

Data Envelopment Analysis und Messung der Ökoeffizienz

Mikuláš Luptáčík

Institut für Volkswirtschaftstheorie und –politik
Abteilung für Quantitative Volkswirtschaftslehre
Wirtschaftsuniversität Wien
Augasse 2-6
A-1090 Wien
mikulas.luptacik@wu-wien.ac.at

Abstract: Das Konzept der Ökoeffizienz ist eines der meist diskutierten Themen der Gegenwart. Die ständigen Forderungen nach Effizienz- und Ökoeffizienzsteigerungen führen zu der Frage der Effizienzmessung. Diese Frage stellt sich vor allem dann, wenn die betrachtete Organisationseinheit Güter oder Dienstleistungen produziert, für die es keine monetäre Bewertung, wie die Marktpreise, gibt. Data Envelopment Analysis (DEA) bietet sich für solche Situationen an. Für die Messung der Ökoeffizienz muss das Grundmodell der DEA allerdings um eine dritte Gruppe von Faktoren, Emissionen (oder unerwünschte Outputs), erweitert werden. Eine solche Weiterentwicklung des DEA Modells wird in diesem Beitrag vorgestellt und seine Anwendung anhand der OECD Daten für 28 Länder illustriert.

1 Einleitung

Fragen der Effizienzmessung haben vor allem in den letzten zwei Jahrzehnten ständig an Interesse und Bedeutung gewonnen. In der tagesaktuellen Presse findet man eine Vielzahl von Artikeln, in denen eine „Steigerung der Effizienz“ von Organisationseinheiten gefordert wird bzw. verschiedene Entscheidungseinheiten bezüglich ihrer Effizienz verglichen und unzählige „rankings“ erstellt werden. Steigender Wettbewerbsdruck und immer knapper werdende öffentliche Budgetmittel zwingen sowohl private Unternehmen als auch öffentliche Einrichtungen und Non-Profit-Organisationen zur ständigen Suche nach Effizienzsteigerungspotentialen. Liest man diese Artikel weiter, so lassen sich meistens nur vage bzw. pauschale Hinweise finden, was unter einer „Effizienzsteigerung“ zu verstehen und wie diese quantitativ zu bewerten ist.

Diese Frage stellt sich vor allem dann, wenn die betrachtete Organisation Güter oder Dienstleistungen hervorbringt, für die es keine monetären Bewertungen, wie die Marktpreise, gibt, sodass eine Aggregation auf eine Outputgröße nicht möglich ist. Gerade mit so einer Situation ist man in der aktuellen Diskussion über das Konzept der „Ökoeffizienz“ konfrontiert. „Es gibt kein trade-off zwischen Ökonomie und Ökologie. Es müsse einen gemeinsamen Nenner geben, den der Schweizer Industrielle Stephan Schmidheiny als „Ökoeffizienz bezeichnet“ (Der Standard, 4. Juli 1997, S. 27).

Der österreichische Umweltminister Molterer sagte für die Zeitung Der Standard (3. Jänner 2001, S. 8): „Wir müssen bei der Nachhaltigkeit immer die ökologische, aber auch die soziale und ökonomische Dimension im Auge behalten. Das Ziel sei eine möglichst große Öko-Effizienz.“

Am 17. Mai 2003 berichtete Die Presse über ein Projekt der kanadischen Regierung, nach dem die bisherigen Wirtschaftsindikatoren wie BIP-Wachstum und Industrieproduktion künftig um sechs weitere Indikatoren ergänzt werden sollen: Zuwachs oder Abnahme der Waldfläche, Wasserqualität der Flüsse und Seen, die Luftqualität, beurteilt nach der Konzentration von bodennahem Ozon, den Ausstoß von Treibhausgasen, der Umfang von Feuchtgebieten und das Humankapital. Wie lassen sich Organisationseinheiten mit unterschiedlichen Indikatoren miteinander vergleichen? Lässt sich ein zusammenfassender Index der Performance konstruieren?

Mit dem Aufsatz aus dem Jahr 1978 haben Charnes-Cooper-Rhodes [CHCR78] die methodologischen Grundlagen der Data Envelopment Analysis (DEA) vorgelegt, die es möglich macht eine Effizienzmessung auch in den oben beschriebenen Situationen durchzuführen und Effizienzsteigerungspotentiale zu identifizieren. Seit diesem Aufsatz hat sich DEA wesentlich weiterentwickelt und hat Anwendungen in verschiedenen Bereichen, wie Krankenhausmanagement, Schulen, Universitäten, Banken, Landwirtschaft und andere Wirtschaftszweige gefunden. Charnes – Cooper – Rhodes (1978) beschreiben DEA als „mathematical programming model applied to observational data (that) provides a new way of obtaining empirical estimates of external relationship such as the production function and/or efficient production possibility surfaces that are a cornerstone of modern economics“ [ST90] S. 8. Zwischen den Jahren 1978 und 1995 listet Seiford [SI96] mehr als 600 DEA Artikel und Bouysson [Bd97] bezeichnet DEA „as one of the recent „success stories in operations research.“

Mit dem Aufsatz von Färe – Grosskopf – Lovell – Pasurka [Fr89] fand DEA den „Eingang auch in die Umweltökonomie. Der Suche nach Indikatoren der Ökoeffizienz “such that the goods and services can be produced with less energy and resources and with less waste and emissions“ [Lm00], S.37 wird intensiv nachgegangen. Siehe Färe – Grosskopf – Tyteca [FGT96], Tyteca [Td96], Tyteca [Td97], Dyckhoff – Allen [DA01], Sancho – Tadeo – Martinez [STM00], Korhonen – Luptacik [KL02] und andere. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist einen weiteren Beitrag in dieser Diskussion zu liefern. Sie ist wie folgt gegliedert.

