

Berliner Schriften zur Agrar- und Umweltökonomik

Band 23



Weiterentwicklung eines
sektorkonsistenten
Betriebsgruppenmodells um
Treibhausgasemissionen
und Bewertung
von ausgewählten
Minderungsstrategien

Julian Braun

**SHAKER
VERLAG**

**Weiterentwicklung eines sektorkonsistenten
Betriebsgruppenmodells um Treibhausgasemissionen
und Bewertung von ausgewählten Minderungsstrategien**

Dissertation

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

eingereicht an der
Lebenswissenschaftlichen Fakultät
der Humboldt-Universität zu Berlin

von
M.Sc. Julian Braun
geboren am 20.10.1983 in Berlin

Präsidentin der Humboldt-Universität zu Berlin
Prof. Dr.-Ing. Sabine Kunst

Dekan der Lebenswissenschaftlichen Fakultät der Humboldt-Universität zu Berlin
Prof. Dr. Bernhard Grimm

Gutachter

1. Prof. Dr. Dr. h.c. Dieter Kirschke
2. Dr. Frank Offermann
3. PD Dr. Andreas Meyer-Aurich

Tag der mündlichen Prüfung: 02. Oktober 2019

Berliner Schriften zur Agrar- und Umweltökonomik

herausgegeben von
Dieter Kirschke, Martin Odening, Harald von Witzke
Humboldt-Universität zu Berlin

Band 23

Julian Braun

**Weiterentwicklung eines sektorkonsistenten
Betriebsgruppenmodells um
Treibhausgasemissionen und Bewertung von
ausgewählten Minderungsstrategien**

Shaker Verlag
Düren 2020

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.: Berlin, Humboldt-Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7240-2

ISSN 1618-8160

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während der Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Agrarpolitik an der Humboldt-Universität zu Berlin und am Thünen-Institut für Betriebswirtschaft in Braunschweig.

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denen herzlich bedanken, die mich bei der Anfertigung meiner Dissertation so tatkräftig unterstützt haben.

Prof. Dr. Dr. h.c. Dieter Kirschke möchte ich für die vielen guten Hinweise und Anregungen danken, die mir bei der Ausarbeitung dieser Arbeit eine wertvolle Hilfe waren.

Dr. Frank Offermann hat die Arbeit während meiner Zeit am Thünen-Institut für Betriebswirtschaft betreut. Ihm gilt mein ganz besonderer Dank für die vielen Diskussionen und für die stete Bereitschaft, meine unzähligen Fragen zum Modell geduldig zu beantworten.

PD Dr. habil. Andreas Meyer-Aurich danke ich für die guten Kommentare und Anmerkungen sowie für die Bereitschaft zur Übernahme des externen Gutachtens.

Dr. Astrid Häger, Kerstin Oertel und Helga Meaini möchte ich für die freundschaftlichen Gespräche am Fachgebiet für Agrarpolitik danken, die immer eine willkommene Abwechslung waren.

Weiterhin möchte ich Yusuf Nadi Karatay, Lukas Scholz und Jonas Bamberg für den fachlichen und auch insbesondere den außerfachlichen Austausch danken, der mich auf meinem Weg zur Vollendung der Arbeit immer wieder bestärkt hat.

Mein ganz besonderer Dank geht an meine Familie, die mir während der Anfertigung der Arbeit immer uneingeschränkt helfend zur Seite stand. Jules Braun und Wiebke Wolters danke ich für das aufwendige Korrekturlesen.

Dr. Kim Sophie Mengerling hat durch ihre immerwährende Kraft und das Vertrauen in mich zu dem Gelingen dieser Arbeit einen großen Teil beigetragen.

Vielen Dank!

