

Entscheidungen bei mehrfacher Zielsetzung mittels Data Envelopment Analysis am Beispiel von Ökobilanzen für die Molkereiproduktion

von B. Müller

Institut für Ökonomie der Ernährungswirtschaft der Bundesanstalt für Milchwirtschaft, Postfach 60 69, 24121 Kiel

1. Problemstellung

Die vermehrte Artikulation ihrer Interessen durch verschiedene Teile der Gesellschaft erfordert ebenso wie die sich verstärkende Verflechtung der verschiedenen wirtschaftlichen Aktivitäten und das wachsende Wissen um die vielfältigen Folgen einzelner Handlungen von Entscheidungsträgern sowohl in Politik als auch in Wirtschaft die Einbeziehung dieser Interaktionen bei der Vorbereitung ihrer Handlungen. Insbesondere die stärkere Berücksichtigung ökologischer Belange zusätzlich zu der weiter existentiell wichtigen Verfolgung ökonomischer Ziele führt zu Entscheidungsproblemen mit notwendig mehrfacher Zielsetzung. Allein die Operationalisierung ökologischer Ziele fordert eine solche Struktur, denn es sind unter Umständen die Belange des Verbrauchs verschiedener Ressourcen ebenso wie die des Ausstoßes unterschiedlicher Schadstoffe zu berücksichtigen (15), (27), (32). Auch die indirekte Einbeziehung von übergeordneten Leitlinien oder unsicheren Zukunftserwartungen führt zu Fragestellungen mit mehrfacher Zielsetzung (23). Die Abbildung 1 fasst die Gründe für das Auftreten solcher Fragestellungen zusammen.

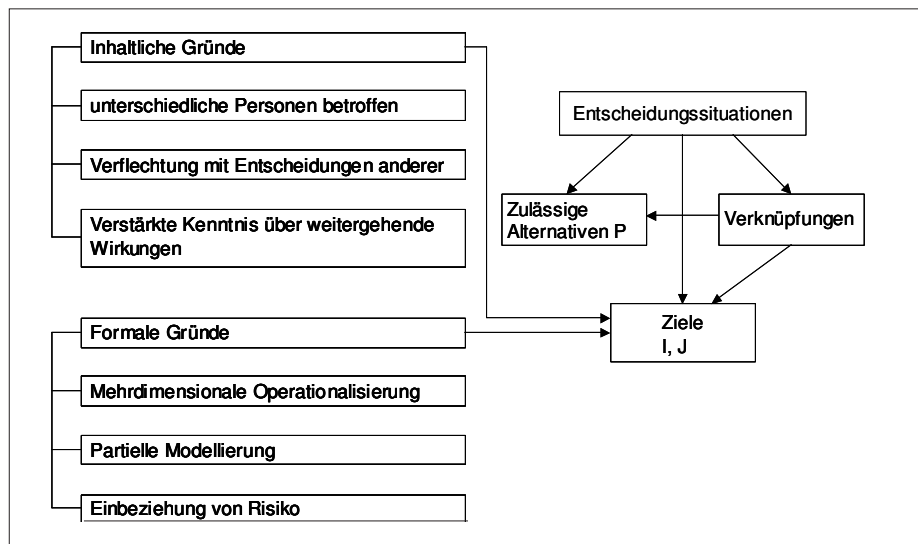


Abb. 1: Gründe für das Auftreten von Entscheidungsproblemen mit mehrfacher Zielsetzung

Zur Unterstützung wirtschaftlicher Entscheidungen stellt die ökonomische Theorie numerische Entscheidungs-(vorbereitungs-)modelle bereit, um komplexe Sachverhalte intersubjektiv nachvollziehbar darzustellen, Handlungsempfehlungen im Modellrahmen logisch zu begründen und die Basisannahmen des Modells testbar zu formulieren. Für das hier vorliegende Problem werden die entsprechenden Verfahren unter dem Namen Entscheidung bei mehrfacher Zielsetzung bzw. „Multiple Criteria Decision Making“ (MCDM) zusammengefasst (5), (34), (35).

Während bei einer eindimensionalen monotonen Zielsetzung i durch diese Zielsetzung eine natürliche Ordnung auf der Menge P der zulässigen Handlungsalternativen erzeugt wird, so gilt dies schon für eine zweidimensionale Zielsetzung i, j nicht mehr, wie die Abbildung 2 zeigt.

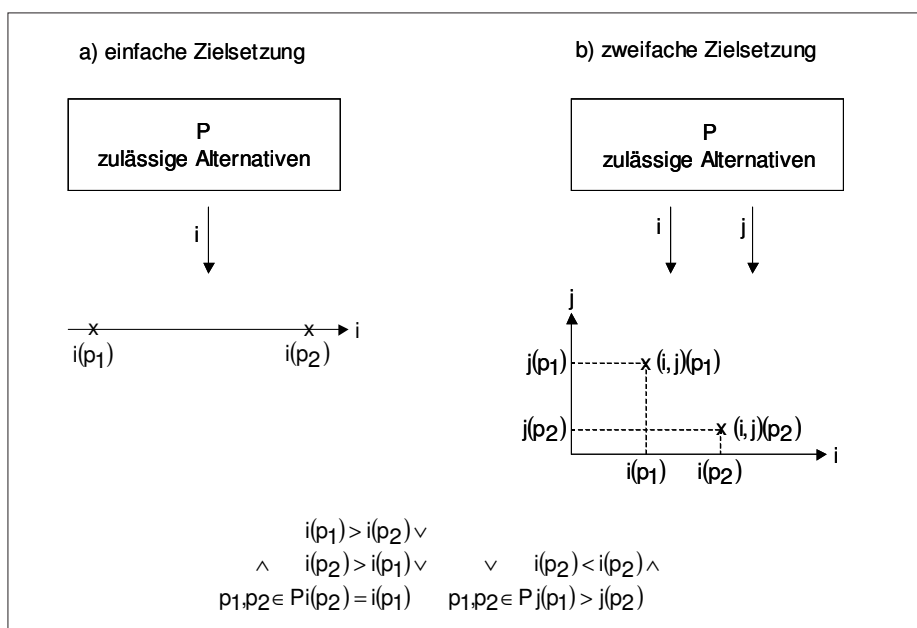


Abb. 2: Strukturelle Probleme einer Entscheidung bei mehrfacher Zielsetzung

Eine Aufhebung dieses strukturellen Problems ist grundsätzlich möglich durch geeignete Veränderungen des Raums der zulässigen Alternativen P oder der mehrdimensionalen Zielfunktion (i, j) (vergl. (23), (29) sowie die dort angegebene Literatur). Durch eine Äquivalenzrelation auf P werden Strukturen wie unter Abbildung 2b dargestellt vermieden, als Lösung des Entscheidungsproblems ergibt sich die Klasse der pareto-optimalen Handlungsalternativen. Eine Projektion der mehrdimensionalen Zielfunktion (i, j) mittels geeigneter Gewichte führt zu einer eindimensionalen Zielfunktion und reduziert die komplexe Situation der Abbildung 2b ebenfalls auf eine gemäß der Struktur der Abbildung 2a.

Beide Vorgehensweisen haben in Fragestellung und Methodik bemerkenswerte formale Übereinstimmungen mit Verfahren der Data Envelopment Analysis (DEA) (6), (18), (24), (28). Da diese im Unterschied zu vielen Methoden des MCDM auch eine Linderung der Schwierigkeiten der beiden zuvor dargestellten traditionellen Wege der

Problemlösung versprechen – es gibt zum einen Möglichkeiten einer stärkeren Diskriminierung zwischen den Handlungsalternativen als bei der Suche nach pareto-optimalen Lösungen (6), (24) zum anderen ergeben sich modellinterne Begründungen für die Gewichtswahl (3), (4), (25) – wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit untersucht, wie Verfahren der DEA auf Probleme des MCDM anzuwenden sind.

Praktisch sollen diese Erkenntnisse für die ökologische Bewertung unterschiedlicher Verfahren der Milchverarbeitung, insbesondere der Auswirkungen der Unternehmensgröße, genutzt werden, um die Beurteilungen in den unterschiedlichen Dimensionen (14), (19) zusammenzuführen.

2. Vergleich MCDM – DEA

Die Berührungspunkte zwischen MCDM und DEA sind in der Literatur schon mehrfach behandelt worden (11), (16), (17), (21), (26), (30), (31). Die jeweiligen Strukturen beider Verfahren sollen hier in einer Form dargestellt werden, die eine Übertragbarkeit der DEA-Verfahren auf das MCDM besonders deutlich werden lässt.