Im zweiten Teil werden die Grundlagen von DEA und die für die Analyse der Ökoeffizienz notwendigen Erweiterungen dargelegt. Eine Anwendung des Modells anhand der OECD Daten für 28 Länder wird im dritten Abschnitt präsentiert. Mit einer Zusammenfassung und offenen Fragen schließt der Beitrag ab.

2 DEA Modell mit unerwünschten Outputs

Gegenüber dem Grundmodell der DEA von Charnes – Cooper – Rhodes [CHCR78] betrachten wir nun neben den erwünschten Outputs (mit dem Index $r=1, 2, \dots, k$) auch die bei der Herstellung dieser Güter emmitierten Schadstoffe als unerwünschte Outputs (mit dem Index $s=1, 2, \dots, p$). Jede Entscheidungseinheit (decision making unit, DMU) verwendet dabei m verschiedene Inputs ($i=1, 2, \dots, m$). Mit x_{ij} wird die Menge des i -ten Inputs, die die j -te DMU verbraucht hat, mit y_{rj}^g die Menge des r -ten erwünschten Outputs (good) und mit y_{sj}^b die Menge des s -ten unerwünschten Outputs (bad) der j -ten DMU bezeichnet. Es gibt mehrere Möglichkeiten, wie diese drei Gruppen von Faktoren in einem Modell erfasst werden. Siehe z.B. [Fr89], [Td97], [KL02]. In einer Variante gehen die unerwünschten Outputs mit negativen Vorzeichen ein, in anderen Varianten werden sie als Inputs betrachtet, weil weniger Schadstoffe ja besser sind. Korhonen – Luptáčík (KL02) können dennoch zeigen, dass unabhängig vom Modelltyp die Menge der ökoefizienten Einheiten gleich bleibt.

Nun wollen wir eine andere Variante des Modells einführen, in der man als Daten für die unerwünschten Outputs die reziproken Werte der Emissionen nimmt. Auf der Inputseite werden wir auch Inputs für die Entsorgungsaktivitäten berücksichtigen, da die unerwünschten Outputs sich nicht kostenlos beseitigen lassen.

Diese Betrachtung der unerwünschten Outputs führt zu einem Standardmodell der DEA:

$$\underset{\substack{n^1, u^g, y}}{\text{maximiere}} \quad h_0 = \frac{\sum_{r=1}^k y_{r0}^g u_r^g + \sum_{s=1}^p y_{s0}^b u_s^b}{\sum_{i=1}^m x_{i0} v_i} \quad (1.1)$$

$$\text{sodass} \quad \frac{\sum_{r=1}^k y_{rj}^g u_r^g + \sum_{s=1}^p y_{sj}^b u_s^b}{\sum_{i=1}^m x_{ij} v_i} \leq 1 \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} u_r^g &\geq 0 \quad (r=1, 2, \dots, k) \\ u_s^b &\geq 0 \quad (s=1, 2, \dots, p) \\ v_i &\geq 0 \quad (i=1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (1.3)$$

wobei u_r^g der gesuchte Multiplikator für den erwünschten Output r ($r=1, 2, \dots, k$) und u_s^b der Multiplikator für den unerwünschten Output s ($s=1, 2, \dots, p$) und v_i der gesuchte Inputmultiplikator ($i=1, 2, \dots, m$) ist.

Das Problem (1.1) – (1.3) ist ein Problem der nichtlinearen Optimierung, das sich jedoch durch folgende Transformation der Variablen [CHC62]

$$\begin{aligned}\mu_r^g &= t \cdot u_r^g \quad (r=1, 2, \dots, k) \\ \mu_s^b &= t \cdot u_s^b \quad (s=1, 2, \dots, p) \\ v_i &= t \cdot v_i \quad (i=1, 2, \dots, m) \\ t &= \frac{1}{\sum_{i=1}^m x_{i0} v_i}\end{aligned}$$

in ein lineares Optimierungsproblem überführen lässt:

$$\text{maximiere } w_0(\underline{\mu}^g, \underline{\mu}^b, \underline{v}) = \sum_{r=1}^k y_{r0}^g \mu_r^g + \sum_{s=1}^p y_{s0}^b \mu_s^b \quad (2.1)$$

$$\text{sodass } \sum_{r=1}^k y_{rj}^g \mu_r^g + \sum_{s=1}^p y_{sj}^b \mu_s^b - \sum_{i=1}^m x_j v_i \leq 0 \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (2.2)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{i0} v_i = 1 \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned}\mu_r^g &\geq \varepsilon \quad (r=1, 2, \dots, k) \\ \mu_s^b &\geq \varepsilon \quad (s=1, 2, \dots, p) \\ v_i &\geq \varepsilon \quad (i=1, 2, \dots, m).\end{aligned} \quad (2.4)$$

ε ist eine kleinere positive Zahl und die Bedingung (2.4) soll die Positivität der Gewichte gewährleisten [CHCR78, 79].