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Inhaltsverzeichnis.....	iii
Abbildungsverzeichnis.....	vi
Tabellenverzeichnis.....	viii
Abkürzungsverzeichnis.....	xi
1 Einleitung.....	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Zielstellung	2
1.3 Vorgehensweise.....	3
2 Emissionen klimarelevanter Gase und Klimaschutzpolitik im Agrarsektor.....	7
2.1 Bedeutung der Emissionen klimarelevanter Gase aus der Landwirtschaft.....	7
2.1.1 Methan	8
2.1.2 Lachgas	10
2.1.3 Kohlendioxid.....	11
2.2 Klimapolitische Rahmenbedingungen.....	13
2.2.1 Europäische Ebene.....	13
2.2.1.1 <i>Klimapolitische Ziele der EU</i>	13
2.2.1.2 <i>Klimaschutzrelevante Maßnahmen für die Landwirtschaft</i>	15
2.2.2 Nationale Ebene.....	18
2.2.2.1 <i>Klimaschutzpolitische Ziele der Bundesregierung</i>	18
2.2.2.2 <i>Klimaschutzrelevante Maßnahmen für die Landwirtschaft</i>	21
2.3 Erfassung von THG-Emissionen aus dem Agrarsektor.....	23
2.3.1 Emissionsberichterstattung (UNFCCC-Systematik).....	23
2.3.2 Umweltökonomische Gesamtrechnung	25
2.3.3 Ökobilanzierung	27
2.3.4 CO ₂ -Fußabdruck (Carbon Footprint).....	28
2.4 Fazit des Kapitels	28
3 Ökonomische Modelle zur Abschätzung von THG-Emissionen aus der Landwirtschaft.....	31
3.1 Systematik von quantitativen Modellen in der Agrarumweltanalyse	31

3.2 Gesamtwirtschaftliche Modelle	34
3.2.1 EPPA.....	34
3.2.2 PRIMES/GENESIS/GAINS	35
3.2.3 GTEM.....	36
3.3 Sektorale und regionale Modelle	37
3.3.1 CAPRI	37
3.3.2 FASOM-GHG	38
3.4 Einzelbetriebliche Modelle	40
3.4.1 EFEM	40
3.4.2 AROPA-GHG	42
3.5 Schlussfolgerungen für die vorliegende Arbeit	43
4 Implementierung von THG-Emissionen in FARMIS	49
4.1 Das Betriebsgruppenmodell FARMIS	49
4.1.1 Modellsystem	49
4.1.1.1 <i>Datenbasis und Datenaufbereitung</i>	51
4.1.1.2 <i>Generierung der Input-/Outputkoeffizienten</i>	52
4.1.1.3 <i>Beschreibung der Zielfunktion, Restriktionen und Kalibrierung</i>	53
4.1.1.4 <i>Szenarienanalyse und Ergebnisauswertung</i>	55
4.1.2 Abbildung des Pachtmarktes für Boden	56
4.1.3 Abbildung von pflanzlichen Verfahrensalternativen.....	57
4.2 Implementierte Anpassungsmöglichkeiten.....	58
4.2.1 Verfahrensalternativen für pflanzliche Produktionsverfahren	58
4.2.2 Differenzierung von organischen und mineralischen Böden	61
4.3 Systematik zur Berechnung von THG-Emissionen im Agrarsektor.....	66
4.4 Berechnung und Implementierung von THG-Emissionen in FARMIS	69
4.4.1 Berechnung und Implementierung von N ₂ O-Emissionen	71
4.4.1.1 <i>Direkte N₂O-Emissionen</i>	72
4.4.1.2 <i>Indirekte N₂O-Emissionen</i>	80
4.4.2 Berechnung und Implementierung von CH ₄ -Emissionen.....	82
4.4.2.1 <i>Enterische Fermentation</i>	83
4.4.2.2 <i>Wirtschaftsdüngerlagerung</i>	84
4.4.3 Berechnung und Implementierung von CO _{2aq} -Emissionen	85
4.4.3.1 <i>Organische Böden</i>	86
4.4.3.2 <i>Kalkung</i>	87
4.4.3.3 <i>Produktion von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln</i>	88
4.4.3.4 <i>Einsatz von Diesel, Heizöl, Elektrizität und Schmierstoffen</i>	89

4.5 Einordnung der Modellergebnisse	90
4.6 Abbildung von THG-Minderungspolitiken.....	95
4.6.1 Abbildung einer Steuer auf CO _{2aq} -Emissionen.....	95
4.6.2 Abbildung einer Stickstoffüberschussabgabe	96
4.7 Fazit des Kapitels	97
5 Ergebnisse der Modellrechnungen.....	99
5.1 Referenzszenario	100
5.1.1 Beschreibung der Baseline 2025.....	100
5.1.2 THG-Emissionen in der Baseline 2025.....	101
5.2 Implementierter Politikansatz: direkte Emissionsbesteuerung	105
5.2.1 Auswirkungen auf das THG-Inventar nach Entstehungsbereichen und Betriebsformen	106
5.2.2 Auswirkungen auf die Produktionsstruktur.....	109
5.2.3 Auswirkungen auf ökonomische Kennzahlen	113
5.2.4 Zwischenfazit	120
5.3 Implementierter Politikansatz: Stickstoffüberschussabgabe	120
5.3.1 Auswirkungen auf das THG-Inventar nach Entstehungsbereichen und Betriebsformen	121
5.3.2 Auswirkungen auf die Produktionsstruktur.....	127
5.3.3 Auswirkungen auf ökonomische Kennzahlen	131
5.3.4 Zwischenfazit	137
6 Zusammenfassende Gegenüberstellung, Diskussion und Schlussfolgerungen.....	139
6.1 Zusammenfassende Gegenüberstellung der Modellergebnisse	140
6.2 Diskussion und Schlussfolgerungen	145
6.3 Zukünftiger Forschungsbedarf.....	151
Zusammenfassung	155
Abstract.....	163
Literatur.....	171
Anhang	185

