AgEcon SEARCH
RESEARCH IN AGRICULTURAL & APPLIED ECONOMICS

The World's Largest Open Access Agricultural & Applied Economics Digital Library

This document is discoverable and free to researchers across the globe due to the work of AgEcon Search.

Help ensure our sustainability.

Give to AgEcon Search

AgEcon Search
http://ageconsearch.umn.edu
aesearch@umn.edu

*Papers downloaded from **AgEcon Search** may be used for non-commercial purposes and personal study only. No other use, including posting to another Internet site, is permitted without permission from the copyright owner (not AgEcon Search), or as allowed under the provisions of Fair Use, U.S. Copyright Act, Title 17 U.S.C.*

Die Entwicklung der Produktivität von Marktfruchtbetrieben unter Berücksichtigung von Treibhausgasemissionen

Patrick Wettemann

Institut für Agrarökonomie
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel,
Olshausenstraße 40, 24118 Kiel

pwettem@ae.uni-kiel.de

Schriftlicher Beitrag anlässlich der 55. Jahrestagung der
Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues e.V.

„Perspektiven für die Agrar- und Ernährungswirtschaft nach der Liberalisierung“

Gießen, 23.-25. September 2015

Copyright 2015 by authors. All rights reserved. Readers may make verbatim copies of this document for non-commercial purposes by any means, provided that this copyright notice appears on all such copies.

Die Entwicklung der Produktivität von Marktfruchtbetrieben unter Berücksichtigung von Treibhausgasemissionen

Zusammenfassung

Vorliegende Studie analysiert die technische Umwelteffizienz und die Produktivitätsentwicklung von Marktfruchtbetriebe unter Berücksichtigung von Treibhausgasemissionen als unerwünschten Output. Basierend auf einer erweiterten hyperbolischen stochastischen Distanzfunktion werden Schattenpreise von Treibhausgasemissionen eruiert sowie der Einfluss exogener Faktoren auf die Umwelteffizienz getestet und die Treiber der Produktivitätsentwicklung quantifiziert. Datengrundlage bildet ein balanciertes Panel von 141 norddeutschen Marktfruchtbetrieben im Zeitraum der Wirtschaftsjahre 2002/03 bis 2009/10. Als Ergebnis ist festzuhalten, dass einerseits mit 95,6% ein relativ hohes Niveau an Umwelteffizienz festzustellen ist, aber andererseits noch 8,6% der produktspezifischen Emissionen eingespart werden können. Innerhalb des Samples beeinflussen Standorte mit einer höheren Anzahl an Bodenpunkten sowie ein höherer Fruchtfolgeanteil an Getreide und Zuckerrüben die Umwelteffizienz positiv. Hingegen wirken ein zunehmender Anteil an organischen Düngern und eine höhere Rate an ausgelagerten Dienstleistungen Umwelteffizienz mindernd. Die Schattenpreise der Treibhausgasemissionen bewegen sich im Mittel zwischen 1,71 und 3,41 € je Tonne CO_2-Äquivalent. Für die Schattenpreise ist generell eine steigende Tendenz im Beobachtungszeitraum festzustellen. Die ermittelte Produktivitätssteigerung wird maßgeblich von technischem Fortschritt vorangetrieben. Änderungen der Umwelteffizienz üben im Durchschnitt der Jahre lediglich marginalen positiven Einfluss auf die Produktivitätsentwicklung aus. Veränderungen der Skalengröße hingegen hemmen die Produktivitätsentwicklung geringfügig.

Schlüsselworte: Umwelteffizienz, Treibhausgasemissionen, Schattenpreise, Produktivitätsentwicklung

1 Einleitung

Durch die Erwärmung des globalen Klimas und die damit einhergehenden negativen Veränderungen, wie z.B. das häufigere Auftreten von Extremwetterereignissen, besteht annähernd politische Einigkeit über das Ziel, diese Entwicklung durch eine Verringerung des Ausstoßes an Treibhausgasen (THG) einzudämmen (UNFCCC 1997). Die Landwirtschaft gilt mit einem Anteil von rund 14% als einer der Hauptverursacher der global emittierten THG (IPCC 2007). So verpflichtet sich auch Deutschland, dass mit einer Reduktion der Emissionen in Höhe von 40% von 1990 bis 2020 eine Vorreiterrolle in Bezug auf Klimaschutzziele einnehmen will, die Landwirtschaft aktiv zur Reduktion von THG-Emissionen einzubinden (BWT UND BMU 2007, BMELV 2009). Jedoch bestehen für die Landwirtschaft in Deutschland noch keine „…systematische[n] und quantitative[n] Aussagen dazu, wie viel Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft mit welchen Maßnahmen in Deutschland zu welchen Kosten reduziert werden können…“ (BMELV 2009).

Dieser Lücke widmet sich vorliegende Studie. Am Beispiel eines balancierten Panels von 141 norddeutschen Marktfruchtbetrieben, die für den Zeitraum der Wirtschaftsjahre 2002/03 bis 2009/10 vorliegen, wird deren Umwelteffizienz unter expliziter Berücksichtigung von THG-Emissionen als unerwünschtes Koppelprodukt der Produktion mit einer erweiterten hyperbolischen stochastischen Distanzfunktion geschätzt. Simultan hierzu erfolgt die Ermittlung des Einflusses exogener Variablen auf die Umwelteffizienz. Darüber hinaus werden Schattenpreise für THG-Emissionen und deren Dynamik im Zeitablauf kalkuliert. Schließlich wird die Entwicklung der totalen Faktorproduktivität (TFP) im Zeitablauf analysiert.

Im nächsten Kapitel erfolgt ein Literaturüberblick zum Thema. Dem folgend erläutert Kapitel 3 das hier angewandte theoretische Modell. Kapitel 4 stellt die Datengrundlage vor und gibt die empirische Spezifikation des Modells wieder. Die Ergebnisse und deren Diskussion befinden sich in Kapitel 5. Kapitel 6 fasst wesentliche Ergebnisse der Arbeit zusammen.

2 Modellierungsansätze zur Messung der Umwelteffizienz

Anwendungen der Umwelteffizienzmessung für den Sektor Landwirtschaft beziehen sich, beginnend mit der Studie von BALL ET AL. (1994), hauptsächlich auf Nährstoffüberschüsse von Stickstoff und/oder Phosphor aus der Tierhaltung sowie dem Energieverbrauch von Betrieben (REINHARD ET AL. 1999, REINHARD ET AL. 2000, COELLI ET AL. 2007), beinhalten jedoch auch THG-Emissionen wie die Studie von SHORTALL UND BARNES (2013). Seit den Veröffentlichungen von COELLI ET AL. (2007) und LAUWERS (2009) etablierte sich die Berücksichtigung des Prinzips der Materialbilanz bei der Umwelteffizienzmessung für Nährstoffüberschüsse als unerwünschte Umweltwirkung. Dabei werden Nährstoffüberschüsse vergleichbar mit Preisen zur Bestimmung der ökonomischen Effizienz modelliert (HOANG UND COELLI 2011, NGUYEN ET AL. 2012, HOANG UND NGUYEN 2013). Studien, die sich der Umwelteffizienz in Hinsicht auf THG-Emissionen widmen und dabei den von COELLI ET AL. (2007) vorgeschlagenen Modellierungsansatz wählen, sind z. B. von WELCH UND BARNUM (2009) für Elektrizitätswerke oder von SESMERO ET AL. (2012) für Ethanolanlagen.