Das entsprechende duale Problem zum Problem (2.1) – (2.4) hat folgende Form:

$$\text{minimiere } g_0(\theta, \underline{s}^g, \underline{s}^b, \underline{s}^-) = \theta - \varepsilon \left(\sum_{r=1}^k s_r^g + \sum_{s=1}^p s_s^b + \sum_{i=1}^m s_i^- \right) \quad (3.1)$$

$$\text{sodass} \quad \theta \quad x_{i0} - \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j - s_i^- = 0 \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (3.2)$$

$$\sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j - s_r^g = y_{r0}^g \quad (r=1, 2, \dots, k) \quad (3.3)$$

$$\sum_{j=1}^n y_{sj}^b \lambda_j - s_s^b = y_{s0}^b \quad (s=1, 2, \dots, p) \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \lambda_j &\geq 0 \quad (j=1, 2, \dots, n) \\ s_r^g &\geq 0 \quad (r=1, 2, \dots, k) \\ s_s^b &\geq 0 \quad (s=1, 2, \dots, p) \\ s_i^- &\geq 0 \quad (i=1, 2, \dots, m). \end{aligned} \quad (3.5)$$

θ , $\underline{\lambda}$, $\underline{s}^g$, $\underline{s}^b$ und $\underline{s}^-$ sind die entsprechenden dualen Variablen. Das Problem (2.1) – (2.4) bzw. das entsprechende duale Problem (3.1) – (3.5) dient nun zur Messung der Ökoeffizienz der betrachteten Entscheidungseinheiten (DMUs). Eine EMU bezeichnen wir als ökoeffizient, wenn für die optimale Lösung des Problems gilt:

- (i) $\theta^0 = 1$
- (ii) alle Schlupfvariablen s_r^g , s_s^b und s_i^- sind gleich Null.

Die optimale Lösung θ^0 gibt den Anteil aller Inputs, der – bei einer ökoeffizienten Produktion – für die gegebenen erwünschten und unerwünschten Outputs (dargestellt als reziproke Werte der Schadstoffemissionen) ausreichend sein müsste, an. Mit anderen Worten, $(1-\theta^0)$ gibt uns die notwendige proportionale Reduktion aller Inputs der gegebenen DMU an, wenn diese ökoeffizient sein sollte. Demnach ist θ ein Maß für radiale Effizienz. Eine DMU für die $\theta^0=1$, aber mindestens eine der Schlupfvariablen s_i^- (oder $\underline{s}_r^g$, $\underline{s}_s^b$) positiv ist, ist zwar radial (öko)effizient, aber mix-ineffizient (oder schwach effizient). Nach einer proportionalen Reduktion aller Inputs, muss der eine oder andere Input (oder Output) noch zusätzlich reduziert (erhöht) werden, um auf die Effizienzgrenze zu gelangen. Durch diese zusätzliche Anpassung ändern sich die Verhältnisse in denen die Inputs eingesetzt oder die Outputs produziert wurden.

Die dualen Variablen $\underline{\lambda}_j$ charakterisieren die fiktive DMU, als eine lineare Kombination der effizienten DMUs, die eine (öko)-ineffiziente DMU dominiert und für diese als eine Projektion auf die Effizienzgrenze dient. Auf diese Weise liefert das duale Problem (3.1) – (3.5) die Beschreibung der Ökoeffizienzgrenze als eine „Umhüllung“ (envelopment) der Daten der betrachteten Entscheidungseinheiten.

Das primale oder das „Multiplikator“ Problem gibt uns die gesuchten Gewichte (oder Multiplikatoren) für die Inputs ($\underline{\nu}$), erwünschte Outputs ($\underline{\mu}^g$) und unerwünschte Outputs ($\underline{\mu}^b$). Diese haben die Interpretation als Schattenpreise, in dem sie die Auswirkungen der Veränderungen in den Inputs und Outputs auf die Ökoeffizienz spiegeln. Auf diese Weise lassen sich die Stärken und Schwächen der einzelnen Entscheidungseinheiten bezüglich ihrer Inputs und Outputs identifizieren.

Das Problem (2.1) – (2.4) bzw. (3.1) – (3.5) wird für jede DMU gelöst und auf diese Weise werden für jede DMU die bestmöglichen Gewichte – entsprechend der relativen Stärken und Schwächen – bestimmt, sodass sich aus diesem Vergleich mit anderen DMUs das bestmögliche Resultat für jede DMU ergibt. Das Modell liefert nicht nur ein Maß an Ökoeffizienz, sondern es identifiziert auch die Möglichkeiten und Potenziale der Ökoeffizienzsteigerung für jede DMU.

Das Modell (2.1) – (2.4) bzw. (3.1) – (3.5) nach Charnes – Cooper – Rhodes [CHCR78] auch CCR Modell genannt geht von der Annahme konstanter Skalenerträge aus. Banker – Charnes – Cooper [BCHC84] haben eine Erweiterung des CCR Modells vorgelegt, die uns ermöglicht zwischen der technischen Effizienz und Skaleneffizienz zu unterscheiden. Modelle mit variablen Skalenerträgen unterscheiden sich vom CCR-Modell (3.1) – (3.5) durch die folgende zusätzliche Nebenbedingung

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

und werden nach Banker – Charnes – Cooper als BCC Modelle bezeichnet. Die Skaleneffizienz (SE) wird dann folgendermaßen definiert [CST00] S. 137:

$$SE = \frac{\theta_{CCR}^0}{\theta_{BCC}^0}$$

Sie kann nicht größer als Eins sein, da $\theta_{CCR}^0 \leq \theta_{BCC}^0$ gilt.