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anteil THG-Emissionen gesamt und aus der Landwirtschaft in Deutschland in 2015 (ohne LULUCF).....	8
Abbildung 2: Entwicklung der Methan (CH_4)-Emissionen in kt $\text{CO}_{2\text{äq}}$, differenziert nach Sektoren	9
Abbildung 3: Entwicklung der Lachgas (N_2O)-Emissionen in kt $\text{CO}_{2\text{äq}}$, differenziert nach Sektoren	11
Abbildung 4: Entwicklung der Kohlendioxid (CO_2)-Emissionen in kt, differenziert nach Sektoren	12
Abbildung 5: Bausteine des sektoralen Berichtsmoduls Landwirtschaft	26
Abbildung 6: Vergleich der Grenzvermeidungskosten unterschiedlicher Szenarien aus CAPRI, AROPA-GHG und EFEM	44
Abbildung 7: Schema des Lösungsweges von FARMIS.....	50
Abbildung 8: Schematische Darstellung der Differenzierung von Verfahrensalternativen für Ackerverfahren	59
Abbildung 9: Schematische Darstellung der Differenzierung von Intensitätsstufen für die Grünlandbewirtschaftung	60
Abbildung 10: Verteilung der Moorflächen (Acker- und Grünland) in Deutschland, differenziert nach Bundesländern	62
Abbildung 11: Verteilung der Moorflächen (Acker- und Grünland) in Deutschland, differenziert nach Intensitätsstufen und Betriebsformen.....	63
Abbildung 12: Vergleich: UNFCCC-Systematik und sektorale Systematik	67
Abbildung 13: Schematische Darstellung der in FARMIS implementierten THG-Quellen	70
Abbildung 14: THG-Emissionen in der Baseline 2025, differenziert nach Bundesländern	105
Abbildung 15: Auswirkungen einer $\text{CO}_{2\text{äq}}$ -Steuer zwischen 2,5 – 30 €/t $\text{CO}_{2\text{äq}}$ auf die THG-Emissionen differenziert nach Bundesländern	107
Abbildung 16: Umfänge wiedervernässter Flächen bei einer $\text{CO}_{2\text{äq}}$ -Steuer von 6,1 €/t $\text{CO}_{2\text{äq}}$ -Emissionen, differenziert nach Bundesländern.....	112
Abbildung 17: Grenzvermeidungskostenkurve bei einer $\text{CO}_{2\text{äq}}$ -Steuer zwischen 2,5 – 30 €/t $\text{CO}_{2\text{äq}}$ -Emissionen.....	114
Abbildung 18: Änderung der THG-Emissionen bei einer $\text{CO}_{2\text{äq}}$ -Steuer zwischen 2,5 – 30 €/t $\text{CO}_{2\text{äq}}$, differenziert nach Bundesländern	114

