

# Die Entwicklung der Produktivität von Marktfruchtbetrieben unter Berücksichtigung von Treibhausgasemissionen

## Productivity Change of Arable Farms with Regard to Greenhouse Gas Emissions

Patrick J.C. Wettemann  
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

### Zusammenfassung

*Vorliegende Studie analysiert die Umwelteffizienz und die Produktivitätsentwicklung von Marktfruchtbetrieben unter Berücksichtigung von Treibhausgasemissionen als unerwünschten Output. Es werden Schattenpreise von Treibhausgasemissionen eruiert sowie exogene Faktoren auf deren Einfluss auf die Effizienz getestet und die Wirkung verschiedener Treiber auf die Produktivitätsentwicklung quantifiziert. Den methodischen Rahmen hierfür bildet eine output-orientierte und eine erweiterte hyperbolische stochastische Distanzfunktion. Datengrundlage ist ein balanciertes Panel von 141 norddeutschen Marktfruchtbetrieben im Zeitraum der Wirtschaftsjahre 2002/03 bis 2009/10. Die Ergebnisse zeigen, dass noch 12 % bzw. 9 % der produktspezifischen Emissionen eingespart werden können. Bessere Standorte mit einer höheren Anzahl an Bodenpunkten sowie ein höherer Fruchtfolgeanteil an Getreide und Zuckerrüben beeinflussen die Effizienz positiv. Hingegen wirken ein zunehmender Anteil an organischen Düngern und eine höhere Rate an ausgelagerten Dienstleistungen Effizienz mindernd. Die Schattenpreise der Treibhausgasemissionen bewegen sich in Abhängigkeit der Distanzfunktion im Mittel zwischen 3,56 und 7,12 € je Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent sowie 1,71 und 3,41 € je Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent. Für die Schattenpreise ist eine steigende Tendenz im Beobachtungszeitraum festzustellen. Die ermittelte positive Entwicklung der Produktivität wird maßgeblich von technischem Fortschritt vorangetrieben. Änderungen der Effizienz üben im Durchschnitt der Jahre lediglich marginalen Einfluss auf die Produktivitätsentwicklung aus. Änderungen der Skalengröße hemmen die Produktivitätsentwicklung geringfügig.*

### Schlüsselwörter

*Umwelteffizienz; Produktivitätsentwicklung; Treibhausgasemissionen; Schattenpreise; stochastische Distanzfunktionen*

### Abstract

*This study analyses the environmental efficiency and changes in productivity of arable farms, taking greenhouse gas emissions into consideration as an undesirable output. Shadow prices of greenhouse gas emissions and determinants of efficiency are investigated and the influence of different sources of productivity change is quantified. The methodological framework is based on output-oriented and enhanced hyperbolic stochastic distance functions. The balanced data panel comprises 141 arable farms located in northern Germany between the 2002/03 and 2009/10 financial years. The results show that there are potential savings of 12% or 9% of product-related emissions for the output-oriented and enhanced hyperbolic distance functions, respectively. Better soil quality and a higher proportion of grain and sugar beet in the crop rotation influence efficiency positively. In contrast, a higher percentage of organic fertilizer and a higher percentage of outsourced services have a negative influence on efficiency. Average shadow prices of greenhouse gas emissions are, depending on the distance function, from €3.56 to €7.12 per tonne CO<sub>2</sub> equivalent and from €1.71 to €3.41 per tonne CO<sub>2</sub> equivalent. Shadow prices show an increasing trend during the observation period. The determined positive productivity change is mainly caused by technical progress. Average efficiency changes have only a marginal impact on productivity change. Scale changes inhibit productivity progress slightly.*

### Key Words

*environmental efficiency; productivity change; greenhouse gas emissions; shadow prices; stochastic distance functions*

## 1 Einleitung

Das im Jahr 2015 beschlossene Pariser Klimaabkommen verdeutlicht den politischen Willen für Maßnahmen, die Erwärmung des globalen Klimas durch eine Verringerung des Ausstoßes an Treibhausgasen einzudämmen (UN, 2015). Die Landwirtschaft ist hierbei in doppelter Hinsicht involviert: Zum einen gilt der Sektor mit einem Anteil von rund 14 % als einer der Hauptverursacher der global emittierten Treibhausgase (IPCC, 2007). Zum anderen ist die Landwirtschaft von den Auswirkungen der Klimaerwärmung direkt betroffen. Gleichzeitig soll die Landwirtschaft die Sicherung der Ernährung gewährleisten (UN, 2015; BMEL, 2016). Laut IPCC (2007) bestehen erhebliche Einsparpotentiale von Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) in der Landwirtschaft. So verpflichtet sich auch Deutschland, die Landwirtschaft aktiv zur Reduktion von THG-Emissionen einzubinden (BMELV, 2009; BMEL, 2016). Jedoch bestehen laut dem Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) 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).

Hinsichtlich der wissenschaftlichen Literatur liegen umfangreiche methodische Konzepte zur Ermittlung von Einsparpotentialen von THG-Emissionen (FÄRE et al., 2005; CUESTA et al., 2009; BRINER et al., 2012) sowie auch empirische Anwendungen vor (VERMOT und DE CARA, 2010; DE CARA und JAYET, 2011). Allerdings sind empirische Studien überwiegend auf aggregierter Ebene durchgeführt worden, d. h. es wurden nicht einzelbetriebliche Daten analysiert, sondern höher aggregierte Daten bzw. Modellbetriebe ausgewertet (z. B. MACLEOD et al., 2010; MORAN et al., 2011; BRINER et al., 2012). Zudem eruieren die genannten Studien mögliche Einsparpotentiale nicht durch vorhandene Ineffizienzen, wie beispielsweise mittels Methoden der Effizienzanalyse (vgl. COELLI et al., 2005), sondern durch die (partielle) Analyse von Maßnahmen zur Einsparung von Treibhausgasemissionen (vgl. BEUKES et al., 2010; DE CARA und JAYET, 2011; WBAE und WBW, 2016). Die Frage, wie einzelbetrieblich Treibhausgasemissionen auf Grund von Ineffizienzen in welcher Höhe und zu welchen Kosten eingespart werden kön-

nen, ist noch offen. Die Effizienzanalyse ist als Instrument für betriebswirtschaftliche Analysen von Betrieben in Deutschland breit angewendet (z. B. ZHU und OUDE LANSINK, 2010; SAUER und LATACZ-LOHMANN, 2015). Eine effizienzanalytische Ermittlung der Einsparpotentiale an THG-Emissionen steht für landwirtschaftliche Betriebe aber noch aus. Zudem fehlt eine quantitative Betrachtung der Produktivitätsentwicklung unter der Berücksichtigung von Treibhausgasemissionen.

Vor diesem Hintergrund sind die Ziele der vorliegenden Studie,

- Einsparpotentiale von THG-Emissionen auf Grund von (Umwelt-)Ineffizienzen für landwirtschaftliche Betriebe in Deutschland zu quantifizieren,
- die damit verbundenen Grenzvermeidungskosten zu schätzen,
- mögliche Ansatzstellen zur Emissionsvermeidung für Landwirte und Politik zu identifizieren sowie
- zu untersuchen, wie stark sich Produktivität und Grenzvermeidungskosten im Zeitablauf verändert haben.

Zur Quantifizierung der Einsparpotentiale werden THG-Emissionen als unerwünschtes Koppelprodukt der Produktion berücksichtigt und die Analyse anhand einer output-orientierten und einer erweiterten hyperbolischen stochastischen Distanzfunktion durchgeführt. Hierauf aufbauend werden zur Schätzung der marginalen Vermeidungskosten Schattenpreise für THG-Emissionen kalkuliert. Zur Identifizierung von Ansatzstellen zur Emissionsvermeidung wird der Einfluss exogener Variablen und der Inputhöhe auf die Umwelteffizienz geschätzt. Zur Einschätzung der Entwicklung von Produktivität und Grenzvermeidungskosten im Zeitablauf werden die totalen Faktorproduktivität und deren Treiber eruiert. Die Analyse wird am Beispiel eines balancierten Panels von 141 norddeutschen Marktfruchtbetrieben, die für den Zeitraum der Wirtschaftsjahre 2002/03 bis 2009/10 vorliegen, durchgeführt.

Im nächsten Kapitel erfolgt ein Literaturüberblick über die für vorliegende Studie relevanten Analysen. 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 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 5. Schließlich fasst Kapitel 6 wesentliche Ergebnisse der Arbeit zusammen.

## 2 Literaturüberblick über Modellierungsansätze zur Messung der Umwelteffizienz

Der mit am häufigsten verwendete Ansatz zur Messung der Umwelteffizienz ist die Anpassung etablierter Modelle der Produktionstheorie (Ansätze mit Produktionsfrontiers/Distanzfunktionen) im Hinblick auf die berücksichtigte(n) Umweltwirkung(en). So werden unerwünschte Umweltwirkungen, wie z. B. Nährstoffüberschüsse, THG- oder Schwefeldioxidemissionen, hauptsächlich als Input, inverser Output oder schwach verschwendbarer Output modelliert. Einen Überblick über empirische Ansätze zur Ermittlung der Umwelteffizienz findet sich z. B. in ZHOU et al. (2008) und SONG et al. (2012). CHUNG et al. (1997) sind eine der ersten Autoren, die Distanzfunktionen für eine asymmetrische Behandlung erwünschter und unerwünschter Outputs einsetzen. Hierbei wird simultan die maximale Expansion des erwünschten und die maximale Kontraktion des unerwünschten Outputs ermittelt. Wurde zunächst die deterministische Methode Data Envelopment Analysis (DEA) zur Umwelteffizienzmessung angewandt, so etablierten sich beginnend mit HETEMÄKI (1996) zunehmend Methoden, die eine Berücksichtigung von stochastischen Einflüssen erlauben. Da landwirtschaftliche Unternehmen im Vergleich zu anderen Sektoren relativ starken Outputschwankungen unterworfen sind, ist die Berücksichtigung einer stochastischen Komponente für eine adäquate Modellierung, insbesondere für Marktfruchtbetriebe, nötig (vgl. COELLI et al., 2005).

Anwendungen der Umwelteffizienzmessung für die 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 (z. B. 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). Es lassen sich somit Zielkonkurrenzen zwischen einer ökonomisch effizienten und einer umwelteffizienten Produktion ableiten sowie Schatten-

kosten der Verringerung des unerwünschten Outputs bestimmen. Entsprechende Anwendungen unter Berücksichtigung des Energieverbrauchs von Betrieben finden sich unter anderen in HOANG und RAO (2010) sowie BLANCARD und MARTIN (2014). BOSTIAN et al. (2015) eruierten Schattenpreise von Stickstoff mittels eines kombinierten ökonomischen und biophysikalischen Modells in Abhängigkeit einer hypothetischen Stickstoffsteuer. Studien, die sich der Umwelteffizienz in Hinsicht auf THG-Emissionen widmen und dabei den von COELLI et al. (2007) vorgeschlagenen Modellierungsansatz wählen, sind beispielsweise von SESMERO et al. (2012) für Ethanolanlagen oder von WELCH und BARNUM (2009) für Elektrizitätswerke.