In der hier betrachteten diskreten Version kann man das MCDM-Problem beschreiben als ein Tripel aus einer Menge MP , $MP := \{1, \dots, p, \dots, P\}$ von zulässigen Handlungsalternativen, Zielen MI , $MI := \{1, \dots, i, \dots, I\}$ und $MJ := \{1, \dots, j, \dots, J\}$ die zu minimieren (I) bzw. zu maximieren (J) sind, sowie Zielerreichungswerten X , $X := \left\{ x_i^p \right\}_{i=1 \dots I}^{p=1 \dots P}$ und Y , $Y := \left\{ y_j^p \right\}_{j=1 \dots J}^{p=1 \dots P}$ der Handlungsalternativen p bezüglich der Ziele i bzw. j .

Gesucht werden eine oder mehrere Handlungsalternativen p_{opt} , die die Ziele i und j simultan „am besten“ erfüllen. Gelöst wird dieses Problem, indem die Menge aller pareto-optimalen Handlungsalternativen, d. h. solcher, zu denen keine anderen zulässigen Handlungsalternativen bestehen, die bezüglich aller Zieldimensionen nicht schlechter und bezüglich mindestens einer Zieldimension besser sind, bestimmt wird. Alternativ oder parallel werden Gewichte g_k , $\{g_k\}_{k=1}^{I,J}$ extern vorgegeben und die hieraus gebildete eindimensionale Zielfunktion wird optimiert. Die Übersicht 1 stellt die Struktur des MCDM-Modells zusammenfassend dar.

Übersicht 1: Struktur eines diskreten MCDM-Modells

Gegeben seien:

- | | |
|--|--|
| a) $MP := \{1, \dots, p, \dots, P\}$ | Menge von zulässigen Handlungsalternativen |
| b) $MI := \{1, \dots, i, \dots, I\}$ | Menge von zu minimierenden Zielen |
| c) $MJ := \{1, \dots, j, \dots, J\}$ | Menge von zu maximierenden Zielen |
| d) $X := \left\{ x_i^p \right\}_{i=1 \dots I}^{p=1 \dots P}$ | Werte für die Zielerreichungs- |
| $Y := \left\{ y_j^p \right\}_{j=1 \dots J}^{p=1 \dots P}$ | grade von p bezüglich i bzw. j |

Gesucht wird die Menge der paretooptimalen Handlungsalternativen.

$$e) \text{MP}_{\text{PAR}}: \left\{ \bar{p} \in \text{MP} \wedge \left(\bigwedge_{i \in \text{MI}} \sum_{j=1}^J \tilde{x}_i^{\bar{p}} \leq x_i^{\bar{p}} \wedge \bigwedge_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \tilde{y}_j^{\bar{p}} \geq y_j^{\bar{p}} \wedge \left(\bigvee_{i \in \text{MI}} x_i^{\bar{p}} < x_i^{\bar{p}} \vee \bigvee_{j \in \text{MJ}} y_j^{\bar{p}} > y_j^{\bar{p}} \right) \right) \right\}$$

Aus dieser Menge wird dann eine optimale Handlungsalternative gesucht ($\hat{p}(g)$):

$$f) \bigwedge_{p \in \text{MP}} \sum_{j=1}^J g_j \cdot y_j^{\hat{p}(g)} - \sum_{i=1}^I g_i \cdot x_i^{\hat{p}(g)} \geq \sum_{j=1}^J g_j \cdot y_j^p - \sum_{i=1}^I g_i \cdot x_i^p$$

Für eine Handlungsalternative $\bar{p} \in \text{MP}$ kann durch Einführung von Abweichungsvariablen geprüft werden, ob \bar{p} pareto-optimal ist. Dies zeigt der Satz 1 (vergl. auch (33)).

Satz 1: Testprogramm für Paretooptimalität

Bezüglich des MCDM-Problems der Übersicht 1 lässt sich für reellwertige x_i^p, y_j^p die Pareto-Optimalität von \bar{p} durch die Lösung eines LP prüfen.

Sei $p \in \text{MP}$ beliebig.

a)

$$\sum_{i=1}^I z_i^{\bar{p}} + \sum_{j=1}^J z_{I+j}^{\bar{p}}(p) = \text{MAX}$$

$$b) \bigwedge_{i=1}^I x_i^p + z_i^{\bar{p}}(p) = x_i^{\bar{p}}$$

$$c) \bigwedge_{j=1}^J p - z_{I+j}^{\bar{p}}(p) = y_j^{\bar{p}}$$

$$d) \bigwedge_{i=1}^I z_i^{\bar{p}}(p) \geq 0; \bigwedge_{j=1}^J z_{I+j}^{\bar{p}}(p) \geq 0$$

$$e) \bigwedge_{i=1}^I z_i^{\bar{p}} = \text{MAX} \left\{ z_i^{\bar{p}}(p) \right\}_{p=1}^P$$

$$\bigwedge_{j=1}^J z_{I+j}^{\bar{p}} = \text{MAX} \left\{ z_{I+j}^{\bar{p}}(p) \right\}_{p=1}^P$$

Es gilt:

$$f) \bar{p} \text{ ist pareto-optimal} \Leftrightarrow \bigwedge_{i=1}^I z_i^{\bar{p}} = 0 \wedge \bigwedge_{j=1}^J z_{I+j}^{\bar{p}} = 0$$

Beweis:

Der Beweis wird indirekt geführt.

„ \Rightarrow “

Sei \bar{p} pareto-optimal und es gebe Lösung von a-e mit o. B. d. A.

$z_{\tilde{i}}^{\bar{p}} > 0$. Da MP endlich, existiert \tilde{p} mit

$z_{\tilde{i}}^{\tilde{p}} > 0$. Dann gilt aber:

$\bigwedge_{i=1}^I x_i^{\bar{p}} \geq x_i^{\tilde{p}}$ wegen Satz 1 b, d und

$\bigwedge_{j=1}^J y_j^{\bar{p}} \leq y_j^{\tilde{p}}$ wegen Satz 1c, d und

$x_{\tilde{i}}^{\bar{p}} > x_{\tilde{i}}^{\tilde{p}}$

Damit ist aber \bar{p} dominiert durch \tilde{p} und nicht pareto-optimal gemäß Übersicht 1e.

" \Leftarrow "

Sei $\bigwedge_{i=1}^I z_i^{\bar{p}} = 0 \wedge \bigwedge_{j=1}^J z_{I+j}^{\bar{p}} = 0$ und \bar{p} nicht pareto-optimal.

Dann existiert nach Übersicht 1e \tilde{p} und o.B.d.A. \tilde{i} mit:

$\bigwedge_{i=1}^I x_i^{\bar{p}} \geq x_i^{\tilde{p}}, \bigwedge_{j=1}^J y_j^{\bar{p}} \leq y_j^{\tilde{p}} \wedge x_{\tilde{i}}^{\bar{p}} > x_{\tilde{i}}^{\tilde{p}}$

damit gilt aber:

$$z_{\tilde{i}}^{\bar{p}} = \max_{p=1}^P \left\{ z_{\tilde{i}}^{\bar{p}}(p) \right\} > z_{\tilde{i}}^{\tilde{p}}(\tilde{p}) = x_{\tilde{i}}^{\bar{p}} - x_{\tilde{i}}^{\tilde{p}} > 0$$

im Widerspruch zur Annahme.

q. e. d.

Verwendet man Methoden des Goal-Programming, so kann man ausgehend von einer als befriedigend erscheinenden Handlungsalternative \bar{p} eine Zielfunktion bezüglich der Abweichungen der wirklichen Handlungsalternativen von dieser vorgegebenen definieren und mittels geeigneter Gewichte bezüglich der einzelnen Zieldimensionen dann ein Problem der einfachen linearen Optimierung erzeugen, was zur Definition einer „optimalen“ Handlungsalternative führt. Den Zusammenhang stellt die Übersicht 2 dar.

Übersicht 2: Das MCDM-Problem in der Form des Goal-Programming

Definiert man ausgehend von einer akzeptablen Handlungsalternative \bar{p} die Zielfunktion der Übersicht 1f mit Hilfe der Abweichungen z der tatsächlichen Werte x_i^p bzw. y_j^p von $x_i^{\bar{p}}$ und $y_j^{\bar{p}}$, so kann man im Sinne einer Kompromisszielfunktion des Goal-Programming (siehe (23)) eine „optimale“ Handlungsalternative \hat{p} gemäß Übersicht 1f finden durch Lösung des Problems:

$$a) \sum_{j=1}^J g_j \cdot z_{I+j}^{\bar{p}}(p) - \sum_{i=1}^I g_i \cdot z_i^{\bar{p}}(p) = \text{MAX}$$

$$b) \bigwedge_{i=1}^I \bigwedge_{p=1}^P x_i^p + z_i^{\bar{p}}(p) = x_i^{\bar{p}}$$

$$c) \bigwedge_{j=1}^J \bigwedge_{p=1}^P y_j^p - z_{I+j}^{\bar{p}}(p) = y_j^{\bar{p}}$$

$$d) \bigwedge_{i=1}^I z_i^{\bar{p}}(p) \geq 0 \quad \bigwedge_{j=1}^J z_{I+j}^{\bar{p}}(p) \geq 0$$

\hat{p} maximiert a unter den Nebenbedingungen b-d.