Auch wenn das Prinzip der Materialbilanz für Nährstoffüberschüsse plausibel ist, so ist die Materialbilanz nur bedingt im Falle von THG-Emissionen geeignet. Wie bereits LAUWERS (2009) aufführt, ist die Materialbilanz bzw. das Massenerhaltungsgesetz für immaterielle Effekte unzureichend bzw. wird inhärent erfüllt, ohne an Aussagekraft zu besitzen. So ist es nur sehr eingeschränkt möglich, eine Stoffstrombilanz für THG-Emissionen ähnlich wie für Stickstoff zu erstellen. Ein Grund hierfür ist, dass die CO_2-Äquivalente (CO_2e), die zur Messung der THG-Emissionen dienen, nicht die materielle Beschaffenheit der Inputs widerspiegelt, sondern immaterielle Klimaeffekte. Inputs, wie z.B. Diesel, stehen bei der Bewertung mittels CO_2e in keinerlei direktem stofflichem Zusammenhang zum Output. Ferner ist die unerwünschte Wirkung von THG-Emissionen nicht erst durch einen bilanziellen Überschuss verursacht, sondern umfasst sämtliche THG-Emissionen bei Produktion und Verbrauch. Das Ausmaß des schädlichen Umwelteinflusses ist dabei nicht nur auf den Inhalt der bzw. Aufwand für Inputs oder eines Saldos beschränkt, sondern auch zum Teil wesentlich von dessen Anwendung abhängig. Beispiel hierfür ist die Anwendung von Stickstoffdünger, die, unabhängig von etwaigen Salden, Lachgasemissionen freisetzen kann, die die Emission von CO_2e erheblich verstärkt. Schließlich ist die landwirtschaftliche Produktion kein geschlossenes System, sondern weist durch diffuse Schnittstellen, wie beispielsweise dem Input Boden, einen offenen Systemcharakter auf. Innerhalb dieses offenen Systems kann CO_2, dass gleichzeitig Hauptnährstoff der Pflanzen und Treibhausgas ist, nicht gesteuert werden und ist für alle Betriebe gleichermaßen vorhanden. Folglich hätte auch die Berücksichtigung von atmosphärischem CO_2 nicht die Fähigkeit zur zusätzlichen Diskriminierung aus effizienzanalytischer Sicht. Somit ist die Prämisse, dass das Prinzip der Materialbilanz zwingend angewandt werden muss um THG-Emissionen und damit verbundenen Ineffizienzen konsistent abbilden zu können, aus den genannten Gründen nicht nötig. Daher werden in vorliegender Analyse die THG-Emissionen als unerwünschter Output modelliert.

3 Messung der Umwelteffizienz mittels Distanzfunktionen

Umwelteffizienz und deren Determinanten

Zur Ermittlung der Umwelteffizienz wird eine erweiterte hyperbolische Distanzfunktion (D^E) geschätzt, die eine simultane Berücksichtigung von Einsparmöglichkeiten an THG-

Emissionen und Inputs sowie von Expansionsmöglichkeiten der Outputs ermöglicht. Dabei wird der unerwünschte Output als zusätzliche Variable in die Produktionstechnologie mit aufgenommen (FÄRE ET AL. 1989, CUESTA ET AL. 2009). Die betrachteten Betriebe $n = 1, \dots, N$, setzen die Inputvektoren $x_n = x_{1n}, \dots, x_{In} \in R_+^I$ zur Produktion von erwünschten Outputvektoren $y_n = y_{1n}, \dots, y_{Mn} \in R_+^M$ ein, dabei entstehen unerwünschte Outputvektoren $w_n = w_{1n}, \dots, w_{Pn} \in R_+^P$. Demnach ist das Technologieset wie folgt definiert:

$$T = \{(x, y, w): x \text{ produziert } (y, w)\}. \tag{1}$$

Die Annahmen zu der Technologiemenge T finden sich in FÄRE UND PRIMONT (1995). Zur Messung der Effizienz der Betriebe innerhalb von T wird D^E verwendet:

$$D^E(x, y, w) = inf\left\{\xi > 0: (x\xi, \frac{y}{\xi}, w\xi) \in T\right\}. \tag{2}$$

Dabei ist D^E für den Bereich $0 < D^E(x, y, w) \leq 1$ definiert, nahezu homogen nach $D^E(\eta^{-1}x, \eta y, \eta^{-1}w) = \eta D^E(x, y, w), \eta > 0$, nicht abnehmend in den Outputs sowie nicht zunehmend und quasikonkav in unerwünschten Outputs und Inputs (FÄRE UND PRIMOT 1995). Nach LOVELL ET AL. (1994) kann die genannte Homogenitätsbedingung mit Hilfe einer Normalisierung durch einen Output erzwungen werden. Dabei ändert sich die Distanzfunktion (2) bei einer Normalisierung mittels $\eta = {y_M}^{-1}$ wie folgt:

$$D^E\left(xy_M, \frac{y}{y_M}, wy_M\right) = \frac{D^E(x,y,w)}{y_M}. \tag{3}$$

Wird die Distanzfunktionen (3) mittels Stochastic Frontier Analysis (SFA) geschätzt, ergibt sich nach dem Logarithmieren und Umstellen folgende Gleichung:

$$-lny_{Mn} = lnD^E\left(x_n y_{Mn}, \frac{y_n}{y_{Mn}}, w_n y_{Mn}\right) + u_n + v_n. \tag{4}$$

Der Störterm $v_n \sim N(0, \sigma_v^2)$ ist um Null symmetrisch normalverteilt und unabhängig vom Term u_n. Die Effizienz[1] wird durch den Ineffizienzterm $u_n = -lnD^E(x, y, w) \geq 0$ determiniert, es gilt $u_n \sim N^+(0, \sigma_u^2)$, d.h. die Ineffzienzverteilung weist eine Halbnormalverteilung bei Null auf. Mittels des bedingten Erwartungswerts von u_n mit $TE_n = \mathrm{E}[\exp(-u_n)|(u_n + v_n)]$ wird die Effizienz der Betriebe bestimmt (KUMBHAKAR UND LOVELL 2003). Effiziente Betriebe weisen einen Wert von Eins auf, ineffiziente Betriebe einen Wert von kleiner Eins. Ein Betrieb mit einer Effizienz von z.B. 0,75 kann dessen Output um rund 33% (≈1/0.75) steigern und unerwünschte Outputs sowie Inputs um je 25% (=1-0,75) reduzieren (vgl. CUESTA UND ZOFIO 2005).