Die Modelle (2.1) – (2.4) bzw. (3.1) – (3.5) geben für die einzelnen DMUs die Information über die notwendige Inputreduktion – bei gegebenen Outputs – um ökoeffizient zu sein. Man bezeichnet diese Modelle als inputorientiert.

Eine alternative Möglichkeit der Ökoeffizienzerhöhung besteht in der Erhöhung der Outputs (bzw. Senkung der unerwünschten Outputs) bei gegebenen Inputs. Eine analytische Darstellung des sog. outputorientierten CCR Modells ergibt sich aus der Minimierung der Ineffizienz (der reziproke Wert der Effizienz (1.1)) unter der Bedingung, dass die Ineffizienz nicht kleiner als Eins sein kann (als reziproke Formulierung der Bedingung (1.2) in einem inputorientierten Modell, siehe [CHCR 78] oder [CST00]).

Im nächsten Abschnitt wird das Modell anhand der OECD-Daten für 28 Volkswirtschaften illustriert.

3 Ökoeffizienz der österreichischen Wirtschaft im Vergleich

Betrachten wir das Bruttoinlandsprodukt (BIP) als erwünschter Output und den Ausstoß von verschiedenen Schadstoffen als unerwünschte Outputs („bads“). Wegen der Verfügbarkeit der Daten, jedoch ohne Beschränkung der Allgemeinheit, reduzieren wir dabei die Anzahl der Schadstoffe auf zwei, CO₂ und NO_x. Die Emissionen von CO₂ und NO_x hängen einerseits von der Höhe des BIP und andererseits von der Intensität der Kontroll- und Entsorgungsaktivitäten für beide Schadstoffe ab. Da uns keine Daten über die Ausgaben für die Vermeidung, Reduktion und Eliminierung von CO₂ und NO_x zur Verfügung standen, verwenden wir als Inputgröße die Pollution Abatement and Control Expenditure (PAC) der OECD. Sie sind als zweckmäßige Aktivitäten definiert, die direkt auf die Vermeidung, Reduktion und Eliminierung von Verschmutzungen oder Beeinträchtigungen zielen, die als Rückstände der Produktion bzw. aus dem Konsum von Gütern und Dienstleistungen stammen. Ausgenommen davon sind Ausgaben für das Management natürlicher Ressourcen, der Schutz bedrohter Arten, die Errichtung von Parkanlagen und Grüngärten und Aktivitäten zur Nutzung natürlicher Ressourcen.

Als Inputgröße für das BIP nehmen wir nur die Beschäftigung, da die Daten über Kapitalstock für die betrachtete Gruppe von Ländern nicht komplett waren. In der Tabelle 1 sind diese Daten für 28 Länder (darunter Österreich) zusammengefasst. Wie ökoeffizient ist Österreich verglichen mit diesen Ländern?

Land (DMU)	BIP (Mrd. US\$)	CO2 (Mio. t)	NOx (1000 t)	Labour (1000 Beschäftigte)	PAC ¹ (Mrd. US\$)
CAN	707,1	526,3157895	2000	15999,2	7,78
MEX	372,9	357,1428571	1515,151515	38606,85	2,98
USA	8955,1	5555,555556	20000	140863	143,28
JAP	5680,6	1149,425287	1960,784314	67680	90,89
KOR	620,4	421,9409283	1250	21951	10,55
AUS	450,3	328,9473684	2173,913043	9681,7	3,6
NZE	68,9	31,69572108	173,0103806	1892,4	0,55
AUT	269,4	62,73525721	172,1170396	3915,2	4,58
BEL	316,7	120,0480192	334,4481605	4400,7	2,85
CZE	55,3	119,047619	423,7288136	5181,4	1,1
DEN	205,7	50	248,1389578	2853,12	1,85
FIN	164,7	54,79452055	259,7402597	2609	1,81
FRA	1772,3	373,1343284	169,7792869	26226,35	24,81
GER	2687,8	833,3333333	1785,714286	39731	40,32
GRE	139,2	87,71929825	369,00369	4437,35	1,11
HUN	54,4	55,00550055	196,8503937	4111,6	0,38
IRL	106	41,00041	124,0694789	1781,9	0,64
ITA	1203,9	425,5319149	1754,385965	23720	10,84
NED	497,6	176,9911504	444,4444444	8058	8,96
NOR	175,8	33,60215054	222,2222222	2350	2,11
POL	163,3	293,255132	1149,425287	17311	1,8
POR	129,9	59,59475566	373,1343284	5125,74	1,17
ESP	705,2	284,9002849	1250	16844,1	5,64
SWE	291,6	52,00208008	336,7003367	4362	3,5
SUI	336,1	4,199916002	129,0322581	3985	5,38
TUR	205,5	204,0816327	925,9259259	22269	1,44
UK	1309,1	531,9148936	2040,816327	29411,7	13,09
SVK	23	37,99392097	124,0694789	2594,1	2,25

Quelle: OECD Environmental Indicators 2001 und International Labour Organisation 2000

Tabelle 1: Grunddaten für das Jahr 2000

Da die Ökoeffizienz – unter ceteris paribus Annahme – mit sinkenden Ausstoßmengen von CO₂ und NO_x steigt, werden wir als die Outputwerte für diese unerwünschten Produkte die reziproken Werte der Emissionen aus der Tabelle 1 nehmen. Somit enthält das DEA Modell drei Outputs (das BIP und die reziproken Werte der Ausstoßmengen von CO₂ und NO_x) und zwei Inputs (Beschäftigung und Umweltausgaben) für 28 Länder (DMUs).