Abbildung 19: Änderung des Betriebseinkommens bei einer CO _{2äq} -Steuer zwischen 2,5 – 30 €/t CO _{2äq} , differenziert nach Bundesländern.....	116
Abbildung 20: Steuerabgaben bei einer CO _{2äq} -Steuer von 6,1 €/t CO _{2äq} -Emissionen, differenziert nach Bundesländern im Vergleich: UNFCCC-Systematik vs. eigene Systematik	119
Abbildung 21: Auswirkungen einer N-Überschussabgabe zwischen 1 – 15 €/kg N auf die THG-Emissionen, differenziert nach Betriebsformen.....	122
Abbildung 22: Auswirkungen einer N-Überschussabgabe zwischen 1 – 15 €/kg N auf die THG-Emissionen, differenziert nach Bundesländern.....	123
Abbildung 23: Auswirkungen einer N-Überschussabgabe von 9,1 €/kg N auf die Landnutzungsintensitäten auf Acker- und Grünland, differenziert nach Betriebsformen.....	129
Abbildung 24: Grenzvermeidungskosten bei einer N-Überschussabgabe zwischen 1 – 15 €/kg N	132
Abbildung 25: Änderung des Betriebseinkommens bei einer N-Überschussabgabe zwischen 1–15 €/kg N, differenziert nach Betriebsformen.....	136
Abbildung 26: Steuerabgaben bei einer N-Überschussabgabe von 9,1 €/kg N differenziert nach Betriebsformen im Vergleich: UNFCCC-Systematik vs. eigene Systematik	137
Abbildung 27: Vergleich der Grenzvermeidungskosten unterschiedlicher Szenarien aus CAPRI, AROPA-GHG, EFEM und FARMIS.....	148
Abbildung 28: Schematische Darstellung der in FARMIS implementierten THG-Quellen	157
Figure 29: Schematic representation of the GHG sources implemented in FARMIS	165

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Klimaschutzrelevante Ansätze in der GAP	16
Tabelle 2:	Emissionshöchstmengen der NEC-Richtlinie und Reduktionsverpflichtungen der neuen NEC-Richtlinie	17
Tabelle 3:	Zusammenfassung der klimaschutzrelevanten Maßnahmen in der Landwirtschaft und Landnutzung im Klimaschutzplan 2050	20
Tabelle 4:	Zusammenfassung der klimaschutzrelevanten Maßnahmen in der DüV 2017	22
Tabelle 5:	Systematik von quantitativen Modellen in der Agrarumweltanalyse	32
Tabelle 6:	Szenarienergebnisse für die EU mit GTEM: Grenzvermeidungskosten und Emissionsreduktionen für 2010	37
Tabelle 7:	Szenarienergebnisse für Deutschland mit CAPRI: Grenzvermeidungskosten in €/tCO _{2aq} und Emissionsreduktionen in % zur Referenz für 2001	38
Tabelle 8:	Szenarienergebnisse für die USA mit ASM-GHG: Grenzvermeidungskosten in \$/MTCE und Emissionsreduktionen in MTCE zur Referenz, differenziert nach THG-Emissionen für 2001	39
Tabelle 9:	Szenarienergebnisse für Baden-Württemberg mit EFEM: Grenzvermeidungskosten in €/tCO _{2aq} und Veränderung der Emissionsreduktionen in % zur Referenz, differenziert nach Betriebsformen	41
Tabelle 10:	Szenarienergebnisse für die EU-15 mit AROPA-GHG: Emissionsreduktion in %, Vermeidungsleistung in MTCO _{2aq} , Grenzvermeidungskosten in €/tCO _{2aq} zur Referenz und Verhältnis der Kostenersparnis für 2001	43
Tabelle 11:	In FARMIS modellierte THG-Emissionen aus der Landwirtschaft und die Detailstufe der Berechnungsverfahren	69
Tabelle 12:	Messergebnisse der THG-Emissionen nach Nutzungskategorie	86
Tabelle 13:	Emissionsfaktoren für Dünge- und Pflanzenschutzmittel	88
Tabelle 14:	Emissionsfaktoren für Energieträger	89
Tabelle 15:	Vergleich von Methan-, Lachgas- und Kohlendioxidemissionen aus FARMIS (Basisjahr 2010-12), GAS-EM Ergebnissen aus dem NIR (UBA 2012) und aus Haenel et al. (2016) für 2010 in Tsd. t CO _{2aq} -Emissionen	90