Auch wenn das Prinzip der Materialbilanz für Nährstoffüberschüsse plausibel ist, ist die Materialbilanz nur bedingt für THG-Emissionen geeignet. LAUWERS (2009) führt hierzu aus, dass die Materialbilanz bzw. das Massenerhaltungsgesetz für immaterielle Effekte inhärent erfüllt wird, ohne an Aussagekraft zu besitzen. Der zentrale Leitsatz der Materialbilanz „what goes in, must come out“ kann hierbei nicht angewandt werden (COELLI et al., 2007). 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<sub>2</sub>-Äquivalente (CO<sub>2</sub>e), die zur Messung der THG-Emissionen dienen, nicht die materielle Beschaffenheit der Inputs widerspiegeln, sondern immaterielle Klimaeffekte. So stehen Inputs, wie z. B. Diesel, bei der Bewertung mittels CO<sub>2</sub>e in keinerlei direktem stofflichen 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 zudem teilweise wesentlich von dessen Anwendung abhängig. Beispiel hierfür sind die bei der Anwendung von Stickstoffdünger entstehenden Lachgasemissionen. 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<sub>2</sub>, das gleichzeitig Hauptnährstoff der Pflanzen und Treibhausgas ist, nicht gesteuert werden und ist für alle Betriebe gleichermaßen vorhanden. Folglich hätte auch die Einbindung von atmosphärischem CO<sub>2</sub> keine Fähigkeit zur zusätzlichen Diskriminierung aus effizienzanalytischer Sicht. Aus den genannten Gründen wird das Prinzip der Materialbilanz für THG-Emissionen

nicht angewendet und stattdessen THG-Emissionen als schwach verschwendbarer unerwünschter Output berücksichtigt.<sup>1</sup>

Neuere Ansätze zur Umwelteffizienzmessung gehen explizit auf die Flexibilität des Verlaufs der Transformationsrate zwischen erwünschten Outputs ein (CHAVAS und DI FALCO, 2012; SAUER und WOSSINK, 2013). SAUER und WOSSINK (2013) berücksichtigen für die Outputs landwirtschaftliche Erlöse und gekoppelte Zahlungen durch die Teilnahme an Umweltprogrammen komplementäre, kompetitive und supplementär-kompetitive Beziehungen. Allerdings unterscheidet sich der unerwünschte Output der THG-Emissionen zu nutzenbringenden Outputalternativen, die zudem einer aktiven Portfolioentscheidung unterliegen. Abgesehen von möglichen Ineffizienzen ist eine Verringerung der THG-Emissionen direkt mit einer Verringerung des Outputs gekoppelt und stellt somit keine Produktionsalternative dar. Komplementäre Beziehungen zwischen einer Einsparung an THG-Emissionen und einer gleichzeitigen Steigerung des Outputs sind ausschließlich auf Grund von Ineffizienzen zu erwarten, jedoch nicht auf Grund struktureller Zusammenhänge, wie sie zwischen zwei erwünschten Outputs bestehen. Daher wird von einer Anwendung des Ansatzes von SAUER und WOSSINK (2013) abgesehen.

### 3 Messung der Umwelteffizienz mittels Distanzfunktionen

#### 3.1 Umwelteffizienz und deren Determinanten

Zur Ermittlung der Umwelteffizienz werden zwei verschiedene Distanzfunktionen verwendet, denen unterschiedliche Annahmen über Anpassungsmöglichkeiten der Betriebe zu Grunde liegen. Als erste Orientierung wird eine output-orientierte Distanzfunktion ( $D^O$ ) gewählt. Dabei werden ausschließlich Steigerungspotentiale des erwünschten Outputs ermittelt. Grund hierfür ist, dass Inputs wie Boden, Arbeit und zum Teil auch das Anlagevermögen kurzfristig als fix zu betrachten sind (vgl. GUBI, 2006; BREUSTEDT et al., 2011) und somit Ineffizienzen nur durch eine Erhöhung der Faktorproduktivitäten bei konstantem

Input und konstanten THG-Emissionen eliminiert werden können. Werden die Betriebe für einen mittel- bis langfristigen Zeithorizont modelliert, ist von einer weitreichenderen Anpassungsfähigkeit der Betriebe auszugehen, z. B. durch Auflösung von Pacht- oder Arbeitsverträgen (vgl. GUBI, 2006). Der Einsatzumfang an Inputs führt wiederum zu Auswirkungen auf den Umfang der THG-Emissionen bei der Produktion, wie beispielsweise ein geringerer Dieselverbrauch durch einen geringeren Einsatz an Fläche. Deshalb erfolgt eine simultane Berücksichtigung der Einsparpotentiale der THG-Emissionen und der Inputs. Somit wird als zweite Orientierung der Distanzfunktion eine erweiterte hyperbolische Distanzfunktion ( $D^E$ ) gewählt,<sup>2</sup> die neben der Steigerung des Outputs auch absolute Einsparpotentiale der Inputs und THG-Emissionen berücksichtigt.

Zur Modellierung der Umwelteffizienz<sup>3</sup> 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  $w_n = w_{1n}, \dots, w_{Pn} \in R_+^P$ . Das Technologieset ist wie folgt definiert:

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

Die Annahmen zu der Technologiemenge  $T$  finden sich in FÄRE und PRIMONT (1995).  $D^O$  ist wie folgt bestimmt:

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

<sup>1</sup> THG-Emissionen sind nicht als unerwünschter Input anzusehen, da diese zum Teil erst durch den Produktionsprozess freigesetzt werden („joint production“) (vgl. Färe et al., 2007; Chambers et al., 2014).

<sup>2</sup> Prinzipiell wäre auch die Verwendung einer dreidimensionalen Distanzfunktion als lineare Approximation von  $D^E$  überlegenswert (vgl. CHUNG et al., 1997). Jedoch ist nach VARDANYAN und NOH (2006) keine Überlegenheit eines bestimmten Richtungsvektors festzustellen. Laut FÄRE et al. (2005) ist es nicht möglich, Umwelteffizienzwerte anhand einer stochastischen dreidimensionalen Distanzfunktionen zu ermitteln und somit stochastischen Einflüssen Rechnung zu tragen. Ferner zeigen CUESTA et al. (2009), dass bei Annahme variabler Skalenerträge die Modelle dreidimensionaler Distanzfunktionen nicht linear sind (vgl. FÄRE et al., 2016). Daher wird von der Verwendung einer dreidimensionalen Distanzfunktion anstatt  $D^E$  abgesehen.

<sup>3</sup> Im Folgenden werden die Begriffe Umwelteffizienz und Effizienz synonym verwendet. Der Terminus Effizienz bezieht sich hierbei auf die technische Effizienz (vgl. COELLI et al., 2005).

$D^O$  ist für den Bereich  $0 < D^O(x, y, w) \leq 1$  definiert, homogen vom Grade Eins in den erwünschten Outputs  $D^O(x, \eta y, w) = \eta D^O(x, y, w)$ ,  $\eta > 0$ , nicht abnehmend in den Outputs sowie nicht zunehmend und quasikonkav in unerwünschten Outputs und Inputs (vgl. FÄRE und PRIMOT, 1995).<sup>4</sup>  $D^E$  stellt sich wie folgt dar:

$$D^E(x, y, w) = \inf \left\{ \xi > 0: (x\xi, \frac{y}{\xi}, w\xi) \in T \right\}. \quad (3)$$

Wie auch  $D^O$  ist die erweiterte hyperbolische Distanzfunktion  $D^E$  für den Bereich  $0 < D^E(x, y, w) \leq 1$  definiert.  $D^E$  erfüllt alle bei  $D^O$  geltenden Axiome bis auf die Ausnahme, dass  $D^E$  nahezu homogen nach  $D^E(\eta^{-1}x, \eta y, \eta^{-1}w) = \eta D^E(x, y, w)$ ,  $\eta > 0$  ist (CUESTA et al., 2009).

Nach LOVELL et al. (1994) werden die genannten Homogenitätsbedingungen mit Hilfe einer Normalisierung durch einen Output erzwungen. Bei einer Normalisierung mittels  $\eta = y_M^{-1}$  ergibt sich für die Distanzfunktionen (2) und (3):

$$D^O\left(x, \frac{y}{y_M}, w\right) = \frac{D^O(x, y, w)}{y_M}. \quad (4)$$

$$D^E\left(xy_M, \frac{y}{y_M}, wy_M\right) = \frac{D^E(x, y, w)}{y_M}. \quad (5)$$

Zu dem Vorgang der Normalisierung wird häufig die Frage nach einer möglichen Endogenität aufgeworfen. Wie COELLI (2000) für Cobb-Douglas- und Translog-Funktionsformen erläutert, sind jedoch unter Annahme eines erlösmaximierenden Verhaltens die Schätzer einer output-orientierten Distanzfunktionen, wie  $D^O$ , konsistent (vgl. GUARDA et al., 2013). Konsistente Schätzer für  $D^E$  werden durch die Annahme eines gewinnmaximierenden Verhaltens gewährleistet (COELLI, 2000; COELLI und PERELMANN, 2000; CUESTA und ZOFIO, 2005). Auch im Hinblick auf die angenommenen Anpassungsmöglichkeiten bei  $D^O$  und  $D^E$  ist die Annahme eines erlös- bzw. gewinnmaximierenden Verhaltens konsistent.

Werden die Distanzfunktionen (4) und (5) mittels der Stochastic Frontier Analysis (SFA) geschätzt (AIGNER et al., 1977; MEEUSEN und VAN DEN BROECK, 1977), ergeben sich nach dem Logarithmieren und Umstellen folgende Gleichungen:

$$-\ln y_{Mn} = \ln D^O\left(x_n, \frac{y_n}{y_{Mn}}, w_n\right) + u_n + v_n. \quad (6)$$

$$-\ln y_{Mn} = \ln D^E\left(x_n y_{Mn}, \frac{y_n}{y_{Mn}}, w_n y_{Mn}\right) + u_n + v_n. \quad (7)$$

Für beide Distanzfunktionen gilt, dass der stochastische Term  $v_n \sim N(0, \sigma_v^2)$  um Null symmetrisch normalverteilt ist und unabhängig vom Term  $u_n$ . Die Effizienz wird durch den Ineffizienzterm  $u_n = -\ln D^O(x, y, w) \geq 0$  bzw.  $u_n = -\ln D^E(x, y, w) \geq 0$  determiniert, es gilt  $u_n \sim N^+(0, \sigma_u^2)$ . Die Effizienz wird jeweils mittels  $TE_n = E[\exp(-u_n)|e_n]$  bestimmt (COELLI et al., 2005). Effiziente Betriebe weisen einen Wert von Eins auf, ineffiziente Betriebe einen Wert von kleiner Eins. Ein Betrieb mit einem Effizienzwert von beispielsweise 0,75 kann dessen Output um rund 33 % ( $\approx 1/0,75$ ) steigern und, im Falle des erweiterten hyperbolischen Distanzmaßes, unerwünschte Outputs sowie Inputs um jeweils 25 % ( $= 1 - 0,75$ ) reduzieren (vgl. CUESTA und ZOFIO, 2005).

Mittels des sog. „Technical Inefficiency Effects“-Modells (TE-Modell) von BATTESE und COELLI (1995) wird der Einfluss exogener Variablen  $z_n = z_{1n}, \dots, z_{Rn} \in R^R$  auf die Ineffizienz der Betriebe geprüft. Hierbei wird der Mittelwert des Ineffizienzterms  $u_n$  als lineare Funktion exogener Faktoren mit  $\mu_n = \sum_{r=1}^R \delta_r z_{rn}$  angenommen, sodass  $u_n = \sum_{r=1}^R \delta_r z_{rn} + \omega_n$ . 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  $v_n$  und der Ineffizienzkomponente  $u_n$  parametrisiert. Hierzu werden die Inputs mit  $\sigma_u^2 = \exp(\sum_{i=1}^I \psi_i x_{in})$  und  $\sigma_v^2 = \exp(\sum_{i=1}^I \phi_i x_{in})$  berücksichtigt (KUMBHAKAR, 2002; WANG, 2002). Durch die Parametrisierung der Varianzen mit den Inputs kann zudem der Einfluss der Inputhöhe auf die Effizienz und auf das Risiko der Produktion ermittelt werden (KUMBHAKAR, 2002).

### 3.2 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 für  $D^E$  gilt:

$$\pi(x, p, w) = \max_{y, w} \left( \frac{py}{qw} : D^E(x, y, w) \leq 1 \right). \quad (8)$$

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

$$\frac{py}{qw} = \lambda \left( \frac{\partial D^E(\cdot)}{\partial y} \right) y = \lambda \left( \frac{\partial \ln D^E(\cdot)}{\partial \ln y} \right) D^E(\cdot). \quad (9)$$

<sup>4</sup> Um Monotonie lokal zu erzwingen erfolgt die Anwendung der Prozedur von HENNINGSEN und HENNING (2009) für die Inputs und den unerwünschten Output.

$$\frac{py}{qw} = -\lambda \left( \frac{\partial D^E(\cdot)}{\partial y} \right) w = -\lambda \left( \frac{\partial \ln D^E(\cdot)}{\partial \ln w} \right) D^E(\cdot). \quad (10)$$

Das Verhältnis der Gleichungen (9) und (10) zeigt, dass für alle Vektoren mit einer Skalenelektivität 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 (vgl. BOSTIAN et al., 2015):

$$q = -p \frac{\partial D^E(x,y,w)/\partial w}{\partial D^E(x,y,w)/\partial y} = -p \frac{\partial \ln D^E(x,y,w)/\partial \ln w}{\partial \ln D^E(x,y,w)/\partial \ln y} * \frac{y}{w}. \quad (11)$$

Mittels Gleichung (11) werden auch die Schattenpreise der THG-Emissionen im Falle von  $D^O$  ermittelt, wobei die Distanzfunktionen demgemäß ausgetauscht sind. Die Herleitung hierfür erfolgt über die duale Beziehung von  $D^O$  und der Umsatzfunktion (SHEPARD, 1970; FÄRE et al., 1993; COGGINS und SWINTON, 1996).

