

# **Institut für Produktion und Industrielles Informationsmanagement**

Universität Duisburg-Essen / Campus Essen  
Fachbereich Wirtschaftswissenschaften  
Universitätsstraße 9, 45141 Essen  
Tel.: ++ 49 (0) 201 / 183 - 4007  
Fax: ++ 49 (0) 201 / 183 - 4017

Arbeitsbericht Nr. 33

## **Effizienz-Analyse unter Berücksichtigung von Satisfizierungsgrenzen für Outputs – Die Effizienz-Analysetechnik EATWOS**

Dipl.-Kfm. Malte L. Peters

Univ.-Prof. Dr. Stephan Zelewski



{ malte.peters | stephan.zelewski }@pim.uni-due.de

Internet: <http://www.pim.uni-due.de>

ISSN 1614-0842

Essen 2006  
Alle Rechte vorbehalten.

## **Zusammenfassung**

Im Allgemeinen wird im Rahmen von Effizienz-Analysen angenommen, dass es wünschenswert ist, ein maximales Verhältnis zwischen generierten Outputquantitäten und den hierfür eingesetzten Inputquantitäten zu erreichen. Demgegenüber steht das Konzept der Satisfizierung. Herbert A. Simon wurde unter anderem für dieses Konzept mit dem Nobelpreis für Ökonomie ausgezeichnet. Nach diesem Konzept suchen Entscheidungsträger in der Regel eher nach zufrieden stellenden Lösungen als nach optimalen Lösungen. Wenn Simons Konzept auf Effizienz-Analysen angewendet wird, folgt daraus, dass eine Outputquantität, die einer bestimmten Satisfizierungsgrenze entspricht, als genau so gut beurteilt wird wie eine Outputquantität, die diese Satisfizierungsgrenze übersteigt. Im vorliegenden Arbeitsbericht wird die relativ neue Effizienz-Analysetechnik EATWOS (Efficiency Analysis Technique With Output Satisficing) vorgestellt. Diese Effizienz-Analysetechnik ermöglicht die Berücksichtigung von Satisfizierungsgrenzen für Outputquantitäten.

## **Abstract**

In general, efficiency analysis techniques assume that it is desirable to achieve a maximum ratio between the achieved output quantities and the employed input quantities. However, Herbert A. Simon received the Nobel Prize in economics partly for the concept of “satisficing”. This concept means that decision makers are searching for satisfactory solutions rather than optimal solutions. If Simon’s concept is applied to efficiency analysis, it follows that an output quantity meeting a certain satisficing level may be judged to be just as good as an output quantity exceeding this satisficing level. In the paper at hand, the relatively new efficiency analysis technique EATWOS (Efficiency Analysis Technique With Output Satisficing) is presented. This technique offers the opportunity to consider satisficing levels for output quantities.

## **Inhaltsüberblick**

Abkürzungs- und Akronymverzeichnis .....	III
Symbolverzeichnis .....	IV
Abbildungsverzeichnis .....	VI
Tabellenverzeichnis.....	VII
1 Problemstellung und Aufbau .....	1
2 Effizienz.....	3
3 Die Effizienz-Analysetechnik EATWOS .....	4
3.1 Vorgehensmodell zur Anwendung von EATWOS .....	4
3.2 Ermittlung der erforderlichen Parameter .....	6
3.3 Anwendung von EATWOS ohne Berücksichtigung von Satisfizierungsgrenzen..	7
3.4 Anwendung von EATWOS unter Berücksichtigung von Satisfizierungsgrenzen .	10
3.5 Identifizierung von Potenzialen zur Effizienzsteigerung .....	14
4 Fallbeispiel.....	18
4.1 Ermittlung der erforderlichen Parameter für die Effizienz-Analyse von Wärmebehandlungsöfen.....	18
4.2 Anwendung von EATWOS ohne Berücksichtigung der Satisfizierungsgrenze zur Effizienz-Analyse von Wärmebehandlungsöfen ....	24
4.3 Anwendung von EATWOS unter Berücksichtigung von Satisfizierungsgrenzen zur Effizienz-Analyse von Wärmebehandlungsöfen .....	26
4.4 Identifizierung von Potenzialen zur Effizienzsteigerung für den zweiten Wärmebehandlungsöfen .....	29
5 Fazit .....	31
Literatur.....	32

## Abkürzungs- und Akronymverzeichnis

AHP	Analytic Hierarchy Process
Aufl.	Auflage
DEA	Data Envelopment Analysis
d. h.	das heißt
Dipl.-Kfm.	Diplom-Kaufmann
Dr.	Doktor
EATWOS	Efficiency Analysis Technique With Output Satisficing
E-Mail	Electronic Mail
et al.	et alii
f.	folgende
ff.	fortfolgende
Hrsg.	Herausgeber
ISSN	International Standard Serial Number
Jg.	Jahrgang
No.	Number
Nr.	Nummer
o.O.	ohne Ort
o.V.	ohne Verfasser
OCRA	Operational Competitiveness Rating
S.	Seite
Tel.	Telefon
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
Univ.-Prof.	Universitätsprofessor
USA	United States of America
Vgl.	Vergleiche
Vol.	Volume
z. B.	zum Beispiel