Die Bewertung der einzelnen Handlungsalternativen erfolgt also durch die Addition der gewichteten Abweichungen von einer vorgegebenen Alternative.

Im Unterschied hierzu untersucht man in der DEA eine Menge $MP' := \{1, \dots, p', \dots, P'\}$ von Entscheidungseinheiten oder Decision Making Units (DMU), die mittels Inputs $MI' := \{1, \dots, i', \dots, I'\}$ Outputs $MJ' := \{1, \dots, j', \dots, J'\}$ erzeugen, wobei mittels der jeweiligen Inputmengen $X' = \left\{ x_{i'}^{p'} \right\}_{i'=1 \dots I'}$ Outputmengen $Y' = \left\{ y_{j'}^{p'} \right\}_{j'=1 \dots J'}$ erzeugt werden.

Untersucht wird dabei, welche der DMU's „am besten“ sind. Hierzu werden die „effizienten“ DMU's, also diese, bezüglich derer keine andere DMU existiert, die bezüglich aller Inputs nicht mehr verbraucht und bezüglich aller Outputs nicht weniger produziert, aber für die mindestens eine Input- oder Outputdimension mit besserer Performance besteht, gesucht. Zusätzlich kann der Vergleich der Inputs und Outputs mittels einer Menge von Gewichten g_k $k := \{1 \dots I', J'\}$ als einfacher Quotient von gewichteten Outputs und Inputs dargestellt werden. Die Übersicht 3 zeigt diese Vorgehensweise.

Übersicht 3: Struktur eines DEA-Modells

Gegeben seien:

$$a) MP' := \{1, \dots, p', \dots, P'\} \text{ Menge von DMU's}$$

$$b) MI' := \{1, \dots, i', \dots, I'\} \text{ Menge von Inputfaktoren}$$

$$c) MJ' := \{1, \dots, j', \dots, J'\} \text{ Menge von Outputfaktoren}$$

$$d) X' := \left\{ x_{i'}^{p'} \right\}_{i'=1 \dots I'} \text{ Input- bzw. Outputmengen}$$

$$Y' := \left\{ y_{j'}^{p'} \right\}_{j'=1 \dots J'} \text{ der DMU's bezüglich } i' \text{ bzw. } j'$$

Gesucht wird eine Menge von effizienten DMU.

$$e) MP'_{EFF} : \left\{ \bar{p}' \mid \bar{p}' \in MP' \wedge \left(\bigvee_{\tilde{p}' \in \text{CON}(MP')} \bigwedge_{i=1}^I x'_i \tilde{p}'_i \leq x'_i \bar{p}'_i \wedge \bigwedge_{j=1}^J y'_j \tilde{p}'_j \geq y'_j \bar{p}'_j \wedge \left(\bigvee_{\tilde{i} \in MI'} x'_i \tilde{p}'_i < x'_i \bar{p}'_i \vee \bigvee_{\tilde{j} \in MJ'} y'_j \tilde{p}'_j > y'_j \bar{p}'_j \right) \right) \right\}$$

Aus dieser Menge wird dann eine optimale DMU gesucht ($\hat{p}'(g')$):

$$f) \hat{p}' \in MP' \quad \frac{\sum_{j=1}^J g'_j \cdot y'_j \hat{p}'_j(g')}{\sum_{i=1}^I g'_i \cdot x'_i \hat{p}'_i(g')} \geq \frac{\sum_{j=1}^J g'_j \cdot y'_j p'_j}{\sum_{i=1}^I g'_i \cdot x'_i p'_i}$$

Diese effizienten DMU's werden mittels Einführung von Abweichungsparametern $z'_i \bar{p}'_i, z'_j \bar{p}'_j$ und Lösung eines Optimierungsproblems ermittelt. Dies zeigt der Satz 2.

Satz 2: Testprogramm für Effizienz

Bezüglich des DEA-Problems der Übersicht 3 wird die Effizienz von \bar{p}' durch die Lösung eines LP geprüft.

$$a) \sum_{i=1}^I z'_i \bar{p}'_i + \sum_{j=1}^J z'_{I+j} \bar{p}'_j = \text{MAX}$$

$$b) \bigwedge_{i=1}^I \sum_{p'=1}^{P'} d_{p'} \bar{p}'_i \cdot x'_{p'} + z'_i \bar{p}'_i = x'_i \bar{p}'_i$$

$$c) \bigwedge_{j=1}^J \sum_{p'=1}^{P'} d_{p'} \bar{p}'_j \cdot y'_{p'} - z'_{I+j} \bar{p}'_j = y'_j \bar{p}'_j$$

$$d) \bigwedge_{i=1}^I z'_i \bar{p}'_i \geq 0 \quad \bigwedge_{j=1}^J z'_{I+j} \bar{p}'_j \geq 0$$

$$e) \sum_{p'=1}^{P'} d_{p'} \bar{p}'_i = 1 \quad \bigwedge_{p'=1}^{P'} d_{p'} \bar{p}'_i \geq 0$$

Es gilt:

$$f) \bar{p}' \text{ ist effizient} \Leftrightarrow \bigwedge_{i=1}^I z'_i \bar{p}'_i = 0 \wedge \bigwedge_{j=1}^J z'_{I+j} \bar{p}'_j = 0$$

Der Beweis kann ähnlich wie der für Satz 1 geführt werden unter Beachtung der Tatsache, dass die Dominanz-Ungleichungen auch für mit positiven Gewichten gewichtete Linearkombinationen von dominierten Punkten gelten. Zu den Einzelheiten vergleiche man (18), Satz 3.5 und, (30), S. 655 ff. Darüber hinaus zeigt ein Blick in die Literatur, dass im Rahmen der DEA für Probleme mit variablen Skalenerträgen das Problem des Satzes 2 oder das dazu äquivalente duale Problem zur direkten Definition der Effizienz verwendet werden (24), (25), (28).

Wie (3), (4), (25) zeigen, kann man im Rahmen der DEA-Gewichte g'_i, g'_j geeignet bestimmen, so dass unter den effizienten DMU's weiter diskriminiert werden kann. Dies zeigt die Übersicht 4.

Übersicht 4: Diskriminierung effizienter DMU durch geeignete Gewichte

Gegeben seien die Definitionen der Übersicht 3 und des Satzes 2. Wie in (24), (25) gezeigt, lässt sich dann mittels Verfahren, die strukturell dem der Übersicht 2 ähneln, eine „optimale“ effiziente DMU \hat{p} finden, also eine, für die gilt:

$$\hat{p}' \in MP' \frac{\sum_{j=1}^J g'_j \cdot y'_j \hat{p}'_j}{\sum_{i=1}^I g'_i \cdot x'_i \hat{p}'_i} \geq \frac{\sum_{j=1}^J g'_j \cdot y'_j p'_j}{\sum_{i=1}^I g'_i \cdot x'_i p'_i}$$

Die hier gewährte Darstellungsweise macht deutlich, wie die Methoden der DEA für Probleme des MCDM nutzbar gemacht werden können. Betrachtet man die zu minimierenden Kriterien i als Inputs i' , die zu maximierenden Kriterien j als Outputs j' , verwendet man die zulässigen Handlungsalternativen p als DMU's p' , die Zielfunktionskoeffizienten $x'_i p'_i$ der zu minimierenden Ziele als Inputmengen $x'_i p'_i$, die Zielfunktionskoeffizienten $y'_j p'_j$ der zu maximierenden Zielfunktion als Outputmengen $y'_j p'_j$, so ist das MCDM-Problem formal in ein Problem der DEA umgewandelt. Ein Vergleich der Definition 1e für pareto-optimale Lösungen des MCDM Problems mit der Definition 2e für effiziente DMU's macht deutlich, dass die Ermittlung der effektiven DMU's im DEA-Problem gerade die pareto-optimale Lösungen des MCDM-Problems berechnet. Dies wird auch deutlich durch Vergleich der jeweiligen „Test-Programme“ zur Ermittlung effizienter Lösungen bzw. pareto-optimale DMU's. Eine Umformung gemäß ((25) Satz 1) mit geeigneten zusätzlichen Restriktionen zeigt, dass auch die weiterführenden Optimierungsprobleme bei Verwendung von Goal-Programming-Algorithmen und der Definition über Abstände äquivalent sind zu den Gewichtsermittlungsproblemen des DEA, so dass sich die aus einem DEA-Problem mit Gewichten gemäß (25) ergebenden Lösungen als Ergebnisse eines Goal-Programming-Problems des MCDM interpretieren lassen.