### 3.3 Dynamik der totalen Faktorproduktivität

Für die Ermittlung der Dynamik der totalen Faktorproduktivität im Zeitablauf und deren Ursachen wird auf das von CAVES et al. (1982) eingeführte Konzept des Malmquist-Index zurückgegriffen (CAVES et al., 1982) und nach OREA (2002) um den Beitrag von Skaleneffekten zur Produktivitätsentwicklung erweitert. Dafür werden in  $D^O$  und  $D^E$  Variablen für die Zeit berücksichtigt. Entsprechend weitet sich die Notation der Terme in Gleichung (6) und (7) von  $n$  für die beobachteten Betriebe auf  $nt$  für die Beobachtung der Betriebe in der Zeitperiode  $t = 1, \dots, T$  aus. Die jährliche prozentuale Veränderung der totalen Faktorproduktivität (TFPC) wird in die Komponenten Veränderung der technischen Effizienz (EC), technischen Fortschritt (TC) und Veränderung der Skalengröße (SC) wie folgt aufgliedert (vgl. OREA, 2002)<sup>5</sup>:

$$TFPC_{nt,t+1} = EC_{nt,t+1} + TC_{nt,t+1} + SC_{nt,t+1}. \quad (12)$$

Wie sich der Abstand eines Betriebes zur Frontier in Abhängigkeit der Zeit geändert hat, erfasst der Index EC. Der Index TC steht für die Veränderung der Frontier zwischen Zeitperioden an sich. Zudem können Betriebe durch Änderungen ihrer Skalengröße die Produktivität zusätzlich steigern bzw. verringern. Mittels des Index SC wird dieser Beitrag quantifiziert. Die drei genannten Komponenten der TFPC werden

wie folgt berechnet, wobei bis auf die Komponente SC die Gleichungen sowohl für  $D^O$  als auch für  $D^E$  gültig sind (OREA, 2002; COELLI et al., 2005):

$$EC_{nt,t+1} = \ln \left[ \frac{E[\exp(-u_{nt+1})|e_{nt+1}]}{E[\exp(-u_{nt})|e_{nt}]} \right]. \quad (13)$$

$$TC_{nt,t+1} = \left[ 0,5 * \left( \frac{\partial \ln y_{Mnt}}{\partial t} + \frac{\partial \ln y_{Mnt+1}}{\partial t} \right) \right]. \quad (14)$$

$$SC_{nt,t+1}^O = \left[ 0,5 * \sum_{i=1}^I (\varepsilon_{int} SF_{nt} + \varepsilon_{int+1} SF_{nt+1}) * \ln \left( \frac{x_{int+1}}{x_{int}} \right) \right], \quad (15)$$

wobei  $SF_{nt} = \frac{\varepsilon_{nt-1}}{\varepsilon_{nt}}$ ,  $\varepsilon_{nt} = \sum_{i=1}^I \varepsilon_{int}$

sowie  $\varepsilon_{int} = \frac{\partial \ln y_{Mnt}}{\partial \ln x_{int}}$ .

Für die Ermittlung des  $SC_{nt,t+1}^{DE}$  erfolgt die Berechnung analog zu Gleichung (15), jedoch werden die Terme  $SF_{nt}$  mit  $SF_{nt} = \frac{\varepsilon_{nt-0,5}}{\varepsilon_{nt}}$  sowie die Ableitungen

nach den Inputs mittels  $\varepsilon_{int} = \frac{\partial \ln y_{Mnt}}{\partial \ln(w_{pnt} x_{int})}$  berechnet

(vgl. CUESTA et al., 2009). Grund für den Austausch des Terms  $SF_{nt}$  ist, dass  $D^E$  bei einer Summe der Inputelastizitäten von -0,5 konstante Skalenerträge aufweist (vgl. FÄRE et al., 2002; CUESTA und ZOFIO, 2005). Für die Indizes (12) bis (15) 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

### 4.1 Datenbeschreibung

Datengrundlage bilden 141 spezialisierte Marktfruchtbetriebe, welche sich vorwiegend in den Bundesländern 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. Sämtliche monetären Angaben sind mit der Produktkategorie

<sup>5</sup> Nachfolgende Erörterung geschieht vor dem Hintergrund einer Translog-Funktion, mit der die Distanzfunktion geschätzt wird (vgl. CHRISTENSEN et al., 1973).

**Tabelle 1. Deskriptive Statistik der untersuchten 141 Marktfruchtbetrieben von WJ 02/03 bis 09/10**

Variable	Mittelwert	Standardabweichung	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] <sup>a</sup>	730	661	50	4 575
THG [CO <sub>2</sub> -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

<sup>a</sup> Für 43 Betriebe liegen Flächenangaben nur als ganzzahlige Dekahektar vor (z. B. 25\*10 ha).

Quelle: eigene Berechnungen

**Tabelle 2. Diesel- und Düngeraufwendungen der untersuchten 141 Marktfruchtbetrieben von WJ 02/03 bis 09/10 sowie deren THG-Gewichtung**

Variable	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	CO <sub>2</sub> e/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 <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg]	47 721	65 862	0	653 140	0,713
Kalium [K <sub>2</sub> O]	48 746	49 899	0	412 566	0,456

Quelle: eigene Berechnungen; KALTSCHMITT und REINHARDT (1997); IPCC (1996); IPCC (2007)

rie entsprechenden Indizes des STATISTISCHEN BUNDESAMTES (2012) auf das Jahr 2010 als Basis inflationiert.

Tabelle 1 fasst die Variablen der Analyse zusammen. In den Vorleistungen sind sämtliche Aufwendungen für Saatgut, Dünger, Diesel, Pflanzenschutzmittel, variable Kosten für Maschinen, Strom- und Trocknungskosten sowie Kosten für bezogene Dienstleistungen berücksichtigt. Organische Dünger sind dabei mit Verkehrswerten oder Substitutionswerten<sup>6</sup> jeweils inklusive der Ausbringkosten bewertet. Das Anlagevermögen beinhaltet die Posten Maschinen, Gebäude, Trocknung und Drainagen. Der Mittelwert der Flächenausstattung beträgt 730 Hektar. Die Betriebe gelten folglich nicht als repräsentativ für Deutschland (vgl. BMELV, 2010). Zur Erfassung der

Produktion der Betriebe werden Getreideerträge mit dem Faktor 1, Raps-erträge mit dem Faktor 2,2, Silomais-erträge (bei 32 % Trockensubstanzgehalt) mit dem Faktor 0,2 und Zuckerrüben-erträge (bei 16 % Zuckeranteil) mit dem Faktor 0,15 gewichtet und als GE aggregiert. Auf Grund der perioden- und nicht leistungsbezogenen landwirtschaftlichen Buchführung erfolgt für vorliegende Analyse die Zuordnung von Erträgen in  $t + 1$  zu  $t$ .

Zur Kalkulation der THG-Emissionen werden die Mengen an Stickstoff, Phosphor und Kalium sowie das Volumen an Dieselmotorkraftstoff berücksichtigt (Tabelle 2). Die CO<sub>2</sub>e beziehen sich auf Primäremissionen, d. h. es sind sämtliche Vorgänge, von der Exploration/Synthese über den Transport bis hin zum Verbrauchsort sowie der Verbrauch selbst berücksichtigt (vgl. KALTSCHMITT und REINHARDT, 1997). Als THG-Emissionen werden die Mengen an CO<sub>2</sub>, Methan und Lachgas berücksichtigt und zur Aggregation als CO<sub>2</sub>e nach IPCC (2007) gewichtet. Bei Stickstoff ist zusätzlich eine Lachgasemission in Höhe von 0,05 % der ausgebrachten Menge mit einkalkuliert

<sup>6</sup> Falls keine Verkehrswerte vorliegen, werden Substitutionswerte berücksichtigt. Zur Berechnung der Substitutionswerte wird auf Preise von EUROSTAT (2012), BMELV (2012), LK S-H (2012) sowie auf Preisindizes von STATISTISCHES BUNDESAMT (2012) zurückgegriffen.

(IPCC, 1996). Organische Düngermengen werden mit Opportunitätsemissionen anhand von mineralischen Düngern bewertet.

Für das TE-Modell wird die Anzahl an Bodenpunkten (BP) für die Qualität der bewirtschafteten Fläche berücksichtigt. Da die Art des Düngers und dessen Ausbringung direkten Einfluss auf die Umwelt ausübt, werden Anteile von Düngern in organischer Form im TE-Modell berücksichtigt. Um den Effekt einer Spezialisierung auf Getreideanbau von Betrieben zu testen, wird der Anteil an Getreide innerhalb der Fruchtfolge untersucht. Da Zuckerrüben als ökonomisch besonders vorzügliches Fruchtfolgeglied gelten, wird deren Anbau ebenfalls im TE-Modell berücksichtigt. Im Sample bauen 563 Beobachtungen keine Zuckerrüben an. Ferner wird im TE-Modell getestet, ob Betriebe, die vermehrt Arbeiten an z. B. Lohnunternehmer auslagern, effizienter sind. Dazu wird mit der Variablen Dienstleistung der Anteil an bezogenen Dienstleistungen und Maschinenmieten an den gesamten Vorleistungen berücksichtigt. Schließlich wird die Mechanisierung der Betriebe mittels der installierten Motorleistung je Hektar auf deren Einfluss auf die Effizienz getestet.

## 4.2 Spezifikation des theoretischen Modells

Die in Kapitel 3 dargestellten Distanzfunktionen werden anhand einer Translog-Funktion mit variablen Skalenerträgen, nicht-neutralem technischen Fortschritt sowie zeitlich veränderbarer Ineffizienz geschätzt (vgl. CHRISTENSEN et al., 1973):

$$\begin{aligned}
 -\ln y_{Mnt} = & \beta_0 + \sum_{i=1}^I \beta_i \ln x_{int}^* \\
 & + 0,5 * \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I \beta_{ij} \ln x_{int}^* \ln x_{jnt}^* + \beta_t t \\
 & + \sum_{i=1}^I \beta_{ti} t \ln x_{int}^* + \tau_{tp} t \ln w_{Pnt}^* \\
 & + 0,5 * \beta_{tt} t^2 + \lambda_P \ln w_{Pnt}^* \\
 & + 0,5 * \lambda_{PP} \ln w_{Pnt}^* \ln w_{Pnt}^* \\
 & + \sum_{i=1}^I \varphi_{Pi} \ln w_{Pnt}^* \ln x_{int}^* + u_{nt} + v_{nt}, \quad (16)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{mit } \ln w_{Pnt}^* &= \ln w_{Pnt}, \\
 \ln x_{int}^* &= \ln x_{int} \text{ für } D^O, \quad (17)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{mit } \ln w_{Pnt}^* &= \ln w_{Pnt} * \ln y_{Mnt}, \\
 \ln x_{int}^* &= \ln x_{int} * \ln y_{Mnt} \text{ für } D^E. \quad (18)
 \end{aligned}$$

Die Inputs  $x_{int}$  stehen für Vorleistungen, Arbeit, Anlagevermögen und Ackerfläche, der Output  $y_{Mnt}$  für GE, der unerwünschte Output  $w_{Pnt}$  für THG-Emissionen und die Zeit wird mit Variable  $t$  berücksichtigt. Die In- und Outputs sind durch den jeweiligen Mittelwert dividiert. Die Zeitvariable ist um ihren Mittelwert adjustiert. Die Variablen des TE-Modells und eine Konstante werden als  $z_{rnt}$  im Term  $u_{nt}$  berücksichtigt. 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. Die Distanzfunktionen werden mittels des `sfcross`-Packages in Stata 12.0 geschätzt (STATACORP LP, 2011; BELOTTI et al., 2013). Weitere Kalkulationen erfolgen mittels HENNINGSSEN (2012), R CORE TEAM (2012) und TURLACH und WEINGESSEL (2013).