Mittels des Technical Ineffects Effects-Modell (TE-Model) von BATTESE UND COELLI (1995) erfolgt die Ermittlung des Einflusses exogener Variablen $z_n = z_{1n}, \dots, z_{Rn} \in R^R$ auf die Ineffizienz der Betriebe. Hierbei wird der Mittelwert des Ineffizienzterms u_n nicht als bei Null halbnormalverteilt angenommen, sondern als lineare Funktion exogener Faktoren mit $\mu_n = \sum_{r=1}^{R} \delta_r z_{rn}$, sodass $u_n = \sum_{r=1}^{R} \delta_r z_{rn} + \omega_n$. Wobei die Zufallsvariable ω_n durch die Trunkierung einer Normalverteilung $N^+(0, \sigma_\omega^2)$ definiert ist. Folglich gilt für den Ineffizienzterm u_n die Annahme $u_n \sim N^+(\mu_n, \sigma_u^2)$ (BATTESE UND COELLI 1995). Zur Berücksichtigung von Heteroskedastizität wird die Varianz des symmetrischen Störterms v_{nt} und der Ineffizienzkomponente u_{nt} mit den Inputs parametrisiert, sodass $\sigma_u^2 = exp(\sum_{i=1}^{I} \psi_i\, x_{in})$ und $\sigma_v^2 = exp(\sum_{i=1}^{I} \phi_i\, x_{in})$ gilt (WANG 2002).

[1] Im Folgenden werden die Begriffe Umwelteffizienz und Effizienz synonym verwendet. Der Terminus Effizienz bezieht sich hierbei auf die technische Effizienz, d.h. es werden Reduktions-/Expansionspotentiale der Inputs/Outputs betrachtet (vgl. COELLI ET AL. 2005).

Schattenpreise der THG-Emissionen

Anhand der aus den Distanzfunktionen kalkulierten Elastizitäten werden die Schattenpreise der THG-Emissionen abgeleitet. Hierzu zeigt FÄRE ET AL. (2002), dass die hyperbolische Distanzfunktion zur Gewinnfunktion dual ist, sodass gilt:

$$\pi(x,p,w) = \max_{y,w}(\frac{py}{qw}\colon D^E(x,y,w) \leq 1). \tag{5}$$

Die Variablen p und q stehen für die Preise des erwünschten und unerwünschten Outputs. Es gelten folgende Bedingungen erster Ordnung:

$$\frac{py}{qw} = \lambda\left(\frac{\partial D^E(.)}{\partial y}\right)y = \lambda\left(\frac{\partial lnD^E(.)}{\partial lny}\right)D^E(.). \tag{6}$$

$$\frac{py}{qw} = -\lambda\left(\frac{\partial D^E(.)}{\partial y}\right)w = -\lambda\left(\frac{\partial lnD^E(.)}{\partial lnw}\right)D^E(.). \tag{7}$$

Das Verhältnis der Gleichungen (6) und (7) zeigt, dass für alle Vektoren mit einer Skalenelastizität von minus Eins das Gewinnmaximum erreicht ist (CUESTA ET AL. 2009). Ist der Preis für den erwünschten Output bekannt, wird der Schattenpreis des unerwünschten Outputs wie folgt ermittelt:

$$q = -p\frac{\partial D^E(x,y,w)/\partial w}{\partial D^E(x,y,w)/\partial y} = -p\frac{\partial lnD^E(x,y,w)/\partial lnw}{\partial lnD^E(x,y,w)/\partial lny} * \frac{y}{w}. \tag{8}$$

Dynamik der totalen Faktorproduktivität

Für die Ermittlung der Dynamik der TFP im Zeitablauf wird auf das Konzept des Malmquist-Indizes, welches eine Zuordnung der Ursachen für Veränderungen der TFP ermöglicht, zurückgegriffen und um den Beitrag von Skaleneffekten erweitert (CAVES ET AL. 1982, FÄRE ET AL. 1994, OREA 2002). Dafür wird in D^E eine Variable für die Zeit berücksichtigt. Entsprechend weitet sich die Notationen der Terme in Gleichung (4) von n für die beobachteten Betriebe auf nt für die Beobachtung der Betriebe in der Zeitperiode $t = 1, \dots, T$ aus. Die jährliche prozentuale Änderung der totalen Faktorproduktivität (TFPC) wird in die Komponenten Veränderung der technischen Effizienz (EC), technischen Fortschritt (TC) und Veränderung der Skalengröße (SC) wie folgt aufgegliedert (vgl. ZOFIO 2007):

$$TFPC_{nt,t+1} = EC_{nt,t+1} + TC_{nt,t+1} + SC_{nt,t+1}. \tag{9}$$

Dabei gibt EC die Verbesserung der Effizienz relativ zur Frontier an, d.h. wie sich der Abstand eines Betriebes zur Frontier in Abhängigkeit der Zeit geändert hat. Der Index TC steht für die Veränderung der Frontier zwischen Zeitperioden an sich. Änderungen der Skalengröße können ebenfalls einen Beitrag zur TFPC leisten. Mittels des Index SC wird dieser Beitrag quantifiziert. Die drei genannten Komponenten des TFPC werden wie folgt berechnet (COELLI ET AL. 2005, OREA 2002):

$$EC_{nt,t+1} = ln\left[\frac{E[\exp(-u_{nt+1})|(u_{nt+1}+v_{nt+1})]}{E[\exp(-u_{nt})|(u_{nt}+v_{nt})]}\right]. \tag{10}$$

$$TC_{nt,t+1} = \left[0{,}5 * \left(\frac{\partial lny_{Mnt}}{\partial t} + \frac{\partial lny_{Mnt+1}}{\partial t}\right)\right]. \tag{11}$$

$$SC^{D^o}_{nt,t+1} = \left[0{,}5 * \sum_{i=1}^{I}(\varepsilon_{int}SF_{nt} + \varepsilon_{int+1}SF_{nt+1}) * ln\left(\frac{x_{int+1}}{x_{int}}\right)\right], \tag{12}$$

wobei $SF_{nt} = \frac{\varepsilon_{nt}-0{,}5}{\varepsilon_{nt}}$, $\varepsilon_{nt} = \sum_{i=1}^{I}\varepsilon_{int}$ sowie $\varepsilon_{int} = \frac{\partial lny_{Mnt}}{\partial \ln(w_{pnt}x_{int})}$.

Für die Gleichungen (10) bis (12) gilt, dass Werte größer Null für einen Fortschritt bzw. einen Progress des jeweiligen Index, Werte kleiner Null für eine nachteilige Entwicklung stehen.

4 Daten und Modellspezifikation

Datenbeschreibung

Als Datengrundlage dienen 141 spezialisierte Marktfruchtbetriebe, die sich vorwiegend in Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern befinden. Die Daten stammen von zwei landwirtschaftlichen Betriebsberatungen, der GrossBetriebsBeratung sowie der Landwirtschaftlichen Unternehmensberatung Schleswig-Holstein. Der Beobachtungszeitraum erstreckt sich vom Wirtschaftsjahr 2002/03 bis zum Wirtschaftsjahr 2009/10. Als Inputs werden Vorleistungen, Arbeit, Anlagevermögen und die Ackerfläche verwendet. Das Anlagevermögen als Proxy für den Kapitaleinsatz beinhaltet den Zeitwert von Wirtschaftsgebäuden, Maschinen und Bodenverbesserungen. Die Messung des Outputs erfolgt über die Variable Getreideeinheiten (GE), als unerwünschter Output werden THG-Emissionen berücksichtigt. Alle monetären Angaben sind Nettobuchungen und im Beobachtungszeitraum auf das Jahr 2010 als Basis mit der Produktkategorie entsprechenden Indizes des Statistischen Bundesamtes inflationiert (STATISTISCHES BUNDESAMT 2012).