Zwar behandeln MCDM und DEA unterschiedliche reale Probleme:

- im Rahmen des MCDM werden zukünftig zu realisierende Handlungsalternativen miteinander verglichen, im Rahmen der DEA bereits realisierte Input- und Outputkombinationen,
- im Rahmen des MCDM liegt die Hauptzielrichtung in der Suche nach pareto-optimale bzw. optimale Handlungsalternativen, um diese später umzusetzen, im Rahmen der DEA werden für eine Verbesserung im Rahmen des Benchmarkings vor allen Dingen ineffiziente DMU's gesucht, damit diese zukünftig effizienter produzieren können.

Die Strukturkerne beider Probleme sind jedoch kompatibel, so dass Algorithmen der DEA auch für das MCDM nutzbar gemacht werden können. Die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zeigt die Tabelle 1.

Tab. 1: Vergleich MCDM – DEA

Kriterium	MCDM	DEA
Zeitbezug	Planung der Zukunft	Untersuchung der Vergangenheit
Untersuchungsobjekt	zulässige Handlungen P	DMUP'
Kriterien	zu minimierende Ziele I zu maximierende Ziele J	Inputs I' Outputs J'
Bewertungen	Maximierungsparameter x_i^p Minimierungsparameter y_j^p	Inputmengen $x_i^{p'}$ Outputmengen $y_j^{p'}$
Lösungen	pareto-optimale \bar{p}	effiziente \bar{p}'
weitere Diskriminierung	durch Gewichte $g_{i,j}$ im Goal-Programming	durch Gewichte $g'_{i',j'}$ gemäß (25)

3. Das DEA-Modell für das MCDM-Problem mit kardinal skalierten Zielvektoren

Ein Problem des MCDM, nämlich die Notwendigkeit, externe Gewichte vorzugeben, um zwischen pareto-optimalen Lösungen weiter differenzieren zu können, ergibt sich auch bei vielen Methoden der DEA. Hierzu sind verschiedene Ansätze untersucht worden (1), (2), (3), (4), (12), (22), (25).

Zum Einsatz im Rahmen des MCDM wurde für die Behandlung dieses Problems ein in (25) dokumentiertes Verfahren gewählt, weil:

- die Gewichtsbildung der einzelnen Zieldimensionen eine Normierung bewirkt, wodurch der sonst wichtige Einfluss der Messskalen für die verschiedenen Zieldimensionierungen eliminiert wird,
- die Gewichte so gewählt werden, dass für pareto-optimale Entscheidungen eine insgesamt positive Bewertung entsteht, in Einklang mit der intuitiven Vorstellung über das Ranking solcher pareto-optimalen Handlungsalternativen im Vergleich zu den gesamten Handlungsalternativen,
- die Art der Gewichtsbildung dafür sorgt, dass nicht einzelne Zieldimensionen einen überwältigenden Einfluss auf das Ranking insgesamt gewinnen,
- die Gewichte als Gleichgewichts-Schattenpreise der Zieldimensionen in einem einfach strukturierten Entscheidungsproblem interpretiert werden können.

Zu den Einzelheiten vergleiche man (25). Die Verfahren der DEA sind insgesamt attraktiv für den Einsatz im MCDM, weil:

- miteinander korrelierende Zieldimensionen nicht überbewertet werden, denn die DEA versucht, die verschiedenen Handlungsalternativen zu trennen, wozu korrelierte Ziele wenig beitragen,

- die Idee der Verwendung von Gewichtssystemen der DEA inhärent ist, da eine pareto-optimale (effiziente) Alternative als eine solche interpretiert werden kann, bezüglich derer ein Gewichtssystem existiert, so dass keine andere Alternative die effiziente bezüglich dieses Gewichtssystems übertrifft,
- gleichzeitig eine modellexterne Vorgabe von Gewichten nicht zwingend notwendig ist,
- sich aber andererseits der Entscheiderpräferenzen über Gewichtsbeschränkungen effektiv in das Modell integrieren lassen (30).

Es sei darauf hingewiesen, dass das hier verwendete Modell unterstellt, dass auch Konvexkombinationen zulässiger Handlungsalternativen wiederum zulässige Handlungsalternativen sind. Die Sinnhaftigkeit dieser Annahme für unser Beispiel ergibt sich, weil in dem zu untersuchenden Problem eine Wahl zwischen Produktionsalternativen betrachtet wird. Für andere Fragen müssten entsprechend andere Basismodelle der DEA verwendet werden (6), (18), (24).

In dem hier verwendeten Verfahren werden in einem ersten Schritt alle pareto-optimalen Handlungsalternativen bestimmt, in dem für jede zulässige Handlungsalternative ein geeignetes Problem der linearen Optimierung gelöst wird, wobei die Höhe des Zielfunktionswertes darüber entscheidet, ob die untersuchte Handlungsalternative pareto-optimal ist.

Um zu einer weiteren Diskriminierung zwischen den pareto-optimalen Handlungsalternativen die Gewichtsparameter der Zielfunktionsdimension bestimmen zu können, werden danach die Vektoren der Zielfunktionswerte der effizienten Handlungsalternativen transformiert und aus diesen transformierten Werten die Gewichte berechnet. Mit Hilfe dieser Gewichte wird dann in einem dritten Schritt für jede pareto-optimale Handlungsalternative deren Bewertung ermittelt. Die Übersicht 5 fasst diese Vorgehensweise zusammen.

Übersicht 5: DEA-Algorithmus zur Lösung des MCDM-Problems

Gegeben seien die Definitionen der Übersicht 1.

a) Für alle $\bar{p} = 1, \dots, \bar{P}$ löse das Problem:

$$a1) \sum_{i=1}^I z_i^{\bar{p}} + \sum_{j=1}^J z_{I+j}^{\bar{p}} := \bar{E}^{\bar{p}} = \text{MAX}$$

$$a2) \bigwedge_{l=1}^I \sum_{p=1}^{\bar{P}} d_p^{\bar{p}} \cdot x_l^p + z_l^{\bar{p}} = x_l^{\bar{p}}$$

$$a3) \bigwedge_{j=1}^J \sum_{p=1}^{\bar{P}} d_p^{\bar{p}} \cdot y_j^p - z_{I+j}^{\bar{p}} = y_j^{\bar{p}}$$

$$a4) \bigwedge_{i=1}^I z_i^{\bar{p}} \geq 0, \quad \bigwedge_{j=1}^J z_{I+j}^{\bar{p}} \geq 0$$

$$a5) \sum_{p=1}^{\bar{P}} d_p^{\bar{p}} = 1, \quad \bigwedge_{p=1}^{\bar{P}} d_p^{\bar{p}} \geq 0$$

Es gilt:

$$\bar{p} \text{ ist pareto-optimal} \Leftrightarrow \bar{E}_{\bar{p}} = 0$$

b) Seien o. B. d. A. $p = (1, \dots, P)$ die pareto-optimalen Handlungsalternativen. Definiere:

$$b1) \bigwedge_{i=1}^I x_i \max := \text{MAX} \left(\left(x_i^p \right)_{p=1}^P \right)$$

$$b2) \bigwedge_{p=1}^P \bigwedge_{k=1}^K w_k^p := x_k \max - x_k^p$$

$$b3) \bigwedge_{p=1}^P \bigwedge_{k=I+1}^{K:=I+J} w_k^p := y_{k-I}^p$$

$$b4) \bigwedge_{k=1}^K w_k \max := \text{MAX} \left(\left(w_k^p \right)_{p=1}^P \right)$$

$$b5) \bigwedge_{k=1}^K w_k \min := \text{MIN} \left(\left(w_k^p \right)_{p=1}^P \right)$$

$$b6) \bigwedge_{k=1}^K g_k := \left[(w_k \max - w_k \min) \cdot \left[1 + \sum_{k=1}^K \left(\frac{w_k \min}{w_k \max - w_k \min} \right) \right] \right]^{-1}$$

c) Mit Hilfe der Gewichte g_k bestimmt man die Bewertung E_p zu: $\bigwedge_{p=1}^P E_p := \frac{\sum_{j=1}^J g_{I+j} \cdot y_j^p}{\sum_{i=1}^I g_i \cdot x_i^p}$

Es gilt:

$$p_1 \text{ ist } p_2 \text{ vorzuziehen} \Leftrightarrow E_{p_1} > E_{p_2}$$

Für den Sonderfall ausschließlich zu minimierender Ziele können mit Hilfe der Gewichte die pareto-optimalen Handlungsalternativen nach absteigendem Nenner des Bruches für E_p sortiert werden, bei nur zu maximierenden Zielen nach dem aufsteigenden Zähler des Bruches.