## Symbolverzeichnis

$a_{ij}$	Quantität von Output $j$ von Entscheidungseinheit $i$ unter Berücksichtigung der Satisfizierungsgrenze $SG_j$
$a_j^*$	maximale normalisierte Outputquantität unter Berücksichtigung der Satisfizierungsgrenze $SG_j$
$\vec{a}_j$	Spaltenvektor der normalisierten Outputmatrix $\underline{A}$ für den Output $j$
$\underline{A}$	normalisierte Outputmatrix unter Berücksichtigung von Satisfizierungsgrenzen $SG_j$
$\underline{B}$	Paarvergleichsmatrix
$C.R.$	Consistency Ratio
$E_i$	Effizienzwert von Entscheidungseinheit $i$
$E_i^{SG}$	Effizienzwert von Entscheidungseinheit $i$ unter Berücksichtigung der Satisfizierungsgrenze $SG_j$
$i$	Entscheidungseinheiten $i = 1, \dots, I$
$j$	Outputs $j = 1, \dots, J$
$k$	Inputs $k = 1, \dots, K$
$ip_{ik}$	Abstandsmaß für Input $k$
$op_{ij}$	Abstandsmaß für Output $j$
$op_{ij}^{SG}$	Abstandsmaß for Output $j$ unter Berücksichtigung der Satisfizierungsgrenze $SG_j$
$r_{ij}$	normalisierte Quantität von Output $j$ für Entscheidungseinheit $i$
$r_j^*$	maximale normalisierte Outputquantität
$\vec{r}_j$	Spaltenvektor der normalisierten Outputmatrix $\underline{R}$ für den Output $j$
$\underline{R}$	normalisierte Outputmatrix
$R$	Rangordnung der relativen Effizienz der Entscheidungseinheiten
$R^{SG}$	Rangordnung der relativen Effizienz der Entscheidungseinheiten unter Berücksichtigung der Satisfizierungsgrenze $SG_j$
$s_{ik}$	normalisierte Quantität für Input $k$ von Entscheidungseinheit $i$
$s_k^*$	minimale normalisierte Inputquantität
$\vec{s}_k$	Spaltenvektor der normalisierten Inputmatrix $\underline{S}$ für den Input $k$

$\underline{S}$	normalisierte Inputmatrix
$SG$	Satisfizierungsgrenze für einen Output
$SG_j$	Satisfizierungsgrenze für Output $j$
$\vec{u}$	Prioritätenvektor
$v_j$	relatives Bedeutungsgewicht für Output $j$
$w_k$	relatives Bedeutungsgewicht für Input $k$
$x_1$	Inputquantität von Entscheidungseinheit 1
$x_2$	Inputquantität von Entscheidungseinheit 2
$x_{ik}$	Inputquantität für Input $k$ von Entscheidungseinheit $i$
$\underline{X}$	Inputmatrix
$y_1$	Outputquantität von Entscheidungseinheit 1
$y_2$	Outputquantität von Entscheidungseinheit 2
$y_{ij}$	Outputquantität für Output $j$ von Entscheidungseinheit $i$
$\underline{Y}$	Outputmatrix
$z_1, z_2$	logische Variablen

## **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1 : Vorgehensmodell zur Anwendung von EATWOS.....	5
Abbildung 2 : Schachtofen mit Stahlretorte.....	19
Abbildung 3 : Kammerofen mit Stahlretorte .....	19
Abbildung 4 : Beladung eines Schachtofens mit Stahlretorte.....	22
Abbildung 5 : Beladung eines Kammerofens mit Stahlretorte .....	22

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1 : Alternativen zur Variation der Input- und Outputquantität von Entscheidungseinheit 2.....	15
Tabelle 2 : Wärmebehandlungsöfen.....	18
Tabelle 3 : Verbrauch und Kosten der Gase und des Stroms pro Stunde .....	20
Tabelle 4 : Inputs und Outputs im Rahmen der Effizienz-Analyse .....	23
Tabelle 5 : Relative Bedeutungsgewichte der Inputs und Outputs .....	24