## 5 Ergebnisse und Diskussion

### 5.1 Schätzergebnisse der Distanzfunktionen

Vorab werden alternative Spezifikationen gegenüber dem in Kapitel 4.2 vorgestellten Modell mittels eines Likelihood-Ratio-Tests anhand einer  $\chi^2$ -Verteilung überprüft (GREENE 2012). Aus Tabelle 3 geht hervor, dass die in Kapitel 4.2 beschriebene Translog-Funktion den besten Modellfit leistet.

In Tabelle 4 geben die Spalten Koeffizient die Schätzergebnisse ohne die Implikation von Monotonie wieder, die Spalten mit den korrigierten Koeffizienten geben die Koeffizienten bzw. Schätzer unter Erzwingung von Monotonie wieder. Die Annahme der Monotonie wird in allen Inputs wie auch in den THG-Emissionen erfüllt. Für  $D^O$  sind 100 %, für  $D^E$  sind 97,7 % der Beobachtungen quasikonkav.

Wie für Marktfruchtbetriebe zu erwarten ist, weist der Input Fläche für  $D^O$  und  $D^E$  die höchste partielle Elastizität auf (Tabelle 5). Mit Abstand folgt die partielle Elastizität des Inputs Vorleistungen, das Anlagevermögen weist eine nur marginale partielle Elastizität auf. Die Implikation der Monotonie bei  $D^O$  hat für die partielle Elastizität der Arbeit eine Reduktion auf null zur Folge, im Falle von  $D^E$  ist sie zwischen den Inputs Vorleistungen und Anlagevermögen einzuordnen. Für einen Vergleich mit der Literatur eignet sich die Distanzfunktion  $D^O$  mit einem Wechsel der Vorzeichen der Elastizitäten. TIEDEMANN und LATA CZ-LOHMANN (2013) eruieren für konventionel-

**Tabelle 3. Ergebnisse der Tests auf verschiedene Modellspezifikationen**

Spezifikation	$D^O$		$D^E$	
	Log-Likelihood	Chi-Square	Log-Likelihood	Chi-Square
(1) Translog (nach Kapitel 4.2)	961,2		1 772,4	
(2) Cobb-Douglas als Funktionsform ( $\beta_{ij} = \beta_{ti} = \beta_{tt} = \tau_{tP} = \lambda_{PP} = \varphi_{Pj} = 0$ )	929,1	64,3 <sup>a</sup>	1 738,6	67,5 <sup>a</sup>
(3) Translog ohne TE-Modell ( $\delta_0 = 0; \delta_r = 0$ )	890,5	141,4 <sup>a</sup>	1 702,3	140,1 <sup>a</sup>
(4) Translog ohne Effizienzterm ( $\delta_0 = 0; \delta_r = 0; \psi_0 = 0; \psi_i = 0; \phi_0 = 0; \phi_i = 0$ )	856,8	208,9 <sup>a</sup>	1 650,9	243,0 <sup>a</sup>
(5) Kein technischer Fortschritt ( $\beta_t = \beta_{tt} = \beta_{ti} = \tau_{tP} = 0$ )	906,8	108,9 <sup>a</sup>	1 722,4	99,9 <sup>a</sup>
(6) Kein nicht-neutraler technischer Fortschritt ( $\beta_{ti} = \tau_{tP} = 0$ )	954,7	13,0 <sup>b</sup>	1 765,1	14,6 <sup>b</sup>
(7) Konstante Skalenerträge ( $\sum_{i=1}^I \beta_i = -1$ für $D^O$ bzw. $\sum_{i=1}^I \beta_i = -0,5$ für $D^E$ ; $\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I \beta_{ij} + \sum_{i=1}^I \beta_{ti}t + \sum_{i=1}^I \varphi_{Pj} = 0$ )	943,7	35,1 <sup>a</sup>	1 760,0	24,7 <sup>a</sup>
(8) Homoskedastizität in $u_{nt}$ ( $\psi_0 = 0; \psi_i = 0$ )	955,4	11,7 <sup>b</sup>	1 752,4	40,0 <sup>a</sup>
(9) Homoskedastizität in $v_{nt}$ ( $\phi_0 = 0; \phi_i = 0$ )	955,9	10,6 <sup>b</sup>	1 754,7	35,4 <sup>a</sup>
(10) Homoskedastizität in $u_{nt}$ und $v_{nt}$ ( $\psi_0 = 0; \psi_i = 0; \phi_0 = 0; \phi_i = 0$ )	948,8	24,9 <sup>a</sup>	1 746,9	50,9 <sup>a</sup>

<sup>a, b</sup> signifikant auf 1-/5-%-Level

Quelle: eigene Berechnungen

le Marktfruchtbetriebe deutlich höhere Elastizitäten für Vorleistungen (0,84), Arbeit (0,29) und Kapital (0,11). Indessen wird für Boden eine Outputelastizität von 0,08 festgestellt. ZHU und OUDE LANSINK (2010) ermitteln für Marktfruchtbetriebe Elastizitäten von 0,61 für Boden, von 0,04 für Kapital und eine negative Elastizität für Arbeit in Höhe von -0,01. Die im Vergleich dazu hohe Elastizität des Faktors Boden in dieser Studie kann zum einen an der Messung des Outputs in GE liegen, da etwaige Kompensationseffekte durch hohe (niedrige) Preise bei niedrigem (hohem) Ertrag nicht berücksichtigt werden. Zum anderen ist es durchaus plausibel, dass gerade Boden als Faktor maßgeblich für den Output von Marktfruchtbetrieben ist. Zu den zitierten Studien ist zu beachten, dass die Betriebsgrößen im Mittel deutlich geringer sind (TIEDEMANN und LATACZ-LOHMANN: 86 ha; ZHU und OUDE LANSINK: 163 ha), was ein Grund für divergierende Elastizitäten sein kann. Mit einer Summe der Inputelastizitäten von -0,91 ( $D^O$ ) und -0,46 ( $D^E$ ) befinden sich die Betriebe im Mittel im Bereich abnehmender Skalenerträge.

## 5.2 Umwelteffizienz und Schattenpreis der THG-Emissionen

Die Ergebnisse des TE-Modells zeigen, dass Betriebe auf höherwertigen Standorten effizienter wirtschaften.

Hingegen nimmt mit zunehmendem Anteil an organischem Dünger die Effizienz der Betriebe ab. Ursachen hierfür können Kompromisse organischer Düngung hinsichtlich des Ausbringzeitpunktes, eine heterogene Verfügbarkeit sowie eine mangelhafte Ausbringtechnik sein. Insbesondere bei als Nitrat vorliegendem Stickstoff ist das Speichervermögen im Boden eingeschränkt, was oben genannte Gründe schwerer wiegen lässt (vgl. SMITH und CHAMBERS, 1993). Eine Spezialisierung auf Getreideanbau beeinflusst die Effizienz positiv. Mögliche Gründe sind beispielsweise den dadurch bedingten lohnenden Einsatz größerer Spezialmaschinen oder von Investitionen in die Logistik. Die Ergebnisse sind insofern einzuschränken, als dass zu erwartende negative Fruchtfolgeeffekte bei einer weiteren Expansion des Getreideanteils nicht im Modell mit berücksichtigt sind. Auch einen positiven Einfluss auf die Effizienz weist ein höherer Anbauanteil an Zuckerrüben auf. Daraus ist 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. Ferner können durch den Anbau von Zuckerrüben Arbeitsspitzen gebrochen werden, was die positive Wirkung teilweise erklären kann. Betriebe, die vermehrt Dienstleistungen und Ma-

Tabelle 4. Ergebnisse der Schätzungen der Distanzfunktionen

Variable	$D^O$					$D^E$				
	Koeff.	SE	Korr. Koeff.	SE	Diff./SE	Koeff.	SE	Korr. Koeff.	SE	Diff./SE
$\beta_0$	-0,1071 <sup>a</sup>	0,0160	-0,1207	-	0,85	-0,0444 <sup>a</sup>	0,0059	-0,0456	-	0,20
$\beta_{\text{Vorleistungen}}$	-0,1137 <sup>b</sup>	0,0518	-0,1704	-	1,10	-0,1021 <sup>a</sup>	0,0215	-0,1115	-	0,44
$\beta_{\text{Arbeit}}$	0,0437	0,0290	0,0000	-	1,51	-0,0510 <sup>a</sup>	0,0146	-0,0421	-	-0,61
$\beta_{\text{AV}}$	0,0128	0,0118	-0,0012	-	1,19	0,0047	0,0057	-0,0020	-	1,18
$\beta_{\text{Fläche}}$	-0,7872 <sup>a</sup>	0,0569	-0,7213	-	-1,16	-0,3001 <sup>a</sup>	0,0237	-0,3003	-	0,01
$\beta_{\text{Zeit}}$	-0,0123 <sup>a</sup>	0,0017	-0,0141	-	1,06	-0,0053 <sup>a</sup>	0,0008	-0,0059	-	0,70
$\beta_{\text{Vorleistungen*Vorleistungen}}$	0,3986	0,2972	0,2357	-	0,55	0,0888	0,1430	0,1321	-	-0,30
$\beta_{\text{Vorleistungen*Arbeit}}$	0,0135	0,1058	0,0000	-	0,13	0,0207	0,0536	0,0135	-	0,13
$\beta_{\text{Vorleistungen*AV}}$	-0,1225 <sup>b</sup>	0,0549	-0,0033	-	-2,17	-0,0386	0,0262	-0,0022	-	-1,39
$\beta_{\text{Vorleistungen*Fläche}}$	-0,5385 <sup>c</sup>	0,2847	-0,2228	-	-1,11	-0,2217	0,1451	-0,1453	-	-0,53
$\beta_{\text{Zeit*Vorleistungen}}$	-0,0194	0,0122	-0,0109	-	-0,70	-0,0075	0,0059	-0,0063	-	-0,20
$\beta_{\text{Arbeit*Arbeit}}$	-0,0187	0,0664	0,0000	-	-0,28	0,0066	0,0369	0,0082	-	-0,04
$\beta_{\text{Arbeit*AV}}$	0,0110	0,0268	0,0000	-	0,41	0,0057	0,0134	0,0001	-	0,41
$\beta_{\text{Arbeit*Fläche}}$	0,0624	0,1439	0,0000	-	0,43	0,0317	0,0727	-0,0206	-	0,72
$\beta_{\text{Zeit*Arbeit}}$	-0,0030	0,0063	0,0000	-	-0,48	-0,0041	0,0032	-0,0024	-	-0,54
$\beta_{\text{AV*AV}}$	-0,0025	0,0107	-0,0003	-	-0,21	-0,0022	0,0055	-0,0003	-	-0,35
$\beta_{\text{AV*Fläche}}$	0,0667	0,0624	0,0007	-	1,06	0,0279	0,0322	-0,0001	-	0,87
$\beta_{\text{Zeit*AV}}$	0,0023	0,0031	0,0000	-	0,75	0,0017	0,0015	0,0003	-	0,88
$\beta_{\text{Fläche*Fläche}}$	0,8929 <sup>a</sup>	0,3435	0,3633	-	1,54	0,3554 <sup>c</sup>	0,1898	0,2234	-	0,70
$\beta_{\text{Zeit*Fläche}}$	0,0277 <sup>b</sup>	0,0136	0,0174	-	0,76	0,0142 <sup>b</sup>	0,0071	0,0090	-	0,72
$\tau_{\text{Zeit*THGE}}$	-0,0054	0,0140	-0,0032	-	-0,15	-0,0038	0,0073	-0,0003	-	-0,48
$\beta_{\text{Zeit*Zeit}}$	0,0013	0,0016	0,0014	-	-0,10	0,0002	0,0007	0,0002	-	-0,01
$\lambda_{\text{THGE}}$	-0,1599 <sup>a</sup>	0,0371	-0,1296	-	-0,82	-0,0711 <sup>a</sup>	0,0182	-0,0629	-	-0,45
$\lambda_{\text{THGE*THGE}}$	-0,0262	0,3300	0,0738	-	-0,30	0,0163	0,1717	0,0335	-	-0,10
$\varphi_{\text{THGE*Vorleistungen}}$	0,4361 <sup>c</sup>	0,2508	0,0651	-	1,48	0,1938	0,1258	0,0282	-	1,32
$\varphi_{\text{THGE*Arbeit}}$	-0,0872	0,1430	0,0000	-	-0,61	-0,0735	0,0725	-0,0061	-	-0,93
$\varphi_{\text{THGE*AV}}$	0,0451	0,0664	0,0028	-	0,64	0,0091	0,0328	0,0025	-	0,20
$\varphi_{\text{THGE*Fläche}}$	-0,5010 <sup>c</sup>	0,2703	-0,1800	-	-1,19	-0,1875	0,1408	-0,0689	-	-0,84
$\delta_0$	0,7425 <sup>a</sup>	0,1102	0,7433 <sup>a</sup>	0,0875	-0,01	0,3755 <sup>a</sup>	0,0511	0,3895 <sup>a</sup>	0,0506	-0,28
$\delta_{\text{Bodenpunkte}}$	-0,0100 <sup>a</sup>	0,0022	-0,0099 <sup>a</sup>	0,0018	-0,04	-0,0053 <sup>a</sup>	0,0010	-0,0054 <sup>a</sup>	0,0010	0,11
$\delta_{\text{Organische Düngung}}$	0,0014 <sup>a</sup>	0,0005	0,0010 <sup>b</sup>	0,0004	0,81	0,0007 <sup>a</sup>	0,0003	0,0007 <sup>a</sup>	0,0003	0,08
$\delta_{\text{Getreide}}$	-0,0039 <sup>a</sup>	0,0010	-0,0036 <sup>a</sup>	0,0008	-0,35	-0,0020 <sup>a</sup>	0,0005	-0,0020 <sup>a</sup>	0,0005	0,04
$\delta_{\text{Zuckerrüben}}$	-0,0063 <sup>a</sup>	0,0021	-0,0063 <sup>a</sup>	0,0017	0,00	-0,0023 <sup>a</sup>	0,0010	-0,0028 <sup>a</sup>	0,0009	0,53
$\delta_{\text{Dienstleistung}}$	0,0046 <sup>a</sup>	0,0017	0,0038 <sup>b</sup>	0,0015	0,45	0,0031 <sup>a</sup>	0,0010	0,0025 <sup>a</sup>	0,0009	0,63
$\delta_{\text{Mechanisierung}}$	-0,0042	0,0145	0,0057	0,0120	-0,69	-0,0137	0,0090	-0,0137	0,0085	0,00
$\psi_0$	-4,4672 <sup>a</sup>	0,2512	-4,3828 <sup>a</sup>	0,1714	-0,34	-5,8683 <sup>a</sup>	0,2282	-5,9207 <sup>a</sup>	0,2191	0,23
$\psi_{\text{Vorleistungen}}$	-0,0384	0,9548	1,3896 <sup>b</sup>	0,6170	-1,50	1,8486 <sup>b</sup>	0,9105	2,5005 <sup>a</sup>	0,6003	-0,72
$\psi_{\text{Arbeit}}$	-1,3758 <sup>b</sup>	0,5481	-0,2128	0,3012	-2,12	1,7173 <sup>a</sup>	0,5602	1,5247 <sup>a</sup>	0,3769	0,34
$\psi_{\text{AV}}$	-0,4281 <sup>b</sup>	0,1723	-0,3808 <sup>a</sup>	0,1418	-0,27	-0,2795	0,2034	-0,2279	0,1448	-0,25
$\psi_{\text{Fläche}}$	1,4618	0,9072	-0,6940	0,5226	2,38	-2,2004 <sup>a</sup>	0,8257	-2,7408 <sup>a</sup>	0,5828	0,65
$\phi_0$	-5,1972 <sup>a</sup>	0,1662	-5,3283 <sup>a</sup>	0,1725	0,79	-6,6412 <sup>a</sup>	0,1364	-6,5959 <sup>a</sup>	0,1297	-0,33
$\phi_{\text{Vorleistungen}}$	-1,3984	0,9009	-3,0991 <sup>a</sup>	0,8401	1,89	-1,9988 <sup>a</sup>	0,6315	-2,2296 <sup>a</sup>	0,5510	0,37
$\phi_{\text{Arbeit}}$	1,0343 <sup>c</sup>	0,5516	-0,1618	0,4915	2,17	-1,4173 <sup>a</sup>	0,3676	-1,2321 <sup>a</sup>	0,3089	-0,50
$\phi_{\text{AV}}$	-0,0742	0,1869	-0,0507	0,1925	-0,13	-0,1470	0,1403	-0,1507	0,1322	0,03
$\phi_{\text{Fläche}}$	0,8257	0,8002	3,1790 <sup>a</sup>	0,7634	-2,94	2,9811 <sup>a</sup>	0,6688	3,0126 <sup>a</sup>	0,5617	-0,05
$\alpha_0$			0,0011	0,0135				-0,0008	0,0048	
$\alpha_{\text{In}\bar{y}}$			1,0084 <sup>a</sup>	0,0077				0,9994 <sup>a</sup>	0,0027	
$E[\sigma_u^2/(\sigma_u^2 + \sigma_v^2)]$	72,9 %		75,2 %			65,9 %		64,1 %		
Monotonie										
Inputs			100,0 %					100,0 %		
Zeit			99,9 %					100,0 %		
THGE			100,0 %					100,0 %		
Quasikonkavität			100,0 %					97,7 %		