4. Ökonomisch-ökologische Bewertung unterschiedlicher Betriebsstättengrößen von Molkereien

Der zunehmende Wettbewerbsdruck und der hohe Konzentrationsgrad im Lebensmitteleinzelhandel führen auch im Molkereibereich zu größeren Unternehmen und damit ceteris paribus tendenziell größeren durchschnittlichen Transportstrecken in Milcherfassung und Produktvertrieb. Die veränderten gesellschaftlichen Wertvorstellungen bringen eine verstärkte Diskussion auch der ökologischen Folgen dieser Entwicklung (14), (19) mit sich. Diese ökologischen Folgen betrieblicher Entscheidungen können durch Ökobilanzen beschrieben werden (27), (32). Im Rahmen einer

umweltorientierten Betriebswirtschaft gilt es dann, die Bewertung der ökologischen und ökonomischen Folgen zusammenzuführen (13). Hierbei ergeben sich jeweils mehrdimensionale Bewertungs- bzw. Entscheidungsprobleme, weil allein die Ergebnisse der ökologischen Fragestellungen mehrdimensional dargestellt werden.

Das Institut für Ökonomie der Ernährung der Bundesanstalt für Milchwirtschaft bearbeitet die Fragen nach den besonderen Umweltauswirkungen unterschiedlicher Betriebsstättengrößen in der Molkereiwirtschaft im Rahmen des Forschungsprojekts „Betriebsgrößenabhängige ökonomische und ökologische Analyse der Erfassung, Be- und Verarbeitung und Distribution von Milch und Milchprodukten“. Da es dabei auch um die Prognosen der Auswirkungen möglicher zukünftiger Entwicklung geht, werden die benötigten Daten in Modellen zusammengefasst, die ausgehend von durch statistische Erhebungen begründeten Produktionsprogrammen sowie Milcherfassungs- und Vertriebsstrukturen mit Hilfe mathematischer Modelle und den Daten der Modellabteilungsrechnung des Instituts die Simulation der diversen ökologischen und ökonomischen Folgen unterschiedlicher Betriebsstättengrößen erlauben.

Die dabei verwendete Methodik der Ökobilanzen bildet die Stoff- und Energieströme in den Bereichen Milcherfassung, Produktion und Vertrieb von Molkereiprodukten in Sachbilanzen ab, wobei die Auswirkungen in den verschiedenen Dimensionen hierbei jeweils zu Äquivalenten bezüglich eines bestimmten Leitstoffs aggregiert werden. Die in der Ökobilanzierung dann folgenden Arbeitsschritte Wirkungsabschätzung und Bewertung zum Vergleich alternativer Betriebsstättengrößen ist simultan bezüglich aller betrachteten Auswirkungsdimensionen und in ihrer Methodik stark subjektiv geprägt. Das hier dargestellte Verfahren soll einen Beitrag zur methodischen Weiterentwicklung dieser Arbeitsschritte bilden, kann darüber hinaus aber auch für beliebige andere Probleme des MCDM eingesetzt werden.

Das vorgestellte Entscheidungsmodell wird jedoch nicht an bezüglich der realen Situation relevanten Daten demonstriert. Dies hat mehrere Gründe:

- Die zur Bereitstellung dieser realitätsbezogenen Daten notwendigen Arbeiten sind zur Zeit noch nicht abgeschlossen, so dass nur vorläufige, unvollständige und damit unter Umständen die Realität verzerrende Informationen zur Verfügung ständen.
- Im Rahmen des laufenden Forschungsprojektes werden im nächsten Arbeitsschritt zunächst allein die ökologischen Folgen unterschiedlicher Betriebsstättengrößen im Molkereisektor untersucht. Um die Wirksamkeit des hier entwickelten Algorithmus in seiner ganzen Breite vorzustellen, erscheint es jedoch sinnvoll, neben zu minimierenden (ökologischen) Zielen auch zu maximierende (ökonomische) Ziele zu integrieren.
- Realitätsbezogene Daten wären unter Umständen so strukturiert, dass wegen der hierdurch abgebildeten besonderen Situation gar nicht alle Möglichkeiten der darzustellenden Methodik hätten wirksam werden können. Beispiele in einer methodenbezogenen Arbeit wie dieser sollten jedoch dem Leser den Algorithmus in seiner ganzen Mächtigkeit zeigen.
- Wegen der Brisanz des zu Grunde liegenden Problems wäre nicht auszuschließen, dass im Mittelpunkt weiterer Betrachtung die realen Ergebnisse bezüglich des dargestellten Beispielsproblems und nicht die Wirksamkeit des Algorithmus gestanden hätte, was ebenfalls nicht im Sinne einer methodischen Arbeit ist.

Das hier verwendete Beispielsproblem wurde deshalb in Anlehnung an schon vorhandene Ergebnisse der dargestellten Untersuchung und Modellabteilungsrechnungsdaten konstruiert, aber im Hinblick auf die zuvor erwähnten Ziele in unter-

schiedlicher Weise abgeändert, so dass es nicht sinnvoll ist, aus den später dargestellten Modellergebnissen Schlüsse auf tatsächliche Handlungsempfehlungen zu ziehen.

In dem hier darzustellenden fiktiven Beispiel wurden für verschiedene Molkereibetriebsstättengrößen mit vorgegebenem Produktionsprogramm die ökologischen Auswirkungen in den Bereichen Treibhauspotential, Nährstoffeintrag, Sommersmogpotential, Verbrauch fossiler Energieträger und Versauerungspotential sowie bezüglich des zu erzielenden Deckungsbeitrags dargestellt. Alle Größen wurden pro Tonne Rohstoffeinsatz angegeben. Das Treibhauspotential wurde in Kilogramm CO₂-Äquivalenten, der Nährstoffeintrag in Kilogramm PO₄-Äquivalenten gemessen, das Sommersmogpotential in Kilogramm Ethen-Äquivalenten, der Verbrauch fossiler Energieträger in Kilogramm ROE, das Versauerungspotential in Kilogramm SO₂-Äquivalenten. Der Deckungsbeitrag wurde in Euro pro Tonne verarbeiteter Milch angegeben. Es wurde jeweils ein standardisiertes, in seinen Verhältnissen gleichbleibendes, Produktionsprogramm unterstellt, wobei 30 % des Rohstoffes zu Schnittkäse, hier Gouda, verarbeitet werden, 15 % zu Quark, 8 % zu pasteurisierter Milch, je 15 % zu Joghurt und H-Milch und die verbleibenden Fett- und Nichtfettreste zu 3 % der Butter- und 14 % der Magermilchpulverproduktion zugeführt wurden. Es sei darauf hingewiesen, dass sich die Prozentzahlen auf den Rohstoffeinsatz beziehen. Betriebsstättengrößen wurden mit Abständen von jeweils 50 000 Tonnen, beginnend bei 100 000 Tonnen bis hin zu 1 Mio. Tonnen Rohmilchverarbeitung pro Jahr, unterstellt. Die Tabelle 2 stellt die fiktiven Daten zusammen.