Unter der Anwendung von DEA Solver [CST00] liefert das inputorientierte Modell Ergebnisse, die in der Tabelle 2 zusammengefasst sind.

Nr.	Land	Score	Reference set (lambda)		
1	CAN	0,67964296	DEN	1,67479608	IRL 3,42070232
2	MEX	0,75552742	IRL	3,51792453	
3	USA	0,80952238	DEN	18,9628962	SUI 15,0384774
4	JAP	0,99663112	DEN	0,24008365	SUI 16,7545814
5	KOR	0,43628099	DEN	1,40937486	IRL 3,1178452
6	AUS	0,77466597	DEN	0,11513275	IRL 4,02469051
7	NZE	1	NZE	1	
8	AUT	0,84744594	DEN	0,29876662	SUI 0,61869594
9	BEL	0,99866359	DEN	1,53615514	IRL 6,73E-03
10	CZE	0,30353345	IRL	0,52169811	
11	DEN	1	DEN	1	
12	FIN	0,87272708	DEN	0,66391645	IRL 0,09361518 SUI 5,42E-02
13	FRA	0,87433439	DEN	4,62837985	SUI 2,44047089
14	GER	0,86188257	DEN	5,73443273	SUI 4,48743584
15	GRE	0,75716471	IRL	1,31320755	
16	HUN	1	HUN	1	
17	IRL	1	IRL	1	
18	ITA	0,79612698	DEN	2,23865429	IRL 7,01329068
19	NED	0,77011627	DEN	0,73815376	SUI 1,02874672
20	NOR	0,98838316	DEN	0,40877532	IRL 0,13138259 SUI 0,2314441
21	POL	0,54775681	IRL	1,54056604	
22	POR	0,67034349	IRL	1,2254717	
23	ESP	0,75493109	IRL	6,65283019	
24	SWE	0,89391438	DEN	1,06676033	SUI 0,21472002
25	SUI	1	SUI	1	
26	TUR	0,86163522	IRL	1,93867925	
27	UK	0,70391294	DEN	2,15483393	IRL 8,16840246
28	SVK	0,69477866	IRL	0,99135436	SUI 8,99E-03

Tabelle 2: Ergebnisse des inputorientierten CCR-Modells

Die Zahlen in der Spalte „Score“ entsprechen der Variable θ aus dem Modell (3.1) – (3.5) und $(1-\theta_j)$ für $j=1, \dots, 28$ gibt somit die proportionale Reduktion der beiden Inputs Arbeit und Umweltausgaben in den einzelnen Ländern an, die für die Erreichung der Ökoeffizienzgrenze notwendig ist.

Die ökoeffizienten Länder unter der Annahme der konstanten Skalenerträge sind somit New Zealand, Dänemark, Ungarn, Irland und Schweiz (mit $\theta=1$ und alle Schlupfvariablen gleich Null). Für Österreich ergibt sich daraus ein Ökoeffizienzindikator von 0,85. Die beiden Inputs sind um 15% höher, als die Inputs einer fiktiven DMU, die sich als eine lineare Kombination der ökoeffizienten Länder, nämlich Dänemark und Schweiz

darstellen lässt und die Österreich dominiert. Die Koeffizienten dieser Kombination (die Variablen λ_j aus dem Modell (3.1) – (3.5)) sind in der letzten Spalte der Tabelle 2 (Reference set (lambda)) zu finden.

Wie jedoch die Projektion von Österreich auf die Ökoeffizienzgrenze (die genau der linearen Kombination der Daten für Dänemark und Schweiz mit den Koeffizienten λ_j aus der letzten Spalte der Tabelle 2 entspricht) zeigt (siehe Tabelle 3), reicht die proportionale Reduktion der beiden Inputs um 15 % zur Ökoeffizienz von Österreich noch nicht aus. Dazu sind noch die Emissionen von CO₂ und NO_x zu hoch. Der reziproke Wert von CO₂ Emissionen müsste von 0,0159 auf 0,1532 steigen (siehe Tab. 3). Anders gesagt, der CO₂ Ausstoß müsste von etwa 62.735 Millionen Tonnen auf 6.528 Millionen Tonnen (oder um 861 %) reduziert werden, Der Ausstoß von NO_x ist um 5,5 Tausend Tonnen (oder um 3.25 %) zu hoch (verglichen wieder mit einer Kombination von Dänemark und Schweiz):

Nr.	Land I/O	Score Daten	Projektion	Differenz	%
8	AUT	0,847445942			
	Labour	3915,2	3317,920351	-597,279649	-15,26%
	PAC	4,58	3,881302413	-0,69869759	-15,26%
	BIP	269,4	269,4	0	0,00%
	CO2	0,01594	0,153286836	0,137346836	861,65%
	NOX	0,00581	6,00E-03	1,89E-04	3,25%

Tabelle 3: Projektionen auf die Ökoeffizienzgrenze für Österreich (CCR-Modell)