<sup>a</sup>, <sup>b</sup>, <sup>c</sup> signifikant auf 1-%/5-%/10-%-Level; Koeff.=Koeffizient, SE= Standardfehler, Korr. Koeff.= korrigierter Koeffizient, Diff. =Differenz, AV=Anlagevermögen, THGE=THG-Emissionen

Quelle: eigene Berechnungen

**Tabelle 5. Partielle Elastizitäten der Inputs der Distanzfunktionen**

Variable	$D^O$		$D^E$	
	Elastizität	Standardabweichung	Elastizität	Standardabweichung
Vorleistungen	-0,1845	0,0622	-0,1228	0,0417
Arbeit	0,0000	0,0000	-0,0371	0,0132
Anlagevermögen	-0,0013	0,0005	-0,0021	0,0010
Fläche	-0,7200	0,0590	-0,3014	0,0336

Quelle: eigene Berechnungen

schinen extern beziehen, sind ineffizienter. Gründe hierfür können z. B. zunehmende Terminkosten durch Verzögerungen beim Bezug von Dienstleistungen sein und/oder mangelnde Einarbeitung und Erfahrung im Umgang mit gemieteten Maschinen. Für den Faktor der Mechanisierung besteht kein signifikanter Einfluss auf die Ineffizienz.

Für  $D^E$  führt ein vermehrter Einsatz von Vorleistungen zu einer höheren Ineffizienz. Folglich ist naheliegend, dass die Beobachtungen die optimale Intensität an Vorleistungen bereits überschritten haben (vgl. TIEDEMANN und LATA CZ-LOHMANN, 2013). Im Falle des Inputs Arbeit widersprechen sich die Ergebnisse von  $D^O$  und  $D^E$ . Für  $D^O$  wirkt ein steigender Arbeitseinsatz positiv auf die Effizienz, für  $D^E$  negativ. Ein Erklärungsansatz ist, dass ein zunehmender Einsatz von Arbeit die Auswirkungen eines Ausfalls einer Arbeitskraft abschwächt. Andererseits führt ein zunehmender Einsatz von Arbeitskräften zu einer Zunahme von Fremd- bzw. Saisonarbeitskräften, welche geringer qualifiziert und motiviert sein können als Familienarbeitskräfte. Bei  $D^O$  steigert ein höherer Einsatz an Anlagevermögen die Effizienz. Eine Ursache hierfür ist, dass die Betriebe noch nicht ausreichend kapitalintensiv wirtschaften. Des Weiteren ist in  $D^E$  ein zunehmender Einsatz an Fläche effizienzsteigernd. Ein Erklärungsansatz hierfür ist, dass eine hohe Spezialisierung der Produktion und ein damit einhergehender Gewinn an Effizienz größeren Betrieben vorbehalten ist.

Bei  $D^E$  wirkt ein zunehmender Einsatz an Vorleistungen risikomindernd. So ist denkbar, dass durch einen zunehmenden Einsatz von Dünger und Pflanzenschutzmitteln oder die Verwendung von höherwertigem Saatgut die Variabilität der Produktion sinkt (vgl. TIEDEMANN und LATA CZ-LOHMANN, 2013). Für den Input Arbeit sind die Ergebnisse von  $D^O$  und  $D^E$  erneut konträr: Für  $D^O$  steigert ein zunehmender Einsatz an Arbeit die Variabilität der Produktion, für  $D^E$  sinkt die Variabilität der Produktion mit zunehmen-

dem Einsatz von Arbeit. Anhand dieses Ergebnisses wird der Zusammenhang zwischen Effizienz und Risiko exemplarisch für alle Inputs verdeutlicht: Mit dem erhöhten Einsatz an Arbeit (und an Vorleistungen für  $D^E$ ) geht eine höhere Effizienz der Betriebe mit einer höheren Risikoexposition der Betriebe einher bzw. im Falle eines verringerten Einsatzes an Arbeit geht eine niedrigere Effizienz mit einer geringeren Risikoexposition einher (vgl. TIEDEMANN et al., 2011). Als Grund für die risikosteigernde Wirkung eines höheren Arbeitseinsatzes kommt der damit verbundene Einsatz von Saisonarbeitskräften oder von ungelerten Arbeitskräften in Betracht. Dem hingegen ist möglich, dass ein höherer Arbeitseinsatz durch die Brechung von Arbeitsspitzen eine risikoreduzierende Wirkung besitzt (GARDEBROEK et al., 2010). Für  $D^E$  ist mit einem zunehmenden Einsatz an Fläche eine Zunahme des Risikos der Produktion festzustellen. TIEDEMANN und LATA CZ-LOHMANN (2013) führen hierzu aus, dass größeren Betrieben die Erledigung von an enge Zeitfenster gekoppelte Arbeiten nicht immer termingerecht gelingt. Auch hier gilt der zuvor beschriebene Zusammenhang zwischen Effizienz und Risiko.

Durch Behebung von Ineffizienzen können im Falle von  $D^O$  ceteris paribus die Betriebe im Mittel den Output um rund 13,2 % (1/0,8837) steigern (Tabelle 6). Das Intervall der Effizienzwerte reicht von 58,5 % bis 98,4 %. Es ist davon auszugehen, dass die Effizienzwerte mit der Berücksichtigung von Umweltwirkungen (THG-Emissionen) niedriger sind als ohne (vgl. REINHARD et al., 2000). In einer vergleichenden Einordnung reiht sich der auf Basis von  $D^O$  ermittelte Effizienzwert zwischen den von TIEDEMANN und LATA CZ-LOHMANN (2013) und ZHU und OUDE LANSINK (2010) festgestellten Effizienzwerten von 93,5 % bzw. 64,4 % ein. Anhand von  $D^E$  ergibt sich ein durchschnittliches Einsparpotential an Inputs und an THG-Emissionen von 4,4 % bei einem gleichzeitig möglichem Steigerungspotential des Outputs in

**Tabelle 6. Effizienz der Betriebe und Schattenpreis der THG-Emissionen**

	€/dt GE	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
$D^O$ : Effizienz	-	88,37 %	6,78 %	58,51 %	98,38 %
$D^O$ : Schattenpreise [€/t CO <sub>2</sub> e]	10,00	3,56	1,94	0,00	13,36
	15,00	5,34	2,91	0,00	20,04
	20,00	7,12	3,88	0,00	26,72
$D^E$ : Effizienz	-	95,58 %	3,46 %	77,21 %	99,72 %
$D^E$ : Schattenpreise [€/t CO <sub>2</sub> e]	10,00	1,71	0,97	0,00	6,42
	15,00	2,56	1,45	0,00	9,62
	20,00	3,41	1,93	0,00	12,83

Quelle: eigene Berechnungen

Höhe von 4,6 %. Das Einsparpotential ist im Hinblick auf die relativen THG-Emissionen dennoch nicht unbedeutend. Diese betragen im Status Quo im Mittel rund 18,2 kg CO<sub>2</sub>e/dt GE und würden im Falle einer effizienten Produktion bei  $D^O$  und  $D^E$  auf rund 16,1 kg CO<sub>2</sub>e/dt GE bzw. 16,7 kg CO<sub>2</sub>e/dt GE oder jeweils um 11,6 % bzw. 8,6 % zurückgehen. Die Unterschiede der Effizienzwerte zwischen  $D^O$  und  $D^E$  liegen in der Tatsache begründet, dass  $D^E$  einen direkteren Weg zur Frontier ermöglicht und die Ineffizienz nicht nur durch eine Verbesserung in der erwünschten Outputdimension getilgt werden muss. Insgesamt befinden sich die untersuchten Betriebe auf einem relativ hohen Niveau der Effizienz. Möglicher Grund hierfür ist das relativ homogene Sample im Hinblick auf Größe und Spezialisierung. Darüber hinaus sind diese Betriebe über Beratungsorganisationen eng vernetzt, was einen gewissen Austausch von Wissen und Informationen erwarten lässt. MACLEOD et al. (2010) ermitteln bei geringeren Kosten als 100 £/t CO<sub>2</sub>e ein Einsparpotential von 11,5 % der THG-Emissionen der Landwirtschaft in Großbritannien durch Maßnahmen im Pflanzenbau und in der Landnutzung. Ein Einsparpotential von 8,3 % für die Landwirtschaft in Deutschland ermitteln DE CARA und JAYET (2011). Dennoch sind die hier gefundenen Einsparpotentiale für Marktfruchtbetriebe im Vergleich zu anderen Spezialisierungen in der Landwirtschaft relativ gering. So eruierten BEUKES et al. (2010) Einsparpotentiale an THG-Emissionen von 27 % bis 32 % für Milchviehbetriebe in Neuseeland.