Tab. 2: Daten des MCDM-Problems zur Frage der Betriebsstättengröße vom Molkereien

Nr.	Rohstoffeinsatz 1000 t/J	Treibhaus- effekt kg CO ₂	Nährstoff- eintrag kg PO ₄	Sommer- smog kg Ethen	Foss. Energie kg ROE	Versau- erung kg SO ₂	DB Euro
1	100	105	0.00391	128	30	0.445	80
2	150	100	0.039	127	28.7	0.43	90
3	200	98	0.0389	126	28.4	0.413	98
4	250	95	0.0388	125	28.2	0.396	105
5	300	93	0.0387	125	28.1	0.393	110
6	350	92	0.0392	125	27.7	0.39	127
7	400	91.5	0.0396	126	27.8	0.388	128
8	450	91	0.0402	128	27.9	0.387	129
9	500	90.5	0.0408	129	28	0.388	130
10	550	90.5	0.0413	130	28.1	0.389	131
11	600	90.7	0.0416	131	28.2	0.39	132
12	650	90.9	0.0424	133	28.3	0.391	133
13	700	91.1	0.043	134	28.4	0.392	134
14	750	91.3	0.0436	135	28.5	0.393	135
15	800	91.4	0.0442	136	28.6	0.394	135
16	850	91.5	0.0446	137	28.7	0.395	135
17	900	91.6	0.0448	138	28.8	0.396	134
18	950	91.7	0.0449	139	29	0.397	134
19	1000	92	0.045	140	29.1	0.398	133

5. Umsetzung des Verfahrens und Darstellung der Ergebnisse

Zur Lösung des MCDM-Problems mit der vorgestellten Methodik ist im ersten Schritt für jede Handlungsalternative (im Beispiel für jede Molkereibetriebsstättengröße) zu prüfen, ob diese pareto-optimal ist. Hierzu ist jeweils ein geeignetes LP-Problem zu lösen. Da die Struktur dieser LP-Probleme gleich ist und die Daten ebenso weitgehend identisch sind, liegt hierin keine besondere Herausforderung, insbesondere, weil die jeweiligen LP-Probleme von geringer Dimension sind. Zur Umsetzung des gesamten Algorithmus wurden neben Excel, in dem die Daten gehalten wurden und die Gewichte zu ermitteln waren, das Programm XPRESS (10) eingesetzt. Alle Rechnungen lassen sich mit handelsüblichen PC's ohne erkennbaren Zeitaufwand durchführen. Die benötigten Entscheidungsdaten werden in einer Exceltabelle gehalten, in der auch Datenumformungen durchgeführt werden können. Die Eingabedaten lassen sich dann aus Excel exportieren und als Textdatei für XPRESS zur Verfügung stellen. In der Übersicht 6 ist die Struktur des LP-Problems in der XRESS-Sprache dargestellt.

Übersicht 6: XPRESS-Programm Ermittlung pareto-optimaler Betriebsstättengröße

! Multidimensionale Optimierung

let K = 1 ! Betriebsstättengröße, deren Paretooptimalität untersucht wird

let P = 19 ! Zahl der Molkereibetriebsstättengröße

let I = 5 ! Zahl der zu minimierenden Ziele

let J = 1 ! Zahl der zu maximierenden Ziele

tables

x(I, P) ! Zielfunktionskoeffizient Molkerei p bezüglich Ziel i (zu minimieren)

y(J, P) ! Zielfunktionskoeffizient Molkerei p bezüglich Ziel j (zu maximieren)

diskdata

x = xu.dat ! Textdatei mit den Koeffizienten der zu minimierenden Ziele

y = yu.dat ! Textdatei mit den Koeffizienten der zu maximierenden Ziele

variables

d (p=1:P) ! Gewichte, die die Konvexkombination zur Ermittlung der Pareto-Optimalität definieren

zi (i=1:I) ! Abweichungen in i der untersuchten Betriebsstätte zur Vergleichsbetriebsstätte

zj (j=1:J) ! Abweichungen in j der untersuchten Betriebsstätte zur Vergleichsbetriebsstätte

constraints

rziel : $\sum (i=1:I) 1*zi (i) + \sum (j=1:J) 1*zj (j) \$$! Summe der Abweichungen in Dimensionen i, j

ri (i=1:I) : $\sum (p=1:P) x (i, p)*d (p) + 1*zi (i) = x (i, K)$! Definition der Abweichung für Ziel i

$r_j (j=1:J) : \sum_{p=1:P} y(j, p) \cdot d(p) - 1 \cdot z_j(j) = y(j, K) \quad ! \text{ Definition der Abweichung für Ziel } j$

$rg : \sum_{p=1:P} d(p) = 1 \quad ! \text{ Konvexitätsbedingung für die Vergleichsbetriebsstätte}$

generate

Als Ergebnisse der jeweiligen Optimierungen ist nur die Zuordnung der unterschiedlichen Betriebsstättengrößen zur Kategorie pareto-optimal oder nicht pareto-optimal zu übernehmen, so dass dieses am einfachsten per Hand erfolgt. Die Datensätze für nicht pareto-optimale Betriebsstättengrößen werden aus einer vorbereiteten Excel-Tabelle entfernt, in der dann auf Basis der verbleibenden Datensätze die Gewichte und Bewertungen der entsprechenden Molkereibetriebsstättegrößen ermittelt werden können. Die Tabelle 3 zeigt die Struktur einer solchen Excel-Tabelle.

Tab. 3: Struktur einer Excel-Tabelle zur Ermittlung der Gewichte des MCDM

	A		E	F	G	...	L	M	N	O	P
1	i = 1	...	i = 5	i = 1	A21 - A1	...	E21 - E1	-	-	-	-
2	x(1,1)	...	x(5,1)	y(1,1)		...			F2 · F23	$L \sum_{G(2-25)}$	01/P1
...					
20	x(1,19)	...	x(5,19)	y(1,19)	A21 - A20		E21 - E 20	-	F19 · F23	$L \sum_{G(20-25)}$	020/P20
21	MAX(A2 : A20)	...		MAX(F2 : F20)	MAX(G2 : G 20)	...	MAX(L2 : L20)	-	-		
22	-	-	-	MIN(F2 : F20)	MIN(G2 : G20)	...	MIN(L2 : L20)	-	-		
23	-	-	-	F21 - F22	G21 - G22	...	L21 - L22	-	-		
24	-	-	-	F22/F23	G22/G23	...	L22/L23	$L \sum_{F(24)}$	-		
25	-	-	-	1/(F24 · M24)	1/(G24·M24)	...	1/(L24 · M24)	-	-	-	Gewichte

↑ Eingabedaten nur für pareto-optimale Betriebsstätten ↑ transformierte Eingabedaten ↑ Bewertung

Für die hier verwendeten Beispieldaten wird deutlich, dass weder sehr kleine noch sehr große Molkereibetriebsstätten als optimal im Sinne des Entscheidungsproblems bezeichnet werden können, weil sie jeweils durch andere Molkereibetriebsstätten dominiert werden. In der Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Prüfung auf Pareto-Optimalität dargestellt.

Es sei an dieser Stelle noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, dass hier unterstellt wurde, dass auch die Konvexkombination von Handlungsalternativen wiederum zulässige Handlungsalternativen sind, dass also die Produktionssituation im Molkereiwesen der gestalt ist, dass auch Konvexkombinationen der dargestellten Produktionsalternativen wiederum zulässige Produktionsalternativen sind. Mit Hilfe der zuvor erwähnten Excel-Tabelle lassen sich nunmehr die Gewichtungen für die einzelnen Zieldimensionen ermitteln. Diese sind in der Tabelle 5 dargestellt.

Die durch das Verfahren ermittelten Gewichtungen sind abhängig von den jeweiligen Dimensionen, in denen die einzelnen Zielgrößen gemessen werden und von den konkreten, hier nur fiktiven, Inputdaten. Es sei deshalb ausdrücklich darauf hingewiesen, dass dieses keine allgemeinen Bewertungen für die unterschiedlichen Zielkategorien sind. Sie gelten nur für das hier dargestellte Beispiel mit den hier unterstellten fiktiven Werten.

Tab. 4: Pareto-Optimalität der verschiedenen Molkereibetriebsstättengrößen

Nr.	Pareto-Optimalität	dominiert durch
1	nein	$0,2 \cdot p_5 + 0,8 \cdot p_6$
2	nein	$0,4 \cdot p_5 + 0,6 \cdot p_6$
3	nein	$0,6 \cdot p_5 + 0,4 \cdot p_6$
4	nein	$0,8 \cdot p_5 + 0,2 \cdot p_6$
5	ja	-
6	ja	-
7	ja	-
8	ja	-
9	ja	-
10	ja	-
11	ja	-
12	nein	$\frac{2}{3} \cdot p_{11} + \frac{1}{3} \cdot p_{14}$
13	nein	$\frac{1}{3} \cdot p_{11} + \frac{2}{3} \cdot p_{14}$
14	ja	-
15	nein	$1 \cdot p_{14}$
16	nein	$1 \cdot p_{14}$
17	nein	$\frac{1}{3} \cdot p_{11} + \frac{2}{3} \cdot p_{14}$
18	nein	$\frac{1}{3} \cdot p_{11} + \frac{2}{3} \cdot p_{14}$
19	nein	$\frac{2}{3} \cdot p_{11} + \frac{1}{3} \cdot p_{14}$

Tab. 5: Gewichte für die Bewertung der verschiedenen Molkereibetriebsstättengrößen

Variable	Zielfunktion	Gewicht
x(1,...)	Treibhauspotential	0,07407
x(2,...)	Nährstoffeintrag	37,79
x(3,...)	Sommersmog	0,01852
x(4,...)	Energieverbrauch	0,2315
x(5,...)	Versauerungspotential	30,86
y(1,...)	Deckungsbeitrag	0,007407

Mit Hilfe dieser Gewichte lassen sich dann die Wertungen der einzelnen pareto-optimalen Molkereibetriebsstättengrößen ermitteln. Diese sind in der Tabelle 6 dargestellt.

