiedlichen simulierten Stickstoffdüngestrategien
- Tabelle 2.3: Ergebnisse der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung im Vergleich zur flächeneinheitlichen Behandlung mit steigender Ineffizienz des Precision Farming Ansatzes
- Tabelle 3.1: Zusammenfassung von Ergebnissen aus einzelnen Untersuchungen zu den Effekten verschiedener Precision Farming Technologien nach Schneider (2005)
- Tabelle 4.1: Übersicht der Modellanpassung der zwei verschiedenen Stufen für den Feldversuch 330\_2006
- Tabelle 4.2: Ergebnisse des Feldversuches 330\_2006
- Tabelle 4.3: Drei verschiedene heuristische Herangehensweisen zur Berücksichtigung von Risiko. (nach Odening, 2001, S. 133, ff.)
- Tabelle 4.4: Ausgewählte Klima-Charakteristika der drei verschiedenen Versuchsjahre
- Tabelle 4.5: real erzielbare Produktpreise der einzelnen Versuchsjahre, erhoben zum Zeitpunkt der Ernte
- Tabelle 4.6: Übersicht der verschiedenen Simulationsläufe mit ihren unterschiedlichen Annahmen
- Tabelle 5.1: Aufstellung der durchgeführten Feldversuche zur teilflächenspezifischen Aussaat mit Aussaatmengen
- Tabelle 5.2: Ergebnisse der Feldversuche zur teilflächenspezifischen Aussaat
- Tabelle 5.3: Auswahl an Literaturstellen zu Rastergrößen für eine Bodenbeprobung
- Tabelle 5.4: Ranking der einzelnen Beprobungsherangehensweisen nach ihrer Genauigkeit zur realen Nährstoffversorgung
- Tabelle 5.5: Flächenanteile der einzelnen Nährstoffgehaltsklassen für das Feld 550 sowie die prozentualen Ertragseffekte für Phosphor und Kalium beim Vergleich von Nichtdüngung zu Düngung
- Tabelle 5.6: Die Fruchtfolgen der Versuchsschläge im Planungszeitraum

- Tabelle 5.7: Differenz des Nährstoffbedarfs der teilflächenspezifischen im Vergleich zur flächeneinheitlichen Applikation
- Tabelle 5.8: Ergebnisse des Ertrags-Monitorings auf dem Feld „Mittelfleck“ nach der teilflächenspezifischen Makronährstoffapplikation in zwei Jahren
- Tabelle 5.9: Gegenüberstellung zweier praxisverfügbarer Sensorsysteme zur Online-Stickstoffdüngung entsprechend ihrer Funktionsweise
- Tabelle 5.10: Auflistung der Vor- und Nachteile des Einsatzes künstlicher neuronaler Netze (Quelle: nach Mirschel et al., 2003)
- Tabelle 5.11: Zusammenfassung der Ergebnisse aus 10 Feldversuchen zur Bewertung der drei unterschiedlichen teilflächenspezifischen Stickstoffdüngestrategien „Karte“, „Sensor“ und „Netz“ zu Winterweizen
- Tabelle 5.12: Zusammensetzung der Effekte der drei teilflächenspezifischen Düngestrategien gegenüber der flächeneinheitlichen Düngung: Kamen die Effekte aus Unterschieden in der Düngehöhe ( $\Delta$  Stickstoff) oder/und Unterschieden im Ertrag ( $\Delta$  Ertrag)? (alle Angaben in €/ha)
- Tabelle 5.13: Zusammenfassung der Ergebnisse aus 2 Feldversuchen zur Bewertung unterschiedlicher teilflächenspezifischer Stickstoffdüngungsansätze auf Basis der Strategie „Karte“ zu Winterraps
- Tabelle 5.14: Ergebnisse zu Spritzmitteleinsparungen durch eine teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung, gefunden in der Literatur
- Tabelle 6.1: Arbeitszeiteinsparungen durch Parallelfahrssysteme, ermittelt in einer Umfrage unter Anwendern
- Tabelle 6.2: Zusammenstellung der Kosten für die teilflächenspezifische Aussaat in Abhängigkeit des jährlichen Einsatzumfangs
- Tabelle 6.3: Bestimmung des Break-Even für die teilflächenspezifische Aussaat in Abhängigkeit vom jährlichen Einsatzumfang und der Anzahl an Jahren mit zu erwartenden Effekten
- Tabelle 6.4: Aufwand- und Kostenübersicht zu verschiedenen Herangehensweisen der teilflächenspezifischen Grundnährstoffinventur
- Tabelle 6.5: Unterstellte Ernteerträge sowie Produkt- und Faktorpreise für die Modellberechnung
- Tabelle 6.6: Ergebnisse der Modellberechnung zum Vergleich der flächeneinheitlichen Düngung (nach Entzug) und der teilflächenspezifischen Düngung (entsprechend des kleinräumigen Bedarfs)