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die In- und Outputs sowie den Variablen des TE-Modells. Im Vergleich mit der mittleren Betriebsgröße von Ackerbaubetrieben in Deutschland (2009/10: 113 ha) ist deutlich zu sehen, dass die hier untersuchten Betriebe überdurchschnittlich groß sind und folglich nicht als repräsentativ für Deutschland gelten können (BMELV 2010). Zur Erfassung der Produktion der Betriebe werden sämtliche Naturalerträge angebauter Kulturen als GE aggregiert. Dabei werden Getreideerträge mit dem Faktor 1, Rapserträge mit dem Faktor 2,2, Silomaiserträge (bei 32% Trockensubstanzgehalt) mit dem Faktor 0,2 und Zuckerrübenerträge (bei 16% Zuckeranteil) mit dem Faktor 0,15 gewichtet. Da die zeitliche Eingrenzung der landwirtschaftlichen Buchführung perioden- und nicht leistungsbezogen erfolgt und Inputs, die in Periode t eingesetzt werden, überwiegend den Erträgen in der Periode $t+1$ zuzuordnen sind, werden die Erträge von Periode $t+1$ der Periode t zugeordnet.

Tabelle 1: Überblick über die untersuchten 141 Marktfruchtbetrieben von WJ 02/03 bis 09/10

Variable	Mittelwert	Standard-abweichung	Minimum	Maximum
Vorleistungen [€]	482 928	407 297	41 938	2 822 870
Arbeitskräfte [AK]	3,9	3,2	0,3	22,9
Anlagevermögen [€]	695 306	644 582	3 108	4 574 523
Fläche [ha]	730	661	50	4 575
THG [CO_2-eq kg]	1 161 936	1 058 203	69 836	8 266 308
Ertrag [GE]	63 734	58 195	4 089	430 740
Bodenpunkte [BP]	48,5	7,3	32,0	75,0
Organische Düngung [% der Düngermenge]	21,7	19,1	0,0	79,5
Getreide [% in Fruchtfolge]	62,8	9,0	13,3	98,0
Zuckerrüben [% in Fruchtfolge]	3,6	4,8	0,0	34,6
Dienstleistungen [% der Vorleistungen]	4,7	4,1	0,0	22,2
Mechanisierung [PS je ha]	1,6	0,7	0,5	4,9

*[a]Für 43 Betriebe liegen Flächenangaben nur als ganzzahlige Dekahektar vor (z.B. 25*10 ha).*
Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 2: Diesel- und Düngeraufwendungen des Samples sowie deren THG-Gewichtung

Variable	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	CO_2e/Einheit
Diesel [l]	58 481	54 190	2 203	498 675	2,943
Stickstoff [N kg]	169 802	154 882	9 988	1 163 355	5,498
Phosphor [P_2O_5 kg]	47 721	65 862	0	653 140	0,713
Kalium [K_2O]	48 746	49 899	0	412 566	0,456

Quelle: Eigene Berechnungen, KALTSCHMITT UND REINHARDT 1997, IPCC 1996, IPCC 2007

Zur Kalkulation der THG-Emissionen werden die Mengen an Stickstoff, Phosphor und Kalium sowie das Volumen an Dieselkraftstoff berücksichtigt (Tabelle 2). Die CO_2e beziehen sich auf Primäremissionen des Produkts, d.h. innerhalb der hier angewendeten Systemgrenzen sind sämtliche Vorgänge, von der Exploration/Synthese über den Transport hin zum Verbrauchsort sowie der Verbrauch selbst berücksichtigt (vgl. KALTSCHMITT UND REINHARDT 1997). Als THG-Emissionen werden die Mengen an CO_2, Methan und Lachgas berücksichtigt und zur Aggregation als CO_2e nach IPCC (2007) gewichtet. Bei Stickstoff ist zusätzlich eine Lachgasemission in Höhe von 0,05% der ausgebrachten Menge mit einkalkuliert, die laut IPCC (1996) nach der Düngung emittiert werden. Organische Düngermengen werden mit Opportunitätsemissionen anhand von mineralischen Düngern bewertet.

Spezifikation des theoretischen Modells

Die in Kapitel 3 dargestellte Distanzfunktion wird anhand einer Translog-Funktion in Gleichung (13) mit variablen Skalenerträgen, nicht-neutralem technischen Fortschritt sowie zeitlich veränderbarer Ineffizienz geschätzt (vgl. CHRISTENSEN ET AL. 1973):

$$\begin{aligned}-lny_{Mnt} = {} & \beta_0 + \sum_{i=1}^{I} \beta_i \, lnx_{int}^* + 0{,}5 * \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{I} \beta_{ij} \, lnx_{int}^* lnx_{jnt}^* + \beta_t t + \sum_{i=1}^{I} \beta_{ti} t \, lnx_{int}^* \\ & + \tau_{tP} t lnw_{Pnt}^* + 0{,}5 * \beta_{tt} t^2 + \lambda_P lnw_{Pnt}^* + 0{,}5 * \lambda_{PP} lnw_{Pnt}^* lnw_{Pnt}^* \\ & + \sum_{i=1}^{I} \varphi_{Pi} lnw_{Pnt}^* lnx_{int}^* + u_{nt} + v_{nt}, \end{aligned} \tag{13}$$

mit $lnw_{Pnt}^* = lnw_{Pnt} * lny_{Mnt}, lnx_{int}^* = lnx_{int} * lny_{Mnt}$ (14)

Die Notation entspricht derjenigen von Kapitel 3. Die Inputs x_{int} stehen für Vorleistungen, Arbeit, Anlagevermögen und Ackerfläche, der Output y_{Mnt} für GE und der unerwünschte Output w_{Pnt} für THG-Emissionen. Die Variablen sind für die Schätzung durch den jeweiligen Mittelwert dividiert. Zur Berücksichtigung der Zeit dient die Variable t. Die Anzahl an Bodenpunkten, der Anteil der organischen Dünger an der Gesamtdüngermenge, der Anteil von Getreide und Zuckerrüben an der Fruchtfolge, der Anteil an ausgelagerten Arbeiten sowie die Mechanisierung und eine Konstante werden als exogene Faktoren der Ineffizienz z_{rnt} im Term u_{nt} berücksichtigt (vgl. Kapitel 3). Es gilt $u_{nt} \sim N^+(\mu_{nt}, \sigma_u^2)$ und $v_{nt} \sim N(0, \sigma_v^2)$ sowie $\sigma_u^2 = exp(\psi_0 + \sum_{i=1}^{I} \psi_i \, x_{int})$ und $\sigma_v^2 = exp(\phi_0 + \sum_{i=1}^{I} \phi_i \, x_{int})$. Die Symmetrie der Kreuzeffekte der Inputs wird mittels $\beta_{ij} = \beta_{ji}$ sichergestellt. Der Term $\beta_t t + 0{,}5 * \beta_{tt} t^2$ erfasst den neutralen technischen Fortschritt, die Interaktionen der Zeitvariablen mit den Inputs bzw. den THG-Emissionen den nicht-neutralen technischen Fortschritt. Die Distanzfunktion wird mittels des sfcross-Befehls in Stata 12.0 geschätzt (STATACORP LP 2011, BELOTTI ET AL. 2013). Eine Implikation der Monotonie-Annahme erfolgt mittels der Prozedur nach HENNINGSEN UND HENNING (2009). Weitere Kalkulationen erfolgen mittels FOX UND WEISBERG (2011), HENNINGSEN (2012), R CORE TEAM (2012) und TURLACH UND WEINGESSEL (2013).