Tab. 6: Bewertungen der pareto-otimalen Molkereibetriebsstättengrößen

Nr.	zu maximierendes Ziel	zu minimierendes Ziele	Bewertung	Rang
5	0,8148	29,30	0,02781	8
6	0,9407	29,06	0,03237	7
7	0,9481	29,02	0,03267	6
8	0,9556	29,03	0,03291	5
9	0,9630	29,09	0,03310	4
10	0,9704	29,18	0,03325	3
11	0,9778	29,28	0,03339	2
14	1	29,64	0,03374	1

Es wird deutlich, dass in dem hier dargestellten fiktiven Beispiel die größte pareto-optimale Betriebsstättengröße Nr. 14 mit einer jährlichen Verarbeitungsmenge von 750.000 t Rohmilch am besten bewertet wird. Die übrigen pareto-optimalen Molkereibetriebsstättengröße folgen sortiert nach absteigender Verarbeitungsmenge. Die Übersicht macht aber auch deutlich, dass die Bewertungsunterschiede zwischen den effizienten Molkereibetriebsstätten relativ gering sind, so dass in einem praktischen Problem alle pareto-optimalen Entscheidungen als weitgehend gleichwertig anzusprechen wären. Wäre man nur an einer Bewertung hinsichtlich der ökologischen Kriterien interessiert, so wären ausschließlich die zu minimierenden Ziele zu beachten. Hierbei würde sich das Bewertungsergebnis gerade umkehren, in dem die kleinste pareto-optimale Molkereibetriebsstätte Nr. 5 mit 300.000 t jährlicher Verarbeitungsmenge die beste wäre und die übrigen pareto-optimalen Molkereibetriebsstätten, sortiert nach wachsender Verarbeitungsmenge, folgen würden. Auch in diesem Fall wären jedoch die Unterschiede zwischen den Molkereibetriebsstätten relativ gering zu bewerten. Wäre man ausschließlich an der ökonomischen Bewertung der Molkereibetriebsstättengrößen interessiert, so wären nur die zu maximierenden Ziele zu beachten, wobei wiederum die Molkereibetriebsstätte 14 am besten bewertet würde. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Molkereibetriebsstättengrößen sind jedoch bezüglich dieses Kriteriums deutlich größer als bezüglich der zwei zuvor diskutierten.

Das hier dargestellte Verfahren hat somit das MCDM-Problem bezüglich der ökonomischen und ökologischen Bewertung verschiedener Molkereibetriebsstättengrößen vollständig gelöst, indem in einem ersten Schritt alle pareto-optimalen Molkereibetriebsstättengrößen ermittelt wurden und bezüglich dieser an die einem zweiten Schritt einer Reihung erfolgte. Es sei allerdings nochmals darauf hingewiesen, dass die ermittelten Gewichte nur als Heuristik zu betrachten sind, so dass die hier vorgenommene Reihung der pareto-optimalen Handlungsalternative als eine Hilfe bei deren vergleichender Verurteilung, nicht als abschließendes und nicht mehr zu diskutierendes Urteil zu bewerten ist. Außerdem sei nochmals daran erinnert, dass es sich hier um ein fiktives Beispiel handelt, so dass die Ergebnisse nicht als Basis für reale Handlungsempfehlungen taugen.

6. Weiterer Forschungsbedarf

Zur Beurteilung der Wirksamkeit der dargestellten Verfahrensweise erscheint es neben ihrer Erprobung an anderen Beispielen und dem Vergleich mit konventionellen Methoden des MCDM wichtig, auch zu überprüfen, inwieweit alternative DEA-Methoden wie z. B. die Cross-Evaluation und ähnliche Verfahren (12), (21), (22) zu vergleichbaren oder besseren Ergebnissen beitragen können, wenn man sie entsprechend als MCDM-Verfahren konfiguriert. Wegen der gerade im ökologischen Bereich oft nur qualitativ ausgesprochenen Werturteile ist es darüber hinaus auch von Interesse, zu überprüfen, ob auch für MCDM-Probleme mit nur ordinal skalierten Daten eine entsprechende Übertragung von DEA-Methodiken (siehe auch (7), (8), (9), (20)) möglich ist. Auch die Einbeziehung von Vagheiten in den Eingabedaten durch stochastische oder Fuzzy-Set-Methoden (32) könnte zu einer weiteren Erhöhung der Praxistauglichkeit des hier dargestellten MCDM-Verfahrens beitragen. Schließlich wäre zu prüfen, wie in einem Fall, bei dem im Unterschied zu den hier vorgestellten Annahmen bezüglich der einzelnen Zieldimensionen schon Gewichtungsvorstellungen der Entscheidungsträger bestehen, diese Gewichtungsvorstellungen in den Entscheidungsprozess integriert werden können. Für eine solche Vorgehensweise erscheint der hier gewählte Weg des Einsatzes von DEA-Verfahren als besonders geeignet, weil in DEA-Verfahren solche Vorstellungen durch entsprechende Gewichtsbeschränkungen (1), (2) zwanglos integriert werden können. Insgesamt macht die hier vorgestellte Untersuchung deutlich, dass die bisher gerade im ökologischen Bereich gewählte, weitgehend durch subjektive Werturteile und nicht mehr begründete Vereinbarungen gestützte Vorgehensweise durch Verfahren des MCDM zumindest teilweise objektiviert werden kann.

7. Literatur

- (1) Adler, N.; Friedman, L.; Sinuany-Stern, Z.: Review of Ranking Methodes in the Data Envelopment Analysis Context. *European Journal of Operational Research* **140** 249-265 (2002).
- (2) Angulo-Meza, L.; Lins, M.P.E.: Review of Methods for Increasing Discrimination in Data Envelopment Analysis. *Annals of Operations Research* **116** 225-242 (2002).
- (3) Ballester, E.: Measuring Efficiency by a Single Price System. *European Journal of Operational Research* **15** 616-623 (1999).
- (4) Ballester, E.; Romero, C.: Weighting in Compromise Programming: A Theorem on Shadow Prices. *OR Letters* **13** (5) 325-329 (1993).
- (5) Chankong, V.; Haimes, Y. Y.: *Multiobjective Decision Making ...* North Holland Verlag, New York (1983).
- (6) Coelli, T.; Rao, D. S. P.; Battese, G. E.: *An Introduction to Efficiency and Produktivity Analysis*. Kluwer Verlag, Boston ... (2002).
- (7) Cook, W. D.; Doyle, J.; Green, R.; Kress, M.: Ranking Players in Multiple Tournaments. *Computers and Operations Research* **23** (9) 869-880 (1996).
- (8) Seiford, L. M.: Data Envelopment Analysis in the Presence of both Quantitative and Qualitative Factors. *Journal of the Operational Research Society* **47** (7) 954-953 (1996).
- (9) Cook, W.; Kress, M.: Multiple Criteria Decision Model with Ordinal Preference Data. *European Journal of Operational Research* **54** (2) 191-198 (1991).
- (10) Dash Associates: *XPRESS-MP Reference Manual*. Dash Associates Blinsworth (UK). (1999).
- (11) Doyle, J. R.; Green, R. H.: Data Envelopment Analysis and Multiple Decision Making. *OMEGA* **21** (6) 713-715 (1993).
- (12) Green, R. H.; Doyle, J. R.; Cook, W. D.: Preference Voting and Projekt Ranking using DEA and Cross-Evaluation. *European Journal of Operational Research* **90** (3) 461-472 (1996).
- (13) Hansmann, K.-W. (Hrsg.): *Umweltorientierte Betriebswirtschaftslehre*. Gabler Verlag, Wiesbaden (1998).