Bei der Berechnung der Schattenpreise der THG-Emissionen erfolgt eine Parametrisierung der Preise für GE von 10 bis 20 €/dt GE und die Schattenpreise sind auf eine Tonne CO<sub>2</sub>e skaliert. Der Schattenpreis liegt für  $D^O$  im Mittel zwischen 3,56 und 7,12 €/t CO<sub>2</sub>e und für  $D^E$  im Durchschnitt zwischen 1,71 und

3,41 €/t CO<sub>2</sub>e. Die Ergebnisse gelten für effiziente Betriebe bzw. Projektionen ineffizienter Betriebe auf die Frontier. Die Höhe der Preise für CO<sub>2</sub>-Zertifikate im europäischen Emissionshandelssystem sind mit den hier eruierten Schattenpreisen vergleichbar, was eine gewisse, wenn auch nur hypothetische, Wettbewerbsfähigkeit des Samples anzeigt (EEX, 2015). Einige Beobachtungen können anfangs ohne Einschränkung des erwünschten Outputs marginal THG-Emissionen verringern, wie die Minima der Schattenpreise zeigen. DE CARA und JAYET (2011) kalkulieren Kosten von 32 bis 42 €/t CO<sub>2</sub>e bezüglich eines 10%-Reduktionsziels der Landwirtschaft in der EU. Die Vermeidungskosten in der Studie von DE CARA und JAYET (2011) betragen 80,6 €/t CO<sub>2</sub> für eine Reduktion von 8,3 % der durch die Landwirtschaft in Deutschland verursachten THG-Emissionen. VERMONT und DE CARA (2010) ermitteln in ihrer Meta-Studie, in der lediglich Methan und Lachgas als THG-Emissionen berücksichtigt werden, mittlere Kosten von 69,62 €/t CO<sub>2</sub>e. Hierbei werden im Mittel 11 % der Emissionen eingespart. Der Vergleich mit der Literatur zeigt, dass die hier eruierten Schattenpreise der THG-Emissionen in vorliegender Studie geringer sind als die Vermeidungskosten in den zitierten Studien. Grund hierfür ist, dass in vorliegendem Papier eine marginale Einsparung betrachtet wird und kein konkretes Einsparziel, wie z. B. in DE CARA und JAYET (2011).

Die Distanzfunktionen unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich ihres Effizienzwertes, sondern auch in ihrer Umsetzung hin zu einer effizienten Produktion. Die Funktion  $D^O$  als „ersten Weg“ zu einer effizienten Produktion führt zu einer Senkung der relativen THG-Emissionen, erreicht jedoch das Ziel einer absoluten Reduktion nicht. Die Funktion  $D^E$  als „zweiten Weg“ projiziert eine effiziente Produktion, bei der zur Til-

**Tabelle 7. Schattenpreise im Zeitablauf ( $p^{GE}=15\text{€}$ )**

Distanzfunktion	02/03	03/04	04/05	05/06	06/07	07/08	08/09	09/10
$D^O$ [€/t CO <sub>2e</sub> ]	3,83	5,74	5,33	5,28	4,55	6,01	6,56	5,40
Standardabweichung	2,36	3,24	2,76	2,61	2,55	3,26	3,05	2,49
$D^E$ [€/t CO <sub>2e</sub> ]	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 Berechnung

gung von Ineffizienz sowohl der Output erhöht als auch die Inputs und THG-Emissionen absolut reduziert werden. Jedoch können hierbei die produktbezogenen Emissionen in nur geringerem Umfang als bei  $D^O$  reduziert werden. Beide Varianten sind effizient. Unter Berücksichtigung der zeitlichen Dimension liegt die Vermutung nahe, dass die Betriebe zur Eliminierung der Ineffizienz eher letzteren Weg einschlagen würden. Ferner ist dieser Weg auch insofern der günstigere, da der Schattenpreis für THG-Emissionen lediglich die Hälfte dessen beträgt, als wenn nur der Output angepasst werden würde. Dieser Fall verdeutlicht, dass die Wahl der Distanzfunktion erheblichen Einfluss auf die Effizienzwerte und aus den Distanzfunktionen abgeleitete Ergebnisse haben kann. Bei der Anwendung eines Modelldesigns, wie z. B. in CHAMBERS et al. (2013) oder in BOSTIAN et al. (2015), wären allein auf Grund unterschiedlicher Annahmen über die Distanzfunktion bzw. einer unterschiedlichen Einbettung abweichende Ergebnissen zu erwarten.

Tabelle 7 stellt den Verlauf der Schattenpreise für  $D^O$  und  $D^E$  im Zeitablauf unter Annahme eines Preises für GE von 15 €/dt dar. Wie Tabelle 7 und ein t-Test der jährlichen Preisdifferenzen zeigen,<sup>7</sup> nehmen die Schattenpreise im Zeitablauf in der Tendenz zu. 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.

### 5.3 Veränderungen der totalen Faktorproduktivität

Wie Tabelle 8 zeigt, beträgt die mittlere jährliche Steigerung der TFPC 1,3 % ( $D^O$ ) bzw. 0,6 % ( $D^E$ ). Hauptsächlicher Treiber hierfür ist technischer Fort-

schrift, der mit 1,6 % p. a. bei  $D^O$  bzw. 0,7 % p. a. bei  $D^E$  nicht nur den größten Teil zur jährlichen Produktivitätsentwicklung beiträgt, sondern auch über alle Jahre hinweg positiv ist. Wie die Interaktionsterme der Inputs Vorleistungen und Fläche mit der Zeit in Tabelle 4 zeigen, ist der beobachtete technische Fortschritt tendenziell (10 % Signifikanzniveau) vorleistungssparend sowie bei einem Signifikanzniveau von 5 % flächenintensiv. Effizienzverbesserungen relativ zur Frontier sind nur in marginalem Umfang für die mittleren Produktivitätsveränderungen relevant. Für  $D^O$  wird dadurch ein leichter Rückgang der Produktivität und für  $D^E$  eine unbedeutende Steigerung der Produktivität verursacht. Veränderungen der Skalengröße tragen zu einer negativen Entwicklung der Produktivität bei, bewegen sich mit -0,2 % p. a. für  $D^O$  und -0,1 % p. a. für  $D^E$  allerdings auf relativ geringem Niveau. Auffallend ist der Zusammenhang der TFPC mit dem Verlauf der Schattenpreise in Tabelle 7. Verbesserungen in der Produktivität führen auch zu einer Erhöhung der Schattenpreise. Hierbei spielt auch der tendenziell vorleistungssparende technische Fortschritt eine Rolle, der auf Grund der Kalkulation der THG-Emissionen aus den Vorleistungen direkt emissionsparend wirkt.

Andere Studien Produktivitätsentwicklung von Marktfruchtbetrieben in Deutschland haben teilweise ähnliche Ergebnisse. So ermitteln ZHU und OUDE LANSINK (2010) für die Periode 1994-2004 einen jährlichen Wert für technischen Fortschritt in Höhe von 1,6 %, der entsprechende Wert für Effizienzveränderungen liegt bei 0,1 %. Ferner stellen ZHU und OUDE LANSINK (2010) eine leicht negative Tendenz des Skalenertragsverhaltens der Betriebe fest. TIEDEMANN und LATA CZ-LOHMANN (2011) eruieren für konventionelle Marktfruchtbetriebe ein jährliches Wachstum der Produktivität in Höhe von 0,5 % im Zeitraum 1999/2000 bis 2006/07. Hierbei beträgt die jährliche Veränderung der Effizienz 0,3 % sowie der jährliche technische Fortschritt -0,04 %. Wie der Vergleich zu TIEDEMANN und LATA CZ-LOHMANN (2011) zeigt, sind die Wachstumsraten des technischen Fort-

<sup>7</sup> Der Mittelwert der Differenzen der Schattenpreise  $(p_{t+1,n}^{THG} - p_{t,n}^{THG}) \forall t = 1, \dots, T-1, n$  ist nach einem einseitigen t-Test für  $D^O$  auf 1 % Signifikanzniveau und für  $D^E$  auf 10 % Signifikanzniveau positiv.

**Tabelle 8. Veränderungen der totalen Faktorproduktivität**

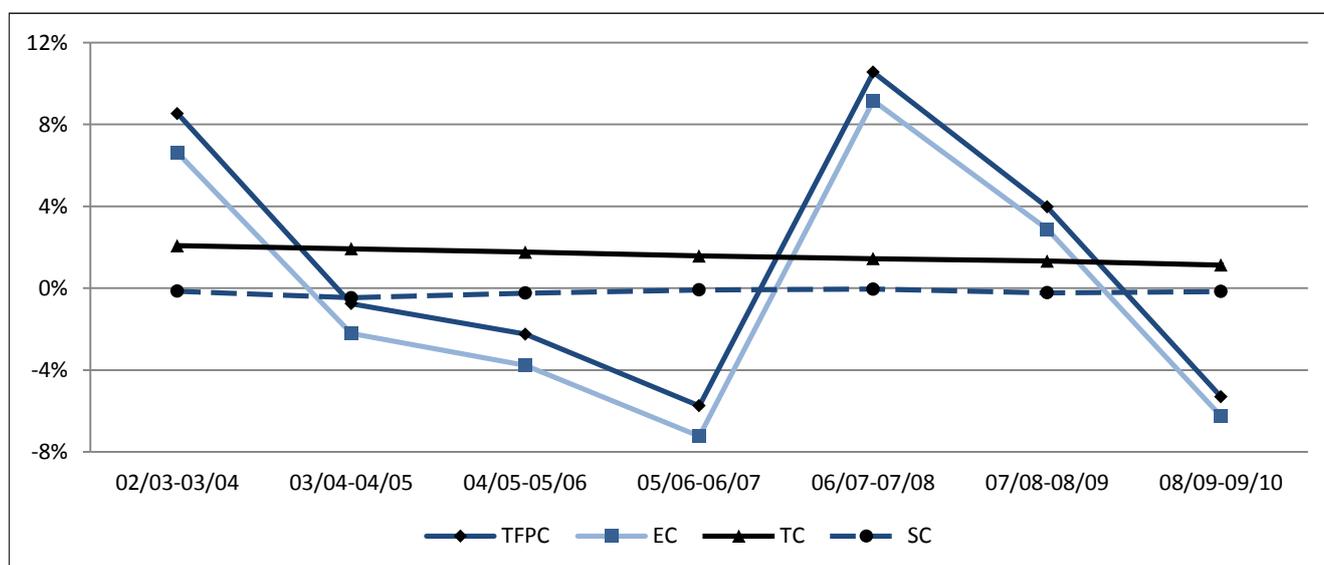
	02/03-03/04	03/04-04/05	04/05-05/06	05/06-06/07	06/07-07/08	07/08-08/09	08/09-09/10	Total 02/03-09/10	Mittleres Wachstum p. a.
$D^O$									
TFPC	8,53 %	-0,76 %	-2,25 %	-5,75 %	10,55 %	3,97 %	-5,31 %	8,97 %	1,28 %
EC	6,61 %	-2,21 %	-3,77 %	-7,23 %	9,16 %	2,88 %	-6,27 %	-0,83 %	-0,12 %
TC	2,07 %	1,92 %	1,76 %	1,57 %	1,44 %	1,32 %	1,13 %	11,21 %	1,60 %
SC	-0,15 %	-0,47 %	-0,25 %	-0,09 %	-0,05 %	-0,23 %	-0,17 %	-1,40 %	-0,20 %
$D^E$									
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 Berechnung

schritts im hier untersuchten Sample höher. So ist es plausibel, dass die im Mittel größeren Betriebe vorliegender Studie eher die Möglichkeit aufweisen, Innovationen anzuschaffen und rentabel in ihrem Betrieb einzusetzen bzw. diese überhaupt zu finanzieren. In Bezug auf Effizienzverbesserungen weisen vorliegende Ergebnisse geringere Raten als die zum Vergleich herangezogenen Studien auf. Da der Grenzaufwand zur Verbesserung der Effizienz steigt, kann das relativ hohe Niveau an Effizienz der hier untersuchten Betriebe das Aufholen der als ineffizient geltenden Betriebe erschweren. So liegt es nahe, dass eine Effizienzverbesserung nicht nur durch eine alleinige Verbesserung von Produktionsprozessen erzielt wird, sondern vielmehr durch Änderungen von Faktoren wie Mitarbeitermotivation und Betriebsleiterpersön-

lichkeit sowie unter einer Inkaufnahme einer höheren Risikoexposition (vgl. Kapitel 5.2).