5 Ergebnisse und Diskussion

Schätzergebnisse der Distanzfunktion

Tabelle 3 fasst die Ergebnisse der Schätzung zusammen. Wie erwartet weist der unerwünschte Output THG-Emissionen ein negatives Vorzeichen im Koeffizienten erster Ordnung auf, d.h. mit einer Zunahme der THG-Emissionen steigen die Werte der Distanzfunktionen. Die Koeffizienten der Schätzungen ohne Implikation von Monotonie zeigen, dass dieser Effekt signifikant ist. Durch die Anwendung der Prozedur von HENNINGSEN UND HENNING (2009) wird die Annahme der Monotonie in allen Inputs wie auch in den THG-Emissionen erfüllt. Trotz des Ausschlusses der Zeitvariablen bei dieser Prozedur wird Monotonie auch für die Zeitvariablen erfüllt. Der Anteil quasikonkaver Beobachtungen beträgt 97,7%.

Tabelle 3: Ergebnisse der Schätzung der Distanzfunktion

Variable	Koeffizient	Standardfehler	korr. Koeffizient	Standardfehler	Diff./Standardfehler
β_0	-0,0444[a]	0,0059	-0,0456	-	0,20
$\beta_{\text{Vorleistungen}}$	-0,1021[a]	0,0215	-0,1115	-	0,44
β_{Arbeit}	-0,0510[a]	0,0146	-0,0421	-	-0,61
β_{AV}	0,0047	0,0057	-0,0020	-	1,18
$\beta_{\text{Fläche}}$	-0,3001[a]	0,0237	-0,3003	-	0,01
β_{Zeit}	-0,0053[a]	0,0008	-0,0059	-	0,70
$\beta_{\text{Vorleistungen*Vorleistungen}}$	0,0888	0,1430	0,1321	-	-0,30
$\beta_{\text{Vorleistungen*Arbeit}}$	0,0207	0,0536	0,0135	-	0,13
$\beta_{\text{Vorleistungen*AV}}$	-0,0386	0,0262	-0,0022	-	-1,39
$\beta_{\text{Vorleistungen*Fläche}}$	-0,2217	0,1451	-0,1453	-	-0,53
$\beta_{\text{Zeit*Vorleistungen}}$	-0,0075	0,0059	-0,0063	-	-0,20
$\beta_{\text{Arbeit*Arbeit}}$	0,0066	0,0369	0,0082	-	-0,04
$\beta_{\text{Arbeit*AV}}$	0,0057	0,0134	0,0001	-	0,41
$\beta_{\text{Arbeit*Fläche}}$	0,0317	0,0727	-0,0206	-	0,72
$\beta_{\text{Zeit*Arbeit}}$	-0,0041	0,0032	-0,0024	-	-0,54
$\beta_{\text{AV*AV}}$	-0,0022	0,0055	-0,0003	-	-0,35
$\beta_{\text{AV*Fläche}}$	0,0279	0,0322	-0,0001	-	0,87
$\beta_{\text{Zeit*AV}}$	0,0017	0,0015	0,0003	-	0,88
$\beta_{\text{Fläche*Fläche}}$	0,3554[c]	0,1898	0,2234	-	0,70
$\beta_{\text{Zeit*Fläche}}$	0,0142[b]	0,0071	0,0090	-	0,72
$\tau_{\text{Zeit*THGE}}$	-0,0038	0,0073	-0,0003	-	-0,48
$\beta_{\text{Zeit*Zeit}}$	0,0002	0,0007	0,0002	-	-0,01
λ_{THGE}	-0,0711[a]	0,0182	-0,0629	-	-0,45
$\lambda_{\text{THGE*THGE}}$	0,0163	0,1717	0,0335	-	-0,10
$\varphi_{\text{THGE*Vorleistungen}}$	0,1938	0,1258	0,0282	-	1,32
$\varphi_{\text{THGE*Arbeit}}$	-0,0735	0,0725	-0,0061	-	-0,93
$\varphi_{\text{THGE*AV}}$	0,0091	0,0328	0,0025	-	0,20
$\varphi_{\text{THGE*Fläche}}$	-0,1875	0,1408	-0,0689	-	-0,84
δ_0	0,3755[a]	0,0511	0,3895[a]	0,0506	-0,28
$\delta_{\text{Bodenpunkte}}$	-0,0053[a]	0,0010	-0,0054[a]	0,0010	0,11
$\delta_{\text{Organsiche Düngung}}$	0,0007[a]	0,0003	0,0007[a]	0,0003	0,08
δ_{Getreide}	-0,0020[a]	0,0005	-0,0020[a]	0,0005	0,04
$\delta_{\text{Zuckerrüben}}$	-0,0023[a]	0,0010	-0,0028[a]	0,0009	0,53
$\delta_{\text{Dienstleistung}}$	0,0031[a]	0,0010	0,0025[a]	0,0009	0,63
$\delta_{\text{Mechanisierung}}$	-0,0137	0,0090	-0,0137	0,0085	0,00
ψ_0	-5,8683[a]	0,2282	-5,9207[a]	0,2191	0,23
$\psi_{\text{Vorleistungen}}$	1,8486[b]	0,9105	2,5005[a]	0,6003	-0,72
ψ_{Arbeit}	1,7173[a]	0,5602	1,5247[a]	0,3769	0,34
ψ_{AV}	-0,2795	0,2034	-0,2279	0,1448	-0,25
$\psi_{\text{Fläche}}$	-2,2004[a]	0,8257	-2,7408[a]	0,5828	0,65
ϕ_0	-6,6412[a]	0,1364	-6,5959[a]	0,1297	-0,33
$\phi_{\text{Vorleistungen}}$	-1,9988[a]	0,6315	-2,2296[a]	0,5510	0,37
ϕ_{Arbeit}	-1,4173[a]	0,3676	-1,2321[a]	0,3089	-0,50
ϕ_{AV}	-0,1470	0,1403	-0,1507	0,1322	0,03
$\phi_{\text{Fläche}}$	2,9811[a]	0,6688	3,0126[a]	0,5617	-0,05
α_0			-0,0008	0,0048	
$\alpha_{\ln\hat{Y}}$			-0,9994[a]	0,0027	
$E[\sigma_u^2/(\sigma_u^2+\sigma_v^2)]$	65,9%		64,1%		
Monotonie					
Inputs			100,0%		
Zeit			100,0%		
THG-Emissionen			100,0%		
Quasikonkavität			97,7%		