Analogerweise lassen sich die Ergebnisse für das Modell mit variablen Skalenerträgen (BCC Modell) interpretieren. Neben den ökoeffizienten Ländern aus dem CCR Modell (die somit sowohl technisch auch als skaleneffizient sind) technisch ökoeffizient – aber skaleneffizient – sind USA, Japan, Australien, Belgien, Frankreich, Italien, Norwegen, Spanien, Türkei und Slowakei (siehe Tab. 4). Entsprechend der Form (4) lässt die gesamte Ökoeffizienz θ_{CCR} als ein Produkt der reinen technischen Effizienz (θ_{BCC}) und der Skaleneffizienz darstellen:

$$\theta_{CCR} = \theta_{BCC} \cdot SE$$

Nr.	Land	Score	Reference set (lambda)			
1	CAN	0,81490066	AUS	5,73E-02	BEL	0,51130442 ITA 0,43140959
2	MEX	0,95537054	ESP	0,335001	TUR	0,664999
3	USA	1	USA	1		
4	JAP	1	JAP	1		
5	KOR	0,52152881	AUS	0,18304104	BEL	0,50220951 ITA 0,31474946
6	AUS	1	AUS	1		
7	NZE	1	NZE	1		
8	AUT	0,85111912	DEN	0,13937135	NOR	0,30271975 SUI 0,5579089
9	BEL	1	BEL	1		
10	CZE	0,46426475	NZE	0,76877191	HUN	0,23122809
11	DEN	1	DEN	1		
12	FIN	0,89481799	DEN	0,28842506	IRL	0,2825775 NOR 0,42899744
13	FRA	1	FRA	1		
14	GER	0,94250066	JAP	0,34725968	BEL	7,97E-02 ITA 0,57307688
15	GRE	0,82457779	IRL	0,89625639	ESP	4,58E-02 TUR 5,80E-02
16	HUN	1	HUN	1		
17	IRL	1	IRL	1		
18	ITA	1	ITA	1		
19	NED	0,77144278	JAP	3,19E-02	BEL	0,47387314 SUI 0,49418876
20	NOR	1	NOR	1		
21	POL	0,61425732	IRL	0,56074363	ESP	0,02720431 TUR 0,41205206
22	POR	0,71561457	IRL	0,90051514	ESP	2,80E-02 TUR 7,15E-02
23	ESP	1	ESP	1		
24	SWE	0,89473562	BEL	0,52063522	DEN	0,2638012 SUI 0,21556358
25	SUI	1	SUI	1		
26	TUR	1	TUR	1		
27	UK	0,9654307	USA	1,36E-02	ITA	0,98642791
28	SVK	1	IRL	2,87E-08	SVK	0,99999997

Tabelle 4: Ergebnisse des inputorientierten BCC-Modells

Die Ökoeffizienz für Österreich unter variablen Skalenerträgen beträgt 0,8511 und die Skaleneffizienz ist somit:

$$SE^{AUT} = \frac{\theta_{CCR}^{AUT}}{\theta_{BCC}^{AUT}} = \frac{0,8474}{0,8511} = 0,9956$$

Die Ökoeffizienz der österreichischen Wirtschaft ist vor allem durch die reine technische Ineffizienz und nur geringfügig durch die Skaleneffizienz zu erklären:

$$\theta_{CCR}^{AUT} = \theta_{BCC}^{AUT} \cdot SE$$

$$0,8474 = 0,8511 \cdot 0,9956$$

Auf der anderen Seite ist die Ökoeffizienz z.B. der Slowakei ist vor allem durch die Skaleneffizienz zu erklären:

$$SE^{SVK} = \frac{\theta_{CCR}^{SVK}}{\theta_{BCC}^{SVK}} = 0,69477.$$

Slowakei ist rein technisch ökoeffizient aber skaleneffizient.

Nr.	Land I/O	Score Daten	Projektion	Differenz	%
8	AUT	0,851119116			
	Labour	3915,2	3332,301564	-582,898436	-14,89%
	PAC	4,58	3,898125553	-0,68187445	-14,89%
	BIP	269,4	269,4	0	0,00%
	CO2	0,01594	0,144634476	0,128694476	807,37%
	NOX	0,00581	6,25E-03	4,38E-04	7,53%

Tabelle 5: Projektionen auf die Ökoeffizienzgrenze für Österreich (BCC-Modell)

Die Projektionen auf die Ökoeffizienzgrenze zeigen für Österreich (siehe Tab. 5), dass die beiden Inputs, Beschäftigung und Umweltausgaben um 14,89 % höher sind, als bei einer ökoeffizienten – Kombination der Referenzländer Dänemark (mit dem Koeffizienten 0,1393), Norwegen (mit dem Koeffizienten 0,3027) und Schweiz (mit dem Koeffizienten 0,5579). Darüber hinaus ist der reziproke Wert von der CO₂ Emission – bei gleich bleibenden BIP – um 0,12869 zu niedrig (oder die CO₂ Emissionen um 55,82 Millionen Tonnen bzw. 807 % zu hoch). Österreich müsste den CO₂ Ausstoß auf etwa 6,9 Millionen Tonnen reduzieren um ökoeffizient zu sein. Auch die NO_x Emission müsste noch um 7,53 % (oder 12,96 Tausend Tonnen) gesenkt werden. Der Leser kann überprüfen, dass diese Werte genau der Kombination der Werte für Dänemark, Norwegen und Schweiz (mit den Koeffizienten aus der Tab. 4) entsprechen.

Analog lassen sich die Ergebnisse für andere Länder interpretieren.

Tiefere Einsichten in die Ökoeffizienzergebnisse der einzelnen Länder und eine Identifikation ihrer Stärken und Schwächen lassen sich aus den Werten der Schlupfvariablen (Tab. 6) und aus der Lösung des Multiplikatormodells (Tab. 7) ablesen. Die Schlupfvariablen für die Inputs zeigen die – über eine proportionale Reduktion hinausgehende – Verringerung der Inputs, die notwendig ist, um ökoeffizient zu sein.