Die Illustration der jährlichen Raten des TFPC und deren Komponenten erfolgt exemplarisch für beide Distanzfunktionen anhand von  $D^O$ . In Abbildung 1 ist deutlich zu sehen, dass der Index EC für die Volatilität der TFPC hauptverantwortlich ist. Trotz der relativ engen geografischen Eingrenzung des Samples und der Berücksichtigung von stochastischen Einflüssen ist es möglich, dass durch unterschiedliche Umweltbedingungen (z. B. Aussaatbedingungen, phytosanitärer Infektionsdruck, etc.) einzelne Betriebe in einzelnen Jahren besonders viel an Effizienz aufholen können bzw. besonders stark zurückgeworfen werden. Ferner führt beispielsweise der Kostenvorteil einer günstigeren Stickstoffdüngung (Harnstoff vs. Kalk-

**Abbildung 1. Totale Faktorproduktivität und deren Komponenten im Zeitablauf ( $D^O$ )**

Quelle: eigene Darstellung

ammonsalpeter) 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. Ferner zu erkennen ist eine abnehmende Rate des technischen Fortschritts. Die von LIN und HUYBERS (2012) konstatierte Stagnation der Ertragsentwicklung spiegelt sich auch hier wider, wenngleich dies die abnehmende Rate des technischen Fortschritts nicht vollständig erklärt. Da der erwünschte Output als technische Produktion berücksichtigt wird, kann die Abnahme des technischen Fortschritts jedoch höher ausfallen, als wenn Umweltdienstleistungen der Landwirtschaft als Output berücksichtigt wären. Schließlich ist in Abbildung 1 der Index SC zu sehen, der nur geringfügig schwankt, jedoch konsequent im negativen Wertebereich ist.

## 6 Schlussbetrachtung

Vorliegender Beitrag eruierte die Umwelteffizienz und die Produktivitätsentwicklung von 141 norddeutschen Marktfruchtbetrieben unter Berücksichtigung von THG-Emissionen als unerwünschten Output für den Zeitraum der Wirtschaftsjahre 2002/03 bis 2009/10. Mittels zweier Distanzfunktionen wurden Effizienzwerte ermittelt um Einsparpotentiale in THG-Emissionen, Steigerungspotentiale im Output und Reduktionspotentiale in den Inputs zu eruieren. Exogene Faktoren und die Höhe der Inputeinsatzmenge wurden auf ihren Einfluss auf die Umwelteffizienz geprüft. Schließlich wurden Schattenpreise der THG-Emissionen abgeleitet sowie die TFPC dargestellt und deren Treiber quantifiziert.

Als Ergebnis ist festzuhalten, dass sich die Betriebe im Mittel des Beobachtungszeitraums auf einem relativ hohen Niveau der Effizienz befinden, für  $D^O$  rund 88,4 % und für  $D^E$  rund 95,6 %. Somit können durch Behebung von Ineffizienzen die auf den Output bezogenen THG-Emissionen um 11,6 % bzw. 8,6 % reduziert werden. Diese Einsparpotentiale können durch eine Ausdehnung der Produktion (13,2 % bzw. 4,6 %) und, für  $D^E$ , zusätzlich bei einer Reduktion der Inputs (4,4 %) genutzt werden. Dabei fallen keine expliziten Vermeidungskosten an.<sup>8</sup> Im Hinblick auf (politische) Handlungsmöglichkeiten ist festzustellen, dass die festgestellten Einsparpotentiale von THG-Emissionen im Vergleich mit der Literatur als eher

gering einzustufen sind. Ein steigender Anbauanteil an Getreide und Zuckerrüben wie auch Standorte mit höherer Anzahl an Bodenpunkten steigern die Effizienz signifikant. Im Gegensatz dazu wirken ein steigender Anteil an ausgelagerten Arbeiten und ein steigender Anteil an organischem Dünger an der Gesamtdüngermenge auf die Effizienz negativ. Der Einfluss exogener Faktoren zeigt, dass über die Gestaltung von Fruchtfolgen und insbesondere der Verwendung von organischem Dünger ein deutlicher Einfluss auf die Effizienz ausgeübt wird. Hier sind Ansatzpunkte für Handlungsmöglichkeiten zu einer Verbesserung der Umwelteffizienz. Für  $D^E$  sinkt mit zunehmendem Einsatz von Vorleistungen die Effizienz der Betriebe, es wird dabei jedoch die Variabilität der Produktion gesenkt. Mit zunehmendem Einsatz von Fläche steigt hingegen die Effizienz bei  $D^E$ , wofür ein höheres Risiko in Kauf genommen werden muss. Ein zunehmender Einsatz an Anlagevermögen steigert die Effizienz bei  $D^O$ . Die Schattenpreise für THG-Emissionen befinden sich für  $D^O$  zwischen durchschnittlich 3,56 und 7,12 €/t CO<sub>2</sub>e sowie für  $D^E$  zwischen 1,71 und 3,41 €/t CO<sub>2</sub>e. Ferner ist eine steigende Tendenz der Schattenpreise im Beobachtungszeitraum festzustellen. Die hier eruierten Schattenpreise befinden sich auf relativ geringem Niveau, spiegeln allerdings auch eine erste marginale Einsparung wieder und nicht durchschnittliche Vermeidungskosten für ein bestimmtes Reduktionsziel. Für weitergehende Einsparziele ist mit einem ansteigenden Verlauf der Vermeidungskosten zu rechnen. Die Produktivität der Betriebe steigert sich im gesamten Beobachtungszeitraum um durchschnittlich rund 9,0 % ( $D^O$ ) bzw. 4,4 % ( $D^E$ ). Maßgeblicher Treiber der Entwicklung ist technischer Fortschritt, wenn auch mit abnehmenden jährlichen Wachstumsraten. Einen nur marginal negativen ( $D^O$ ) bzw. positiven ( $D^E$ ) Beitrag zur Produktivitätsentwicklung im Beobachtungszeitraum leisten Änderungen der Effizienz. Veränderungen der Skalengröße beeinflussen die Produktivitätsentwicklung leicht negativ.

Es bietet sich für weitere Studien an, die Ausgestaltung der z. B. von MACLEOD et al. (2010) oder BRINER et al. (2012) vorgeschlagenen Maßnahmen zur Vermeidung von THG-Emissionen in Bezug auf vorliegende Ergebnisse zu prüfen. Ferner ist für die Ausgestaltung konkreter Maßnahmen von Interesse, in welchem Umfang Einsparpotentiale auch in anderen Betriebsspezialisierungen und -größen vorhanden sind und wie dabei der Einfluss der hier untersuchten und weiterer exogener Variablen ist. Der Verlauf der Kosten für eine Einsparung von THG-Emissionen über

<sup>8</sup> Ausgenommen hiervon sind Transaktionskosten.

Effizienzverbesserungen hinaus kann durch die Ermittlung der Grenzvermeidungskosten anhand geschätzter Transformationskurven eruiert werden. Modelldesigns, wie in BOSTIAN et al. (2015), könnten eingesetzt werden, um Schattenpreise in Abhängigkeit einer möglichen Besteuerung von THG-Emissionen zu eruiieren. Außerdem interessant für weitere Fragestellungen ist, inwieweit sich die Umsetzung relativ hoher Raten des Index TC und dem Wirtschaften unter abnehmenden Skalenerträgen gegenseitig bedingen.

## Literatur

- AIGNER, D., C.A.K. LOVELL and P. SCHMIDT (1977): Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. In: *Journal of Econometrics* 6 (1): 21-37.
- BALL, V., C.A.K. LOVELL, R. NEHRING and A. SOMWARU (1994): Incorporating Undesirable Outputs into Models of Production: An Application to U.S. Agriculture. In: *Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales* 31 (1): 59-73.
- BATTESE, G.E. and T.J. COELLI (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., S. DAIDONE, G. ILARDI and V. ATELLA (2013): Stochastic frontier analysis using Stata. In: *The Stata Journal* 13 (4): 719-758.
- BEUKES, P., P. GREGORINI, A. ROMERA, G. LEVY and G. WAGHORN (2010): Improving production efficiency as a strategy to mitigate greenhouse gas emissions on pastoral dairy farms in New Zealand. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 136 (3-4): 358-365.
- BLANCARD, S. and E. MARTIN (2014): Energy efficiency measurement in agriculture with imprecise energy content information. In: *Energy Policy* 66: 198-208.
- BMEL (2016): Christian Schmidt: "Pariser Abkommen unterstreicht wichtige Rolle der Landwirtschaft für Klimaschutz". Pressemitteilung, Nr. 58 vom 22.04.16. In: <http://www.bmel.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/2016/058-PariserAbkommen.html>. Abruf: 17.05.2016.
- BMELV (2009): Bericht des BMELV für einen aktiven Klimaschutz der Agrar-, Forst- und Ernährungswirtschaft und zur Anpassung der Agrar- und Forstwirtschaft an den Klimawandel. In: <http://www.bmelv.de/cae/servlet/contentblob/383152/publicationFile/22425/KliKlimaschutzberi2008.pdf>. Abruf: 03.09.2014.
- (2010): Die wirtschaftliche Lage der landwirtschaftlichen Betriebe. Buchführungsergebnisse der Testbetriebe Wirtschaftsjahr 2009/10. In: <http://berichte.bmelv-statistik.de/BFB-0111001-2010.pdf>. Abruf: 10.09.2013.
- (2012): Durchschnittliche Einkaufspreise der Landwirtschaft für Futtermittel, Düngemittel und Energie. In: <http://berichte.bmelv-statistik.de/SJT-5020200-0000.pdf>. Abruf: 02.08.2013.
- BOSTIAN, M., G. WHITTAKER, B. BARNHART, R. FÄRE and S. GROSSKOPF (2015): Valuing water quality tradeoffs at different spatial scales: An integrated approach using bi-level optimization. In: *Water Resource and Economics* 11 (1): 1-12.
- BREUSTEDT, G., U. LATA CZ-LOHMANN und T. TIEDEMANN (2011): Organic or conventional? Optimal dairy farming technology under the EU milk quota system and organic subsidies. In: *Food Policy* 36 (2): 223-229.
- BRINER, S., M. HARTMANN, R. FINGER and B. LEHMANN (2012): Greenhouse gas mitigation and offset options for suckler cow farms: an economic comparison for the Swiss case. In: *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 17 (4): 337-355.
- CAVES, D.W., L.R. CHRSTENSEN and W.R. DIEWERT (1982): The Economic Theory of Index Numbers and the Measurement of Input, Output, and Productivity. In: *Econometrica* 50 (6): 1393-1414.
- CHAMBERS, R.G., T. SERRA and A. OUDE LANSINK (2014): On the pricing of undesirable state-contingent outputs. In: *European Review of Agricultural Economics* 41 (1): 1-25.
- CHAVAS, J.-P. and S. DI FALCO (2012): On the Productive Value of Crop Biodiversity: Evidence from the Highlands of Ethiopia. In: *Land Economics* 88 (1): 58-74.
- CHRISTENSEN, L.R., D.W. JORGENSON and L.J. LAU (1973): Transcendental Logarithmic Production Frontiers. In: *The Review of Economics and Statistics* 55 (1): 28-45.
- CHUNG, Y., R. FÄRE and S. GROSSKOPF (1997): Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach. In: *Journal of Environmental Management* 51 (3): 229-240.
- COELLI, T., L. LAUWERS and G. VAN HUYLENBROECK (2007): Environmental efficiency measurement and the materials balance condition. In: *Journal of Productivity Analysis* 28 (1-2): 3-12.
- COELLI, T. and S. PERELMAN (2000): Technical efficiency of European railways: a distance function approach. In: *Applied Economics* 32 (15): 1967-1976.
- COELLI, T.J. (2000): On the econometric estimation of the distance function representation of a production technology. CORE Discussion Papers, 200/42. In: <http://hdl.handle.net/2078.1/4131>. Abruf: 17.05.2016.
- COELLI, T.J., D.S. RAO and G.E. BATTESE (2005): An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis. 2<sup>nd</sup> edition. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- COGGINS, J.S. and J.R. SWINTON (1996): The Price of Pollution: A Dual Approach to Valuing SO<sub>2</sub> Allowances. In: *Journal of Environmental Economics and Management* 30 (1): 58-72.
- CUESTA, R.A., C.K. LOVELL and J.L. ZOFÍO (2009): Environmental efficiency measurement with translog distance functions: A parametric approach. In: *Ecological Economics* 68 (8-9): 2232-2242.
- CUESTA, R.A. and J.L. ZOFÍO (2005): Hyperbolic Efficiency and Parametric Distance Functions: With Application to Spanish Savings Banks. In: *Journal of Productivity Analysis* 24 (1): 31-48.
- DE CARA, S. and P.-A. JAYET (2011): Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions from European agriculture, cost effectiveness, and the EU non-ETS burden sharing agreement. In: *Ecological Economics* 70 (9): 1680-1690.