[a],[b],[c] signifikant auf 1%/5%/10%-Level; korr. =korrigierter, Diff. =Differenz, AV=Anlagevermögen, THGE=THG-Emissionen
Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 4 gibt die Elastizitäten der Inputs sowie der Zeitvariablen auf Basis der korrigierten Koeffizienten wieder. Wie für Marktfruchtbetriebe zu erwarten ist, weist der Input Fläche die

höchste partielle Elastizität auf und ist somit der bedeutendste Input. Mit Abstand folgt die partielle Elastizität des Inputs Vorleistungen, gefolgt vom Input Arbeit. Das Anlagevermögen weist eine nur marginale partielle Elastizität auf. Außerdem beträgt der marginale Effekt jedes Jahres 0,7%, worauf untenstehend näher eingegangen wird. Die Summe der Inputelastizitäten beträgt -0,46, sodass sich die Betriebe im Mittel im Bereich abnehmender Skalenerträge befinden.

Tabelle 4: Partielle Elastizitäten der Distanzfunktionen

Variable	Elastizität	Standardabweichung
Vorleistungen	-0,1228	0,0417
Arbeit	-0,0371	0,0132
Anlagevermögen	-0,0021	0,0010
Fläche	-0,3014	0,0336
Zeit	-0,0067	0,0020

Quelle: Eigene Berechnungen

Umwelteffizienz und Schattenpreis der THG-Emissionen

Die Ergebnisse des TE-Models in Tabelle 3 zeigen, dass die Anzahl an Bodenpunkten einen negativen Einfluss auf die Ineffizienz aufweist, d.h. Betriebe auf höherwertigen Standorten wirtschaften effizienter. Ferner gilt, dass mit einem zunehmenden Anteil an organischem Dünger an der Gesamtdüngermenge die Ineffizienz der Betriebe steigt. Ursachen für den negativen Einfluss können Kompromisse organsicher Düngung hinsichtlich des Ausbringzeitpunktes, eine heterogene Verfügbarkeit sowie eine mangelhafte Ausbringtechnik im Vergleich zu mineralischen Düngern sein. Ferner ist insbesondere bei als Nitrat vorliegendem Stickstoff das Speichervermögen im Boden eingeschränkt, was die genannten Gründe schwerer wiegen lässt (vgl. SMITH UND CHAMBERS 1993). Eine Ausweitung von Getreide innerhalb der Fruchtfolge und somit eine einhergehende Spezialisierung auf Getreideanbau beeinflusst die Effizienz positiv. So können selbst relativ große Betriebe, wie sie hier untersucht werden, durch eine konsequente Spezialisierung effizienter produzieren. Mögliche Gründe sind z.B. den dadurch bedingten lohnenden Einsatz größerer Spezialmaschinen oder von Investitionen in die Logistik. Dieses Ergebnis steht keineswegs konträr zu den oben festgestellten abnehmenden Skalenerträgen, da eine Verringerung der Skalengröße mit einer Getreidespezialisierung durchaus einhergehen kann. Die Ergebnisse sind insofern einzuschränken, als das der Wertebereich des Getreideanteils zwischen dem 5%- und dem 95%-Quantil von 49% bis 77% reicht. Zu erwartende negative Fruchtfolgeeffekte bei einer weiteren Expansion des Getreideanteils sind dabei nicht erfasst und bedürfen einer detaillierteren Modellierung als durch einen linearen Term. Auch einen positiven Einfluss auf die Effizienz weist ein höherer Anbauanteil an Zuckerrüben auf ($q_{5,95}$=[0%,14%]). Dies steht nicht im Wiederspruch zu den eruierten Ergebnissen bezüglich des Getreideanbaus. Vielmehr ist daraus zu folgern, dass ein weiterer Ausbau von Fruchtfolgegliedern, die entweder oben genannte Synergieeffekte erwarten lassen (Getreide) oder bezüglich der GE besonders wettbewerbsfähig sind (Zuckerrüben), der Effizienz der Betriebe förderlich sind. Durch den Anbau von Zuckerrüben können zudem Arbeitsspitzen gebrochen werden, was einen positiven Effekt auf die Effizienz der Betriebe erklären kann. Ferner zeigt das TE-Model, dass Betriebe, die vermehrt Dienstleistungen und Maschinen extern beziehen, ineffizienter sind. Gründe hierfür sind z.B. zunehmende Terminkosten durch Verzögerungen beim Bezug von Dienstleistungen und/oder mangelnde Einarbeitung und Erfahrung im Umgang mit gemieteten Maschinen. Für den letzten im TE-Modell berücksichtigten Faktor der Mechanisierung kann kein signifikanter Einfluss auf die Ineffizienz festgestellt werden.

Die Effizienzwerte der Betriebe sind in Tabelle 5 dargestellt. Es ergibt sich ein durchschnittliches Einsparpotential an Inputs und an THG-Emissionen von 4,4% bei einem gleichzeitig

möglichen Steigerungspotential des Outputs in Höhe von 4,6%. Die Werte der Standardabweichung zeigen eine relativ geringe Streuung der Effizienzwerte. Insgesamt befinden sich die untersuchten Betriebe auf einem relativ hohen Niveau an Effizienz und es besteht ein relativ geringes Potential, durch Eliminierung von Ineffizienz THG-Emissionen einzusparen. Dennoch ist der Effekt nicht unbedeutend: Betragen die Output spezifischen THG-Emissionen im Status Quo bei einem durchschnittlichen Betrieb rund 18,2 kg CO_2e/dt GE, so würden sie bei effizienter Produktion auf 16,7 kg CO_2e/dt GE oder um 8,6% zurückgehen.

Tabelle 5: Effizienz der Betriebe und Schattenpreis der THG-Emissionen

	€/dt GE	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
Effizienzwert	-	95,58%	3,46%	77,21%	99,72%
MRT	-	0,00017	0,00010	0,00000	0,00064
	10,00	1,71	0,97	0,00	6,42
Schattenpreise [€/t CO_2e]	15,00	2,56	1,45	0,00	9,62
	20,00	3,41	1,93	0,00	12,83

MRT=Marginale Rate der Transformation
Quelle: Eigene Berechnungen

Soll über eine effiziente Produktion hinaus das Niveau an THG-Emissionen verringert werden, ist dies nicht ohne eine Einschränkung der Produktion des erwünschten Outputs GE möglich. Bei der Berechnung der Schattenpreise der THG-Emissionen erfolgt eine Parametrisierung der Preise für GE von 10 bis 20 €/dt GE, was in etwa die Preisspannen der im Output berücksichtigten Marktfrüchte entsprechend den Gewichtungsfaktoren für den beobachteten Zeitraum widerspiegelt. Ferner sind die Schattenpreise in Tabelle 5 auf eine Tonne CO_2e skaliert. Der Schattenpreis liegt zwischen 1,71 und 3,41 €/t CO_2e. Sollten THG-Emissionen über vorhandene Ineffizienzen hinaus eingespart werden, fallen ceteris paribus Opportunitätskosten an, die mindestens den Schattenpreisen entsprechen und mit zunehmendem Umfang an Einsparungen entsprechend steigen.