Tabelle 16:	Vergleich der THG-Emissionen aus den Vorketten und aus den drainierten organischen Böden aus FARMIS (Basisjahr) in Tsd. t CO _{2äq} -Emissionen	93
Tabelle 17:	Überblick über die berechneten Szenarien.....	100
Tabelle 18:	Entwicklung der THG-Emissionen vom Basisjahrzeitraum 2010-2012 zur Baseline 2025	101
Tabelle 19:	THG-Emissionen in der Baseline 2025, differenziert nach Betriebsformen.....	103
Tabelle 20:	Auswirkungen einer CO _{2äq} -Steuer von 6,1 €/t CO _{2äq} -Emissionen auf die Gesamt-THG-Emissionen im Vergleich zur Baseline 2025	109
Tabelle 21:	Auswirkungen einer CO _{2äq} -Steuer von 6,1 €/t CO _{2äq} -Emissionen auf die Produktionsstruktur im Vergleich zur Baseline 2025, differenziert nach Betriebsformen.....	111
Tabelle 22:	Auswirkungen einer CO _{2äq} -Steuer von 6,1 €/t CO _{2äq} -Emissionen auf Einkommensindikatoren im Vergleich zur Baseline 2025, differenziert nach Betriebsformen.....	118
Tabelle 23:	Auswirkungen einer N-Überschussabgabe von 9,1 €/kg N auf die THG-Emissionen im Vergleich zur Baseline 2025, differenziert nach Betriebsformen.....	126
Tabelle 24:	Auswirkungen einer N-Überschussabgabe von ca. 9,1 €/kg N auf die Produktionsstruktur im Vergleich zur Baseline 2025, differenziert nach Betriebsformen.....	130
Tabelle 25:	Auswirkungen einer N-Überschussabgabe von 9,1 €/kg N auf Einkommensindikatoren im Vergleich zur Baseline 2025, differenziert nach Betriebsformen.....	134
Tabelle 26:	Vergleich der Auswirkungen der Szenarien CO ₂ -Tax-5 % und N-Surp-5 % auf die Gesamt-THG-Emissionen.....	141
Tabelle 27:	Vergleich der Auswirkungen der Szenarien CO ₂ -Tax-5 % und N-Surp-5 % auf die Produktionsstruktur.....	143
Tabelle 28:	Vergleich der Auswirkungen der Szenarien CO ₂ -Tax-5 % und N-Surp-5 % auf Einkommensindikatoren	144
Tabelle 29:	Überblick über die berechneten Szenarien.....	159
Table 30:	Overview of the calculated scenarios	167
Tabelle A1:	In EPPA berechnete landwirtschaftliche THG-Emissionen und weitere Gase.....	185
Tabelle A2:	In GTEM berechnete landwirtschaftliche THG-Emissionen	185

Tabelle A3:	In CAPRI berechnete landwirtschaftliche THG-Emissionen.....	185
Tabelle A4:	In FASOM-GHG berücksichtigte landwirtschaftliche THG-Quellen und -Senken.....	186
Tabelle A5:	In EFEM berechnete landwirtschaftliche THG- und Ammoniak Emissionen	186
Tabelle A6:	In AROPA-GHG berechnete landwirtschaftliche THG-Emissionen	187
Tabelle A7:	Durchschnittliche Entwicklung betriebsstruktureller Kennzahlen vom Basisjahrzeitraum 2010-12 zur Baseline 2025	188
Tabelle A8:	Auswirkungen einer CO _{2äq} -Steuer von 6,1 €/t CO _{2äq} -Emissionen auf die Pachtpreise im Vergleich zur Baseline 2025, differenziert nach Bodenqualitäten und Bundesländern	189
Tabelle A9:	Auswirkungen einer N-Überschussabgabe (5% THG- Minderungsziel) auf den Agrarsektor im Vergleich zur Baseline 2025	190

Abkürzungsverzeichnis

AROPA	Agriculture, Recomposition de l'Offre et Politique Agricole
CAPRI	Common Agricultural Policy Regionalised Impact
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ äq	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent
CO ₂ -Tax	Szenario direkte Emissionsbesteuerung
DK	Dauerkultur
DüG	Düngegesetz
DüMV	Düngemittelverordnung
DüV	Düngeverordnung
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EFEM	Economic Farm Emission Model
EHS	Emissionshandelssystem
EU	Europäische Union
FARMIS	Farm Modelling Information System
FB	sonstiger Futterbau
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik
GHG	Greenhouse Gas
GVK	Grenzvermeidungskostenkurven
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KOM	Europäische Kommission
LF	Landwirtschaftliche Fläche
LULUCF	Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft
MF	Marktfrucht
MI	Milchvieh
MMTCE	Million Metric Tons of Carbon Equivalent
N-Surp	Szenario Stickstoffüberschussabgabe
NIR	Treibhausgasinventarbericht
N ₂ O	Lachgas
PMP	Positive Mathematische Programmierung
RAUMIS	Regionalisiertes Agrar- und Umweltinformationssystem
TBN	Testbetriebsnetz
THG	Treibhausgas
THG-E	Treibhausgas-Emission
UBA	Umweltbundesamt
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
VE	Veredlung