- EEX (European Energy Exchange) (2015): European Emission Allowances. In: <https://www.eex.com/en/market-data/emission-allowances/spot-market/european-emission-allowances#/2015/08/10>. Abruf: 10.08.2015.
- EUROSTAT (2012): Database. In: <http://http:epp.eu-rostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/agriculture/data/database>. Abruf: 12.07.2013.
- FÄRE, R., S. GROSSKOPF, C.A.K. LOVELL and C. PASURKA (1989): Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable. A nonparametric approach. In: *The Review of Economics and Statistics* 71 (1): 90-98.
- FÄRE, R., S. GROSSKOPF, C.A.K. LOVELL and S. YAISA WARNG (1993): Derivation of Shadow Prices for Undesirable Outputs: A Distance Function Approach. In: *The Review of Economics and Statistics* 75 (2): 374-380.
- FÄRE, R., S. GROSSKOPF, D.-W. NOH and W. WEBER (2005): Characteristics of a polluting technology: theory and practice. In: *Journal of Econometrics* 126 (2): 469-492.
- FÄRE, R., S. GROSSKOPF and C. PASURKAJR (2007): Environmental production functions and environmental directional distance functions. In: *Energy* 32 (7): 1055-1066.
- FÄRE, R., S. GROSSKOPF and O. ZAIM (2002): Hyperbolic efficiency and return to the dollar. In: *European Journal of Operational Research* 136 (3): 671-679.
- FÄRE, R., D. MARGARITIS, P. ROUSE and I. ROSHDI (2016): Estimating the hyperbolic distance function: A directional distance function approach. In: *European Journal of Operational Research* 254 (1): 312-319.
- FÄRE, R. and D. PRIMONT (1995): *Multi-Output Production and Duality: Theory and Applications*. Kluwer Academic Publishers, Boston/London/Dordrecht.
- GARDEBROEK, C., M.D. CHAVEZ and A.O. LANSINK (2010): Analysing Production Technology and Risk in Organic and Conventional Dutch Arable Farming using Panel Data. In: *Journal of Agricultural Economics* 61 (1): 60-75.
- GREENE, W.H. (2012): *Econometric analysis*. 7<sup>th</sup> edition. Prentice Hall, Boston.
- GUARDA, P., A. ROUABAH and M. VARDANYAN (2013): Identifying bank outputs and inputs with a directional technology distance function. In: *Journal of Productivity Analysis* 40 (2): 185-195.
- GUBLI, G. (2006): *Analyse der erfolgs- und effizienzbestimmenden Faktoren im ökologischen Landbau*. Dissertation. Christian-Albrechts-Universität Kiel.
- HENNINGSEN, A. (2012): micEcon: Microeconomic Analysis and Modelling. R package version 0.6-10. In: <http://CRAN.R-project.org/package=micEcon>.
- HENNINGSEN, A. and C.H.C.A. HENNING (2009): Imposing regional monotonicity on translog stochastic production frontiers with a simple three-step procedure. In: *Journal of Productivity Analysis* (3): 217-229.
- HETEMÄKI, L. (1996): Essays on the impact of pollution control on a firm. A distance function approach. *Helsingin Tutkimuskeskus (Finnish Forest Research Institute research papers)*, Helsinki: 609.
- HOANG, V.-N and T. COELLI (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. and D.S.P. RAO (2010): Measuring and decomposing sustainable efficiency in agricultural production: A cumulative exergy balance approach. In: *Ecological Economics* 69 (9): 1765-1776.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007): *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In: Metz, B., O.R Davidson, P.R Bosch, R. Dave and L.A Meyer (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- (1996): *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Reference Manual. Volume 3*. In: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6.html>. Abruf: 03.09.2014.
- KALTSCHMITT, M. und G. REINHARDT (1997): *Nachwachsende Energieträger. Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung*. Vieweg, Braunschweig.
- KUMBHAKAR, S.C. (2002): Specification and Estimation of Production Risk, Risk Preferences and Technical Efficiency. In: *American Journal of Agricultural Economics* 84 (1): 8-22.
- LK S-H (Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein) (2012): *Geschlossene Benutzergruppe Markt (GBG-Markt)*. Rendsburg.
- LAUWERS, L. (2009): Justifying the incorporation of the materials balance principle into frontier-based eco-efficiency models. In: *Ecological Economics* 68 (6): 1605-1614.
- LIN, M. and P. HUYBERS, P. (2012): Reckoning wheat yield trends. In: *Environmental Research Letters* 7 (2): 24016.
- LOVELL, C.A.K., P. TRAVERS, S. RICHARDSON and L. WOOD (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.
- MACLEOD, M., D. MORAN, D., V. EORY, R. REES, A. BARNES, C.F. TOPP, B. BALL, S. HOAD, E. WALL, A. MCVITTIE, G. PAJOT, R. MATTHEWS, P. SMITH and A. MOXEY (2010): Developing greenhouse gas marginal abatement cost curves for agricultural emissions from crops and soils in the UK. In: *Agricultural Systems* 103 (4): 198-209.
- MEEUSEN, W. and J. VAN DEN BROECK (1977): Efficiency Estimation from Cobb-Douglas Production Functions with Composed Error. In: *International Economic Review* 18 (2): 435-444.
- MORAN, D., M. MACLEOD, E. WALL, V. EORY, A. MCVITTIE, A. BARNES, R. REES, C.F.E. TOPP and A. MOXEY (2011): Marginal Abatement Cost Curves for UK Agricultural Greenhouse Gas Emissions. In: *Journal of Agricultural Economics* 62 (1): 93-118.
- OREA, L. (2002): Parametric Decomposition of a Generalized Malmquist Productivity Index. In: *Journal of Productivity Analysis* 18 (1): 5-22.
- R CORE TEAM (2012): *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. In: <http://www.R-project.org/>.

- REINHARD, S., C. LOVELL and G. THUISSEN (2000): Environmental efficiency with multiple environmentally detrimental variables; estimated with SFA and DEA. In: *European Journal of Operational Research* 121 (2): 287-303.
- SAUER, J. and U. LATACZ-LOHMANN (2015): Investment, technical change and efficiency: empirical evidence from German dairy production. In: *European Review of Agricultural Economics* 42 (1): 151-175.
- SAUER, J. and A. WOSSINK (2013): Marketed outputs and non-marketed ecosystem services: the evaluation of marginal costs. In: *European Review of Agricultural Economics* 40 (4): 573-603.
- SESMERO, J.P., R.K. PERRIN and L.E. FULGINITI (2012): Environmental efficiency among corn ethanol plants. In: *Biomass and Bioenergy* 46: 634-644.
- SHEPARD, R. (1970): *Theory of Cost and Production Functions*. Princeton University Press, Princeton.
- SHORTALL, O. and A. BARNES (2013): Greenhouse gas emissions and the technical efficiency of dairy farmers. In: *Ecological Indicators* 29: 478-488.
- SMITH, K.A. and B.J. CHAMBERS (1993): Utilizing the nitrogen content of organic manures on farms-problems and practical solutions. In: *Soil Use & Management* 9 (3): 105-111.
- SONG, M., Q. AN, W. ZHANG, Z. WANG and J. WU (2012): Environmental efficiency evaluation based on data envelopment analysis: A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (7): 4465-4469.
- STATA CORP LP (2011): *Stata 12.0, Statistics/Data Analysis*. College Station, TX, USA.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2012): *Genesis-Online Datenbank*. In: <https://www.destatis.de/EN/Homepage.html>. Abruf: 12.07.2013.
- TIEDEMANN, T., G. BREUSTEDT und U. LATACZ-LOHMANN (2011): Risikoberücksichtigung in der nicht parametrischen Effizienzanalyse: Auswirkungen auf die Effizienzbewertung von deutschen Schweinemastbetrieben. In: *German Journal of Agricultural Economics* 60 (4): 215-229.
- TIEDEMANN, T. und U. LATACZ-LOHMANN (2011): Empirische Analysen zur Produktivitätsentwicklung im ökologischen und konventionellen Landbau. In: *German Journal of Agricultural Economics* 60 (2): 101-118.
- (2013): Production Risk and Technical Efficiency in Organic and Conventional Agriculture - The Case of Arable Farms in Germany. In: *Journal of Agricultural Economics* 64 (1): 73-96.
- TURLACH, B.A. and A. WEINGESSEL (2013): quadprog: Functions to solve Quadratic Programming Problems. R package version 1.5-5. In: <http://CRAN.R-project.org/package=quadprog>.
- UN (United Nations) (2015): Paris Agreement. In: [http://unfccc.int/files/meetings/paris\\_nov\\_2015/application/pdf/paris\\_agreement\\_english\\_.pdf](http://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_english_.pdf). Abruf: 17.05.2015.
- VARDANYAN, M. and D.-W. NOH (2006): Approximating pollution abatement costs via alternative specifications of a multi-output production technology: A case of the US electric utility industry. In: *Journal of Environmental Management* 80 (2): 177-190.
- VERMONT, B. and S. DE CARA (2010): How costly is mitigation of non-CO2 greenhouse gas emissions from agriculture? In: *Ecological Economics* 69 (7): 1373-1386.
- WANG, H.-J. (2002): Heteroscedasticity and Non-Monotonic Efficiency Effects of a Stochastic Frontier Model. In: *Journal of Productivity Analysis* 18 (3): 241-253.
- WBAE und WBW (Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik, Ernährung und gesundheitlicher Verbraucherschutz und Wissenschaftlicher Beirat Waldpolitik beim BMEL) (2016): *Klimaschutz in der Land- und Forstwirtschaft sowie den nachgelagerten Bereichen Ernährung und Holzverwendung*. Gutachten. Berlin.
- WELCH, E. and D. BARNUM (2009): Joint environmental and cost efficiency analysis of electricity generation. In: *Ecological Economics* 68 (8-9): 2336-2343.
- ZHOU, P., B.W. ANG and K.L. POH (2008): A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies. In: *European Journal of Operational Research* 189 (1): 1-18.
- ZHU, X. and A. OUDE LANSINK (2010): Impact of CAP Subsidies on Technical Efficiency of Crop Farms in Germany, the Netherlands and Sweden. In: *Journal of Agricultural Economics* 61 (3): 545-564.

## Danksagung

Der Autor bedankt sich bei der GrossBetriebsberatung und der Landwirtschaftlichen Unternehmensberatung Schleswig-Holstein für die Bereitstellung der Daten. Weiterer Dank gilt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die finanzielle Unterstützung.

Autor:

**DR. PATRICK J.C. WETTEMANN**

Institut für Agrarökonomie

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Olshausenstr. 40, 24118 Kiel

E-Mail: [pwettem@ae.uni-kiel.de](mailto:pwettem@ae.uni-kiel.de)