- Tabelle 6.7: Sensitivitätsanalyse auf die getroffenen Annahmen zum Vergleich der teilflächenspezifischen und flächeneinheitlichen Herangehensweise
- Tabelle 6.8: Zusammenfassung der notwendigen Investitionen und jährlichen Kosten für drei Strategien zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung
- Tabelle 6.9: Arbeitszeitbedarf für die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung
- Tabelle 6.10: getroffene Annahmen für die Risikoanalyse des Ausgangsszenarios
- Tabelle 6.11: Ergebnisse des Simulationslaufes im Ausgangsszenario
- Tabelle 6.12: Übersicht der verschiedenen Witterungswahrscheinlichkeiten der drei Simulationsläufe
- Tabelle 6.13: Einstellungen der Simulation für das niedrige bzw. hohe Marktpreisniveau
- Tabelle 6.14: Varianzen der NKfL für die drei Strategien zu verschiedenen Preisniveaus
- Tabelle 6.15: getroffene Annahmen für die Risikoanalyse des Ausgangsszenarios
- Tabelle 6.16: Zusammenfassung der zusätzlichen Kosten des Precision Farming für 3 verschiedene Technologien
- Tabelle 6.17: Zusammenfassung der durchschnittlichen zusätzlichen Leistungen des Precision Farming für 3 unterschiedliche Technologien.
- Anhang A4.1: Bodenwerte des Versuchsstandortes
- Anhang A4.3: die ausgewählten Modelle und deren Ergebnisse der Feldversuchsauswertung
- Anhang A4.5: Zuordnung der Witterungsmuster aus 2005, 2006 und 2007 zu 43 Jahren einer Zeitreihe von Witterungsdaten

### III Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 2.1: Unterteilung des Begriffes Precision Farming in vier Untereinheiten, nach Auernhammer (2004) verändert
- Abbildung 2.2: Modellhafte Darstellung eines Feldes mit vier unterschiedlichen Teilflächen und deren Produktionsfunktionen
- Abbildung 4.1: Versuchsdesign des Stickstoffdüngungsversuches zu Winterweizen auf dem Schlag 330, 2006
- Abbildung 4.2: Allgemeiner Ablauf der Modellanpassung des gemischten linearen Modells
- Abbildung 4.3: Plot der Resteffekte des einfachsten Modells entlang der X-Koordinate
- Abbildung 4.4: Plot der Resteffekte des am besten angepassten Modells entlang der X Koordinate
- Abbildung 4.5: Schematische Darstellung der Veränderung der optimalen speziellen Intensität des Informationseinsatzes bei sinkenden Kosten der Informationsakquise durch technischen Fortschritt
- Abbildung 4.6: Ergebnis einer Simulation in Form von kumulierten Wahrscheinlichkeitskurven für drei verschiedene Alternativstrategien
- Abbildung 5.1: Beprobungsherangehensweise von Betrieben, die eine teilflächenspezifische Grundnährstoffkartierung durchführen – Ergebnisse einer Umfrage
- Abbildung 5.2: Beprobungsherangehensweise auf dem Schlag 550 zur Bestimmung der kleinräumigen Makronährstoffvariabilität (links) und das Ergebnis für Phosphor (rechts)
- Abbildung 5.3: Ausschnitt aus der simulierten 1-ha-Beprobung, eher homogenere Rasterzelle (links) und eher heterogenere Rasterzelle (rechts)
- Abbildung 5.4: Allgemeines Ablaufdiagramm der Grunddüngung von Wenkel et al. (2004)
- Abbildung 5.5: Mögliche relative Ertragseffekte nach Phosphordüngung und entsprechenden Ausgangsnährstoffgehalten im Boden über alle Fruchtarten und verschiedene Bodenarten (links) und für einzelne Fruchtarten (rechts), nach Kerschberger und Schröter (1996)