Nr.	Land	Score	Excess Labour S-(1)	Excess PAC S-(2)	Shortage BIP S+(1)	Shortage CO2 S+(2)	Shortage NOX S+(3)
1	CAN	0,81490066	0	0	0	3,55E-03	1,30E-03
2	MEX	0,95537054	16432,194	0	0	1,63E-03	3,26E-04
3	USA	1	0	0	0	0	0
4	JAP	1	0	0	0	0	0
5	KOR	0,52152881	0	0	0	3,11E-03	9,65E-04
6	AUS	1	0	0	0	0	0
7	NZE	1	0	0	0	0	0
8	AUT	0,85111912	0	0	0	0,12869448	4,38E-04
9	BEL	1	0	0	0	0	0
10	CZE	0,46426475	0	0	10,2471927	2,01E-02	3,26E-03
11	DEN	1	0	0	0	0	0
12	FIN	0,89481799	0	0	0	7,18E-03	1,52E-03
13	FRA	1	0	0	0	0	0
14	GER	0,94250066	0	0	0	1,11E-03	1,82E-04
15	GRE	0,82457779	0	0	0	1,09E-02	4,61E-03
16	HUN	1	0	0	0	0	0
17	IRL	1	0	0	0	0	0
18	ITA	1	0	0	0	0	0
19	NED	0,77144278	0	0	0	0,11599149	3,01E-03
20	NOR	1	0	0	0	0	0
21	POL	0,61425732	0	0	0	1,24E-02	4,12E-03
22	POR	0,71561457	0	0	0	5,63E-03	4,68E-03
23	ESP	1	0	0	0	0	0
24	SWE	0,89473562	0	0	0	4,17E-02	1,32E-03
25	SUI	1	0	0	0	0	0
26	TUR	1	0	0	0	0	0
27	UK	0,9654307	3085,08256	0	0	4,41E-04	7,29E-05
28	SVK	1	0	2,55E-08	2,46E-06	0	0

Tabelle 6: Werte der Schlupfvariablen für das inputorientierte BCC-Modell

Positive Werte der Schlupfvariablen für den Produktionsfaktor Arbeit (für Mexiko und UK) in der Tab. 6 (Spalte „Excess Labour“) implizieren – entsprechend der Dualitätstheorie der linearen Programmierung – Nullwerte für die Multiplikatoren (siehe Spalte V(1) in der Tab. 7). Eine kleine Reduktion des Inputs Arbeit – von dem beide Länder hohe Überschüsse aufweisen – wird ihre Ökoeffizienz nicht verändern. Analog lässt sich die positive Schlupfvariable bei den Umweltausgaben (und der Nullwert für den Multiplikator V(2)) für die Slowakei interpretieren.

Nr.	Land	Score	V(1)	V(2)	U(1)	U(2)	U(3)
1	CAN	0,81490066	1,76E-05	0,09227635	1,21E-03	0	0
2	MEX	0,95537054	0	0,33557047	2,82E-03	0	0
3	USA	1	9,13E-07	6,08E-03	1,18E-04	0	0
4	JAP	1	1,06E-05	3,09E-03	1,76E-04	0	0
5	KOR	0,52152881	1,30E-05	6,78E-02	8,93E-04	0	0
6	AUS	1	3,37E-05	0,18720634	2,38E-03	0	0
7	NZE	1	0	1,81818182	7,41E-03	15,5217	0
8	AUT	0,85111912	2,02E-04	4,59E-02	2,99E-03	0	0
9	BEL	1	1,37E-04	0,13978362	3,17E-03	0	0
10	CZE	0,46426475	5,12E-05	0,66803975	0	0	0
11	DEN	1	2,95E-04	8,48E-02	4,86E-03	0	0
12	FIN	0,89481799	3,19E-04	9,31E-02	4,55E-03	0	0
13	FRA	1	1,48E-05	2,47E-02	5,87E-04	0	9,11886144
14	GER	0,94250066	1,06E-05	1,43E-02	3,61E-04	0	0
15	GRE	0,82457779	1,51E-06	0,8948795	7,51E-03	0	0
16	HUN	1	0	2,63157895	9,95E-03	22,0773447	11,2653187
17	IRL	1	5,61E-04	0	5,44E-03	0	52,4746133
18	ITA	1	1,24E-05	6,51E-02	8,57E-04	0	0
19	NED	0,77144278	9,37E-05	0,02731652	1,55E-03	0	0
20	NOR	1	3,45E-04	8,99E-02	5,17E-03	0	9,1367451
21	POL	0,61425732	9,20E-07	0,54670572	4,59E-03	0	0
22	POR	0,71561457	1,43E-06	0,84844443	7,12E-03	0	0
23	ESP	1	2,97E-07	0,17641813	1,48E-03	0	0
24	SWE	0,89473562	1,86E-04	5,41E-02	3,08E-03	0	0
25	SUI	1	2,51E-04	0	2,98E-03	0	0
26	TUR	1	0	0,69444444	5,58E-03	0	0
27	UK	0,9654307	0	7,64E-02	1,31E-03	0	0
28	SVK	1	3,85E-04	0	0	162,225441	109096,534

Tabelle 7: Werte der Multiplikatoren für das inputorientierte BCC-Modell

Hoher Wert der Schlupfvariablen für BIP im Falle der Tschechischen Republik (Tab. 6) zeigt auf die relative Schwäche in diesem Output, die wiederum als Nullwert des entsprechenden Multiplikators U(1) in Tab. 7 zum Ausdruck kommt. Eine kleine Veränderung im BIP zieht keine Veränderung der Ökoeffizienz für die Tschechische Republik nach sich.