Schattenpreise und TFP im Zeitablauf

Tabelle 6 stellt den Verlauf der Schattenpreise im Zeitablauf unter Annahme eines Preises für GE von 15 €/dt dar. Es wird deutlich, dass die Schattenpreise im Zeitablauf in der Tendenz zunehmen. Steigende Schattenpreise lassen darauf schließen, dass auch die marginale Rate der Transformation (MRT) im Zeitablauf steigt. Unter Berücksichtigung der tendenziell steigenden Preise für Agrarprodukte im beobachteten Zeitraum ist zu vermuten, dass der Trend steigender Schattenpreise tatsächlich noch deutlicher vorhanden ist als hier dargestellt.

Tabelle 6: Schattenpreise im Zeitablauf (p^{GE}=15 €)

	02/03	03/04	04/05	05/06	06/07	07/08	08/09	09/10
Schattenpreis [€/t CO2e]	1,97	2,94	2,66	2,53	2,11	2,83	3,05	2,40
Standardabweichung	1,20	1,67	1,39	1,31	1,25	1,60	1,52	1,23

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 7 gibt die Änderungen der TFP von dem Wirtschaftsjahr 2002/03 bis 2009/10 wieder. Die mittlere jährliche Steigerung der TFPC beträgt 0,6%. Hauptsächlicher Treiber hierfür ist technischer Fortschritt, der mit 0,7% p.a. nicht nur den größten Teil zur durchschnittlichen jährlichen Produktivitätsentwicklung beiträgt, sondern auch über alle Jahre hinweg positiv ist. Dessen ungeachtet nimmt die Rate des technischen Fortschritts über den Beobachtungszeitraum kontinuierlich ab. Effizienzverbesserungen relativ zur Frontier sind in nur marginalem Umfang für mittlere Produktivitätsveränderungen relevant, wobei sie maßgebend für die

Volatilität der TFPC sind. Ein Grund für die Volatilität von EC ist, dass nicht eine Strategie der Betriebsführung über alle Jahre hinweg zwingend dominant ist. So führt beispielsweise der Kostenvorteil einer günstigeren Stickstoffdüngung (Harnstoff vs. Kalkammonsalpeter) nicht in jedem Jahr zu einer Effizienzverbesserung, da evtl. eine geringere Effektivität des Düngers (in Abhängigkeit der Witterung) mögliche Effizienzvorteile (durch Kostenersparnis) vollständig tilgt oder gar Effizienzeinbußen nach sich zieht. Veränderungen der Skalengröße tragen mit -0,1% p.a. zu einer auf geringem Niveau negativen Entwicklung der Produktivität bei. Auffallend ist der Zusammenhang des TFPC mit dem Verlauf der Schattenpreise in Tabelle 6. Es ist naheliegend, dass sich Verbesserungen in der Produktivität in vorliegendem Modell auch auf eine Erhöhung der MRT auswirken. Verstärkt wird dieser Effekt vom beobachteten tendenziell vorleistungssparenden technischen Fortschritt (vgl. Tabelle 3), der direkt emissionssparend wirkt, da die Emissionen aus den Vorleistungen angerechnet werden.

Tabelle 7: Veränderungen der totalen Faktorproduktivität

	02/03-03/04	03/04-04/05	04/05-05/06	05/06-06/07	06/07-07/08	07/08-08/09	08/09-09/10	Total 02/03-09/10	Mittleres Wachstum p,a,
TFPC	3,40%	-0,48%	-0,39%	-1,96%	3,74%	1,41%	-1,31%	4,42%	0,63%
EC	2,71%	-0,98%	-1,00%	-2,58%	3,13%	0,87%	-1,81%	0,32%	0,05%
TC	0,74%	0,72%	0,69%	0,65%	0,65%	0,64%	0,59%	4,67%	0,67%
SC	-0,05%	-0,21%	-0,07%	-0,03%	-0,03%	-0,09%	-0,08%	-0,56%	-0,08%

Quelle: Eigene Berechnungen

6 Schlussfolgerungen

Als Ergebnis ist festzuhalten, dass sich die Betriebe im Mittel des Beobachtungszeitraums mit 95,6% auf einem relativ hohen Niveau der Umwelteffizienz befinden. Ein steigender Anbauanteil an Getreide und Zuckerrüben wie auch Standorte mit höherer Anzahl an Bodenpunkten steigern die Effizienz signifikant. Im Gegensatz dazu korrelieren ein steigender Anteil an ausgelagerten Arbeiten und ein steigender Anteil an organischem Dünger an der Gesamtdüngermenge mit der Effizienz negativ. Für die Höhe der Mechanisierung kann kein Einfluss auf die Effizienz festgestellt werden. Durch die Tilgung von Ineffizienzen ließen sich die produktspezifischen THG-Emissionen um 8,6% senken. Wobei zu beachten ist, dass keine Kosten für die genannte THG-Einsparung anfallen, sondern gar ein zusätzlicher Profit generiert wird. Die Schattenpreise für THG-Emissionen liegen im Bereich von 1,71 bis 3,41 €/t CO_2e, je nach unterstelltem Preisniveau für den Output GE, wobei eine steigende Tendenz der Schattenpreise im Beobachtungszeitraum festzustellen ist. Eine Reduktion der THG-Emissionen über vorhandene Ineffizienzen hinaus würde ceteris paribus entsprechend Opportunitätskosten hinsichtlich des erwünschten Outputs verursachen, die mindestens den genannten Schattenpreisen entsprechen. Die Produktivität der Betriebe steigert sich im gesamten Beobachtungszeitraum um durchschnittlich 4,4%. Maßgeblicher Treiber der Entwicklung ist technischer Fortschritt, wenn auch mit abnehmenden jährlichen Wachstumsraten. Einen im Mittel der Jahre nur marginalen positiven Beitrag zu Produktivitätsentwicklung im Beobachtungszeitraum leisten Effizienzverbesserungen. Das Skalenverhalten beeinflusst die Produktivitätsentwicklung leicht negativ.

Danksagung

Der Autor bedankt sich bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die finanzielle Unterstützung sowie bei der GrossBetriebsBeratung und der landwirtschaftlichen Unternehmensberatung Schleswig-Holstein für die Bereitstellung der Daten.

Literaturverzeichnis

BALL, V.; LOVELL, C.A.K.; NEHRING, R.; SOMWARU, A. (1994): Incorporating Undesirable Outputs into Models of Production: An Application to U.S. Agriculture. In: Cahiers d´Economique et Sociologie Rurales 31 (1): 59–73.

BATTESE, G.E.; COELLI, T.J. (1995): A model for technical inefficiency effects in a stochastic frontier production function for panel data. In: Empirical Economics 20 (2): 325–332.

BELOTTI, F.; DAIDONE, S.; ILARDI, G.; ATELLA, V. (2013): Stochastic frontier analysis using Stata. In: The Stata Journal 13 (4): 719-758.