- Abbildung 5.6: Mögliche relative Ertragseffekte nach Kaliumdüngung und entsprechenden Ausgangsnährstoffgehalten im Boden über alle Fruchtarten und verschiedene Bodenarten (links) und für einzelne Fruchtarten (rechts), nach Kerschberger und Schröter (1998)
- Abbildung 5.7: Ergebnis der Grundnährstoffbeprobung nach Einteilung der Gehaltsklassen für die Makronährstoffe Phosphor, Kalium, Magnesium und den pH-Wert
- Abbildung 5.8: Ergebnis der Bodenuntersuchung für zwei Felder in Niedersachsen nach Einteilung in Gehaltsklassen für die Makronährstoffe Phosphor, Kalium, Magnesium und den pH-Wert
- Abbildung 5.9: Ablauf von Training und Einsatz des künstlichen neuronalen Netzes (Wagner et al., 2005)
- Abbildung 5.10: Vereinfachte Darstellung eines Entscheidungsbaumes zur ersten Stickstoffgabe (Wagner et al., 2005)
- Abbildung 5.11: Entscheidungsregeln zur räumlich differenzierten Bodenbearbeitung, entwickelt von Sommer und Voßhenrich (2004)
- Abbildung 6.1: Ergebnisse der Umfrage unter Landwirten zu den Leistungen des Precision Farming, geordnet nach Häufigkeit der Nennung
- Abbildung 6.2: Häufigkeit der in der Umfrage genannten teilflächenspezifischen Technologien
- Abbildung 6.3: Häufigkeit der Nennung von allgemeinen Arbeiten, die in Zusammenhang mit Precision Farming stehen
- Abbildung 6.4: Ermittlung der Break-Even Punkte für die teilflächenspezifische Aussaat in Abhängigkeit der prozentualen Saatguteinsparung für verschiedene Fruchtarten
- Abbildung 6.5: Entwicklung der Kosten je Hektar in Abhängigkeit des jährlichen Einsatzumfangs
- Abbildung 6.6: kumulierte Wahrscheinlichkeitskurve der Ergebnisse des Ausgangsszenarios
- Abbildung 6.7: Ergebnisse der Simulationsläufe zu verschiedenen Witterungsmustern
- Abbildung 6.8: Ergebnisse der Simulationsläufe zu zwei unterschiedlichen Marktpreisniveaus

- Abbildung 6.9: Ergebnisse der Simulation zur veränderten Basis an Feldversuchsergebnissen zur Strategie „Sensor“
- Abbildung 6.10: Anteile der einzelnen Precision Farming Kostenarten an den Gesamtkosten für einen 1.000 bzw. 2.000 ha Betrieb.
- Abbildung 7.1: Verbesserungspotenziale des Precision Farming an den unterschiedlichen Prozessebenen
- Anhang A4.2: Klimadiagramme des Versuchsstandortes
- Anhang A4.4: Fragebogen zur Ermittlung des Arbeitszeitbedarfs
- Abbildung A5.1: Ergebnisse der Bodenbeprobung auf dem Schlag 550 der einzelnen Grundnährstoffe und des pH-Wertes; (v.l.o.n.r.u): pH-Wert, Phosphor, Kalium, Magnesium
- Abbildung A5.2: Ausgewählte Beprobungsraster mit Einzeleinstichen der virtuellen Beprobung auf dem Feld 550 der Domäne Görzig
- Abbildung A5.3: Versuchsdesign zur teilflächenspezifischen und flächeneinheitlichen Grundnährstoffbeprobung auf dem Feld „Mittelfleck“ in Sachsen-Anhalt

## IV Abkürzungsverzeichnis

a	anno (Jahr)
AICC	Korrigiertes Akaike Information Criteria (siehe Akaike, 1973)
AK	Arbeitskraft
AKh	Arbeitskraftstunden
AKmin	Arbeitskraftminuten
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
cm	Zenitmeter
c.p.	cetaris paribus
D-GPS	differenziertes GPS
DB	Deckungsbeitrag
DM	Deutsche Mark
dt	Dezitonne
€	Euro (1 € = 1,95583 DM)
ER	Entscheidungsregeln
ff.	folgende
GIS	Geografisches Informationssystem
GPS	Global Positioning System
h	Stunde
ha	Hektar
K	Kalium
kg	Kilogramm
KNN	künstliche neuronale Netze
kWh	Kilowatt Stunden
LAI	leaf aera index (Blattflächenindex)
LUFÄ	Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt
m	Meter
Max	Maximum
Mg	Magnesium
ML	Maximum Likelihood
min	Minute
Min	Minimum
Mod.	Modalwert bzw. Modus
Mrd.	Milliarde
N	Stickstoff
N1, 2, 3	erste, zweite, dritte Stickstoffgabe
NIR	nah infrarot Reflektion
NIT	nah infrarot Transmission
NKfL	stickstoffkostenfreie Leistung
NN	normal Null
OFR	„On-Farm-Research“ (Praxisfeldversuch)
P	Phosphor
p.a.	per annum
PF	Precision Farming
PSM	Pflanzenschutzmittel
R <sup>2</sup>	Bestimmtheitsmaß

REIP	Red edge inflection point
REML	Restricted Maximum Likelihood
SE	Standardfehler
SKfL	saatgutkostenfreie Leistung
u.a.	unter anderem
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalten
z.B.	zum Beispiel