Die Ergebnisse in Tab. 6 zeigen relative Schwächen Österreichs bezüglich der CO₂ Emissionen (die Schlupfvariable S+(2) für CO₂ Ausstoß ist deutlich höher als die Schlupfvariable S+(3) für die NO_x Emissionen). Die Projektionen auf die Ökoeffizienzgrenze in Tab. 5 bestätigen diese Interpretation. Positiver Multiplikator für BIP (Spalte U(1) in Tab. 7) deutet auf die relative Stärke Österreichs in diesem Output. Eine Erhöhung des BIP um eine kleine Einheit erhöht die Ökoeffizienz um den Betrag des Multiplikators.

4 Zusammenfassung

Eine neue Variante des DEA Modells für die Ökoeffizienzmessung wurde in diesem Beitrag vorgelegt. Im Unterschied zu den bisherigen DEA Modellen wurden die Schadstoffe (als unerwünschte Nebenprodukte) auf der Outputseite mit den reziproken Werten der Emissionsmengen erfasst. Da die Emissionen nicht kostenlos beseitigt werden

können, enthält das Modell die Ausgaben für Entsorgungsaktivitäten als einen Inputfaktor. Die Anwendungsmöglichkeiten des Modells wurden anhand der OECD Daten illustriert. Aus der Diskussion der Ergebnisse zeigen sich mindestens zwei Richtungen für weitere Forschung. Die eine geht in die Richtung der intertemporalen Vergleiche, wie hat sich die Ökoeffizienz in der Zeit verändert und welchen Anteil dabei die Technologieveränderung hat.

Die zweite Richtung bezieht sich auf die Berücksichtigung der Umweltstandards. Auch eine relativ hohe Ökoeffizienz aus dem hier präsentierten Modell impliziert noch nicht die Erfüllung der umweltpolitischen Ziele.

Literaturverzeichnis

- [BCHC84] Banker, R.D.; Charnes, A.; Cooper, W.W.: Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, 30, 1984; S. 1078-1092.
- [Bd97] Bouysson, D.: DEA as a Tool for MDCM: Some remarks. Paper presented at the Fifth European Workshop on Efficiency and Productivity Analysis, Copenhagen, October 9-11, 1997.
- [CST00] Cooper, W.W.; Seiford, L.M.; Tone, K.: *Data Envelopment Analysis. A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software*, Kluwer Academic Publishers, Second Printing 2000.
- [CHCR78] Charnes, A.; Cooper, W.W.; Rhodes, E.: Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 2, 1978; S. 429-444.
- [CHCR79] Charnes, A.; Cooper, W.W.; Rhodes, E.: Short communication: Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 3, 1979; S. 339.
- [CHC62] Charnes, A.; Cooper, W.W.: Programming with linear fractional functionals. *Naval Research Logistics Quarterly*, 9, 1962; S. 181-185.
- [DA01] Dyckhoff, H.; Allen, K.: Measuring ecological efficiency with data envelopment analysis (DEA). *European Journal of Operational Research*, 13, 2001; S. 312-325.
- [Fr89] Färe, R.; Grosskopf, S.; Lovell, K.; Pasurka, C.: Multilateral Productivity Comparisons When Some Outputs Are Undesirable: "A Non-Parametric Approach." *The Review of Economics and Statistics*, 71, 1989; S. 90-98.
- [FGT96] Färe, R.; Grosskopf, S.; Tyteca, D.: An activity analysis model of the environmental performance of firms – application to fossil-fuel-fired electric utilities. *Ecological Economics*, 18, 1996; S. 161-175.
- [KL02] Korhonen, P.J.; Luptacik, M.: Ecoefficiency Analysis of Power Plants: An Extension of Data Envelopment Analysis. Research Report Helsinki School of Economics 2002, erscheint in *European Journal of Operational Research* 2003.

- [Lm00] Luptáčík, M.: Data Envelopment Analysis as a Tool for Measurement of Eco-Efficiency. In: Dockner, E.; Hartl, R.F.; Luptáčík, M., Sorger, G.,: Optimization, Dynamics and Economic Analysis, Physica-Verlag, 2000; S. 36-48.
- [STM00] Sancho, F.H.; Tadeo, A.P.; Martinez, E.R.: Efficiency and Environmental Regulation. An Application to Spanish Wooden Goods and Furnishings Industry: Environmental and Resource Economics, 15, 200; S. 365-378.
- [Sl96] Seiford, L.M.: Data Envelopment Analysis: The evolution of the state -of-the-art (1978-1995). Journal of Productivity Analysis, 1996; S. 99-138.
- [ST90] Seiford, L.M.; Thrall, R.M.: Recent developments in DEA. Mathematical programming approach to frontier analysis. Journal of Econometrics, 46 (1), 1990; S. 7-38.
- [Td96] Tyteca, D.: On the Measurement of the Environmental Performance of Firms: A Literature Review and a Productive Efficiency Perspective. Journal of Environmental Management, 46, 1996; S. 281-308.
- [Td97] Tyteca, D.: Linear Programming Models for the Measurement of Environmental Performance of Firms: Concepts and Empirical Results. Journal of Productivity Analysis, 8, 1997; S. 175-189.