- (14) Höper, U.; Jürgensen, M.; Hargens, R.; Groß, K.-U.; Hülsemeyer, F.: Unternehmensgrößenabhängige ökonomische und ökologische Auswirkungen bei Erfassung, Be- und Verarbeitung und Distribution von Milch und Milchprodukten. *Agrarspectrum* 30 115-129 DLG Verlag Frankfurt Main (2000).
- (15) Jansen, J.: On the Use of Multi-Criteria Analysis in Environmental Impact Assessment in the Netherlands. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 10 101-109 (2001).
- (16) Joro, T.; Korhonen, P.; Wallenius, J.: Structural Comparison of Data Envelopment Analysis and Multi Objective Linear Programming. *Manage. Sci* 44 (7) 962-970 (1998).
- (17) Kleine, A.: Data Envelopment Analysis aus entscheidungstheoretischer Sicht. *OR Spektrum* 23 (2) 223-242 (2001).
- (18) Kleine, A.: DEA-Effizienz. DUV, Wiesbaden (2002).
- (19) Klewin, P.: Vortrag: Umweltbilanzen für Molkereien unterschiedlicher Betriebsstättengrößen. Milchkonferenz 20.-21.09.2001, Berlin.
- (20) Lansdowne, Z. F.: Ordinal Ranking Methods for Multicriteria Decision Making. *Naval Research Logistics* 43 613-627 (1996).
- (21) Li, S.-B.; Reeves, G. R.: A Multiple Criteria Approach to Data Envelopment Analysis. *European Journal of Operational Research* 115 507-517 (1999).
- (22) Mehrabian, S.; Alirazae, M. R.; Jahanshaloo, G. R.: A Complete Efficiency Ranking of Decision Making Units in Data Envelopment Analysis. *Computational Optimisation and Applications* 14 261-266 (1999).
- (23) Müller, B.: Entscheidungsunterstützung bei mehrfacher Zielsetzung mit Goal-Programming – Darstellung am Beispiel der kurzfristigen Produktionsprogrammplanung für Molkereien. *Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte* 50 (4) 299-317 (1998).
- (24) Müller, B.: Effizienzmessung in der Molkereiwirtschaft mittels Data Envelopment Analysis (DEA). *Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte* 52 (4) 355-378 (2000).
- (25) Müller, B.: Ranking technisch effizienter Prozesse im Rahmen der Data Envelopment Analysis (DEA) an Fallbeispielen der Molkereiwirtschaft. *Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte* 55 (2) 89-105 (2003).
- (26) Sarkis, J.: A Comparative Analysis of DEA as a Discrete Alternative Multicriteria Decision Tool. *European Journal of Operational Research* 123 (3) 543-557 (2000).
- (27) Schmitz, S. et al: Bewertung in Ökobilanzen. Texte 92/99 Umweltbundesamt Berlin (1999).
- (28) Seiford, L. M.: Data Envelopment Analysis: The Evolution and the State-of-the-Art. *Journal of Productivity Analysis* 7 99-137 (1996).
- (29) Steuer, R.; Gardiner, L. R.; Gray, J.: A Bibliographic Survey of Activities and International Nature of Multiple Criteria Decision Making. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 5 195-217 (1996).
- (30) Steward, T. J.: Relationships between Data Envelopment Analysis and Multicriteria Decision Analysis. *J. Oper. Res. Soc.* 46 (5) 654-665 (1996).
- (31) Takeda, E.; Sath, J.: A Data Envelopment Analysis Approach to Multicriteria Decision Problems with Incomplete Information. *Computers and Mathematics with Applications* 39 81-90 (2000).
- (32) Toll, A.: Modellierung von Vagheiten im Prozess der Ökobilanzen. Dissertation der Fakultät für Geowissenschaften TU Freiberg (2000).
- (33) Viennet, R.; Fonteix, C.; Marc, I.: Multicriteria Optimisation Using a Genetic Algorithm for Determining a Pareto Set. *International Journal of System Science* 27 (2) 255-260 (1996).
- (34) Weber, K.: Mehrkriterielle Entscheidungen. Oldenbourg Verlag, München ... (1993).
- (35) Zimmermann, H.-J.; Gutsche, L.: Multi-Criteria Analyse. Springer Verlag, Berlin ... (1991).

8. Zusammenfassung

Müller, B.: **Entscheidungen bei mehrfacher Zielsetzung mittels Data Envelopment Analysis am Beispiel von Ökobilanzen für die Molkereiproduktion.** Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte **55** (3) 233-253 (2003)

29 Ökonomie der Molkereiwirtschaft (Ökobilanzen, Planung)

Die durch den zunehmenden Wettbewerbsdruck verursachte Konzentration im Molkereibereich führt tendenziell auch zu größeren Betriebsstätten. Daraus stellt sich die Frage, ob die hierdurch verursachten längeren Transportwege für Rohstoffe und Fertigprodukte auch zu einer verstärkten Umweltbelastung führen. Mit Hilfe von Ökobilanzen kann man die Auswirkungen unterschiedlich großer Molkereibetriebsstätten in den verschiedenen ökologisch relevanten Dimensionen wie Rohstoffverbrauch, Belastung der Luft etc. beschreiben. Eine zusammenfassende Bewertung solcher Beschreibungen, u. U. unter Einschluss auch der ökonomischen Folgen, erfordert die simultane Berücksichtigung mehrerer Zieldimensionen im Rahmen eines Multi-Criteria-Decision-Making. Zur methodischen Weiterentwicklung der hier bisher verwendeten mehr subjektiven Verfahren wird der Einsatz einer Methodik aus der Data Envelopment Analysis dargestellt und an einem Beispiel unterschiedlich großer Modellmolkereien umgesetzt. Hierbei wird in einem ersten Schritt die Gesamtheit aller pareto-optimalen Problemlösungen ermittelt und diese werden in einem zweiten Schritt mit Hilfe von Zielgewichten angeordnet. Diese Zielgewichte lassen sich als Normierungen bezüglich der unterschiedlichen Zielmessdimensionen darstellen und erfüllen gleichzeitig die Funktion von Schattenpreisen eines einfachen Entscheidungsproblems. Das dargestellte Verfahren löst das Beispielsproblem vollständig und ist darüber hinaus für viele weitere Fragestellungen im Rahmen des MCDM einsetzbar.

Summary

Müller, B.: **Multi criteria decision making using Data Envelopment Analysis at the example of life cycle analysis for dairy production.** Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte **55** (3) 233–253 (2003)

29 Economics of the dairy sector (ecobalances, planning)

One side effect of the concentration in the dairy sector caused by increasing competition is the creation of larger production holdings. The question arises whether the longer transport distances for raw materials and end products also lead to higher environmental pollution. Life cycle analysis is a good instrument for describing the effects of the dairy factory capacity on ecologically relevant parameters like raw material consumption, air pollution/emissions, etc.. For a summarizing assessment of such descriptions, possibly including ecological effects, several goal dimensions have to be taken into account within the frame of a Multi-Criteria-Decision-Making. For a methodical improvement of the more or less subjective methods applied up to now the use of a methodology from the Data Envelopment Analysis is presented and implemented at the example of model dairies of different sizes. In a first step all pareto-optimal problem solutions are detected to be classified in a second step with the aid of goal weights. These goal weights can be represented by scaling the different goal measuring dimensions. Simultaneously

they fulfill the function of opportunity costs of a simple decisional problem. The represented method delivers a complete solution of the exemplary problem and can be used for further issues in the frame of MCDM .

Résumé

Müller, B.: **Décisions en cas d'objectifs multiples à l'aide de Data Envelopment Analysis (DEA) à l'exemple de balances écologiques pour la production laitière.** Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte **55** (3) 233-253 (2003).

29 Economie du secteur laitier (balances écologiques, planification)

Un des résultats de la pression croissante exercée par la compétition dans le secteur laitier est la tendance d'agrandir la taille des lieux de production laitière. Il en résulte la question si les chemins de transport devenus plus longs pour les matières premières et les produits finis mènent également à une augmentation de la pollution. Les balances écologiques permettent à décrire les effets qu'ont des lieux de production laitière de taille différente sur les différents paramètres écologiques relevants comme la consommation de matières premières, la pollution de l'air, etc.. Une évaluation définitive de telles descriptions, tenant compte sous certaines conditions de l'impact environnemental, doit simultanément prendre en considération plusieurs dimensions d'objectifs dans le cadre de la méthode multicritère d'aide à la décision (Multi-Criteria-Decision-Making). Dans le but de développer la méthodologie des procédures plutôt subjectives appliquées jusqu'à présent l'application d'une méthodologie provenant de DEA (Data Envelopment Analysis) est représentée et mise en pratique à l'exemple de laiteries modèles de taille différente. Lors d'une première étape, toutes les solutions paréto-optimales sont déterminées pour ensuite être classées à l'aide de coefficients de pondération lors d'une deuxième étape. Ces coefficients de pondération peuvent être représentés sous forme de mise en échelle des différentes dimensions de mesure des objectifs et remplissent en même temps la fonction des coûts d'opportunité d'un simple problème de décision. La procédure représentée fournit une solution complète pour le problème exemplaire et peut être appliquée pour beaucoup d'autres problèmes dans le cadre de MCDM.