BMELV (2009): Bericht des BMELV für einen aktiven Klimaschutz der Agrar-, Forst- und Ernährungswirtschaft und zur Anpassung der Agrar- und Forstwirtschaft an den Klimawandel. < http://www.bmelv.de/cae/servlet/contentblob/383152/publicationFile/ 22425/KliKlimaschutzberi2008.pdf>, [2014/09/03].

BMELV (2010): Die wirtschaftliche Lage der landwirtschaftlichen Betriebe. Buchführungsergebnisse der Testbetriebe Wirtschaftsjahr 2009/10. <http://berichte.bmelv-statistik.de/BFB-0111001-2010.pdf>, [2013/09/10].

BWT UND BMU (2007): Bericht zur Umsetzung der in der Kabinettsklausur am 23./24.08.2007 in Meseberg beschlossenen Eckpunkte für ein Integriertes Energie- und Klimaprogramm. <http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/gesamtbericht_iekp.pdf>, [2014/09/03].

CAVES, D.W.; CHRSITENSEN L. R.; DIEWERT, W.R. (1982): The Economic Theory of Index Numbers and the Measurement of Input, Output, and Productivity. In: Econometrica 50 (6): 1393–1414.

COELLI, T.; LAUWERS, L.; VAN HUYLENBROECK, G. (2007): Environmental efficiency measurement and the materials balance condition. In: J Prod Anal 28 (1-2): 3–12.

COELLI, T.J., RAO, D.S., BATTESE, G.E. (2005): An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis. 2nd Edition, Kluwer Academic Publishers, Boston.

CUESTA, R.A.; LOVELL, C.K.; ZOFÍO, J.L. (2009): Environmental efficiency measurement with translog distance functions: A parametric approach. In: Ecological Economics 68 (8-9): 2232–2242.

CUESTA, R.A.; ZOFÍO, J.L. (2005): Hyperbolic Efficiency and Parametric Distance Functions: With Application to Spanish Savings Banks. In: J Prod Anal 24 (1): 31–48.

FÄRE, R.; GROSSKOPF, S.; LOVELL, C.A.K. (1994): Production frontiers. Cambridge, England, New York, NY, USA: Cambridge University Press.

FÄRE, R.; GROSSKOPF, S.; LOVELL, C.A.K.; PASURKA, C. (1989): Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: A nonparametric approach. In: The Review of Economics and Statisitcs 71 (1): 90–98.

FÄRE, R.; GROSSKOPF, S.; ZAIM, O. (2002): Hyperbolic efficiency and return to the dollar. In: European Journal of Operational Research 136 (3): 671–679.

FÄRE, R.; PRIMONT, D. (1995): Multi-Ouput Production and Duality: Theory and Applications. Kluwer Academic Publishers, Boston/London/Dodrecht.

FOX J.; WEISBERG, S. (2011): An {R} Companion to Applied Regression. Second Edition. Thousand Oaks CA: Sage, http://socserv.socsci.mcmaster.ca/jfox/Bos/Companion.

HENNINGSEN, A. (2012): micEcon: Microeconomic Analysis and Modelling. R package version 0.6-10., http://CRAN.R-project.org/package=micEcon.

HOANG, V.-N.; COELLI, T. (2011): Measurement of agricultural total factor productivity growth incorporating environmental factors: A nutrients balance approach. In: Journal of Environmental Economics and Management 62 (3): 462–474.

HOANG, V.-N.; NGUYEN, T.T. (2013): Analysis of environmental efficiency variations: A nutrient balance approach. In: Ecological Economics 86: 37–46.

IPCC (1996): Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Reference Manual. Volume 3. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6.html>, [2014/09/03].

IPCC (2007): Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. B. Metz, O.R Davidson,

P.R Bosch, R. Dave, L.A Meyer (Eds.), United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University, 1–863.

KALTSCHMITT, M.; REINHARDT, G. (1997): Nachwachsende Energieträger. Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung. Braunschweig: Vieweg.

KUMBHAKAR, S.; LOVELL, C.A.K. (2003): Stochastic frontier analysis. Cambridge, New York: Cambridge University Press.

LAUWERS, L. (2009): Justifying the incorporation of the materials balance principle into frontier-based eco-efficiency models. In: Ecological Economics 68 (6): 1605–1614.

LOVELL, C.A.K.; TRAVERS, P.; RICHARDSON, S.; WOOD, L. (1994): Resources and Functionings: A New View of Inequality in Australia. In: Eichhorn,W. (Ed.), Models and Measurement of Welfare and Inequality. Springer-Verlag, Berlin.

NGUYEN, T. T.; HOANG, V.-N.; SEO, B. (2012): Cost and environmental efficiency of rice farms in South Korea. In: Agricultural Economics 43 (4): 369–378.

OREA, L. (2002): Parametric Decomposition of a Generalized Malmquist Productivity Index. In: Journal of Productivity Analysis 18 (1): 5–22.

R CORE TEAM (2013). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, http://www.R-project.org/.

REINHARD, S.; LOVELL, C.; THIJSSEN, G. (2000): Environmental efficiency with multiple environmentally detrimental variables; estimated with SFA and DEA. In: European Journal of Operational Research 121 (2): 287–303.

REINHARD, S.; LOVELL, C.A.K.; THIJSSEN, G. (1999): Econometric Estimation of Technical and Environmental Efficiency: An Application to Dutch Dairy Farms. In: American Journal of Agricultural Economics 81 (1): 44–60.

SESMERO, J.P.; PERRIN, R.K.; FULGINITI, L.E. (2012): Environmental efficiency among corn ethanol plants. In: Biomass and Bioenergy 46: 634–644.

SHORTALL, O.; BARNES, A. (2013): Greenhouse gas emissions and the technical efficiency of dairy farmers. In: Ecological Indicators 29: 478–488.

SMITH, K.A.; CHAMBERS, B.J. (1993): Utilizing the nitrogen content of organic manures on farms-problems and practical solutions. In: Soil Use & Management 9 (3): 105–111.

STATACORP LP (2011): Stata 12.0, Statistics/Data Analysis. 4905 Lakeway Drive, College Station, Texas 77845 USA.

STATISTISCHES BUNDESAMT (2012): Genesis-Online Datenbank. <https://www.destatis.de/EN/Homepage.html >, [2013/07/12].

TURLACH, B.A.; WEINGESSEL A. (2013): quadprog: Functions to solve Quadratic Programming Problems. R package version 1.5-5., http://CRAN.R-project.org/package=quadprog.

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) (1997): Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. <http://unfccc.int/essential_background/kyoto_protocol/items/1678.php>, [2014/09/03].

WANG, H.-J. (2002): Heteroscedasticity and Non-Monotonic Efficiency Effects of a Stochastic Frontier Model. In: Journal of Productivity Analysis 18 (3): 241–253.

WELCH, E.; BARNUM, D. (2009): Joint environmental and cost efficiency analysis of electricity generation. In: Ecological Economics 68 (8-9): 2336–2343.

ZOFIO, J.L. (2007): Malmquist productivity index decompositions: a unifying framework. In: Applied Economics 39 (18): 2371–2387.