# 1 Problemstellung und Aufbau

In der Praxis stellt sich oftmals das Problem, dass die Effizienz von organisatorischen Einheiten, so genannten Entscheidungseinheiten, gemessen werden muss. Die Entscheidungseinheiten – wie beispielsweise Hochschulen, Filialen eines Handelsunternehmens oder Transportflugzeuge – lassen sich gewöhnlich durch mehrere Inputs und mehrere Outputs charakterisieren. In der Regel wird hierzu auf deterministische nicht-parametrische Effizienz-Analysetechniken – wie beispielsweise die *Data Envelopment Analysis (DEA)*<sup>1)</sup>, das *Operational Competitiveness Rating (OCRA)*<sup>2)</sup> und die *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)*<sup>3)</sup> – zurückgegriffen. Im Rahmen dieser Effizienz-Analysetechniken wird unterstellt, dass es wünschenswert ist, ein maximales Verhältnis zwischen den Outputquantitäten und den hierfür eingesetzten Inputquantitäten zu erreichen. Gemäß dem Konzept der Satisfizierung<sup>4)</sup> muss dies jedoch nicht zwingend so sein. Dieses Konzept geht auf SIMON zurück, der unter anderem hierfür den Nobelpreis erhielt. Das Konzept der Satisfizierung besagt im Wesentlichen, dass Entscheidungsträger oftmals eher zu zufriedenstellenden Lösungen als zu optimalen Lösungen tendieren. Im Hinblick auf Outputs wird gewöhnlich eine maximale Outputquantität als optimal erachtet. Gemäß SIMONS Konzept sind Entscheidungsträger jedoch oftmals mit niedrigeren Outputquantitäten satisfiziert. Wenn dieses Konzept in Effizienz-Analysen integriert wird, folgt daraus, dass eine Outputquantität, die einer bestimmten Satisfizierungsgrenze entspricht, als genau so gut beurteilt wird wie eine Outputquantität, die diese Satisfizierungsgrenze übersteigt.

Im vorliegenden Arbeitsbericht wird die Effizienz-Analysetechnik EATWOS (Efficiency Analysis Technique With Output Satisficing) vorgestellt<sup>5)</sup>. Im Rahmen dieser Analysetechnik wird SIMONS Konzept der Satisfizierung in die Effizienz-Analyse integriert, indem sie einem Anwender die Möglichkeit bietet, für jeden Output eine Satisfizierungsgrenze festzulegen. Darüber hinaus können mithilfe von EATWOS in bestimmten Fällen Potenziale zur Effizienzsteigerung aufgedeckt werden. Neben der Integration des Konzepts der Satis-

---

1) Vgl. CHARNES/COOPER/RHODES (1978); CHARNES/COOPER/RHODES (1981); CHARNES/COOPER/THRALL (1991); COOPER/SEIFORD/ZHU (2004); und ferner: DYCKHOFF/ALLEN (1999), S. 411 ff.; KLEINE (2004), S. 17 ff.

2) Vgl. PARKAN/WU (1998); PARKAN/WU (1999), S. 239 ff.; und ferner: JAYANTHI/KOCHA/SINHA (1999); PARKAN/WU (2000), S. 499 ff.

3) Vgl. HWANG/YOON (1981), S. 128 ff.; und ferner: AGRAWAL/KOHLI/GUPTA (1991), S. 1635 ff.; AGRAWAL/VERMA/AGARWAL (1992), S. 2727 ff.; JANIC (2003), S. 501 ff.

4) Vgl. z. B. SIMON (1979), S. 495 ff.

5) Vgl. PETERS/ZELEWSKI (2006).

fizierung in die Effizienz-Analyse weist EATWOS einen weiteren Vorzug gegenüber DEA und OCRA auf. Denn eine Voraussetzung für den nutzbringenden Einsatz dieser beiden Analysetechniken ist, dass ihre Anwender das Konzept der mathematischen Optimierung (wie z. B. Lineare und Quotientenprogrammierung) verstanden haben. Dieses Verständnis fehlt jedoch insbesondere in industriell und wenig ökonomisch geprägten Bereichen. In der Folge wird in praxi auf eine Anwendung dieser beiden Analysetechniken oftmals verzichtet und stattdessen auf simple Kosten-Nutzen-Analysen zurückgegriffen.

In Kapitel 2 werden zunächst Grundlagen zum Begriff der Effizienz erörtert. Alsdann wird in Kapitel 3 die Analysetechnik EATWOS vorgestellt. In Kapitel 4 wird EATWOS auf ein Praxisproblem angewendet. Schließlich werden in Kapitel 5 die Ergebnisse des vorliegenden Arbeitsberichts resümiert. Zudem wird ein Ausblick auf potenzielle Weiterentwicklungen gegeben.

## 2 Effizienz

Effizienz wird – wie eingangs erwähnt – als Verhältnis zwischen Outputquantitäten und den hierfür eingesetzten Inputquantitäten verstanden. Da im Rahmen von Effizienz-Analysen in der Regel mehrere eventuell unterschiedlich skalierte Inputs und Outputs berücksichtigt werden, müssen zum einen den Inputs und zum anderen den Outputs relative Bedeutungsgewichte zugeordnet werden.

Die Effizienz einer Entscheidungseinheit kann gemessen werden, wenn ein Vergleichsmaßstab bekannt ist. Im Fall *absoluter Effizienz* besteht dieser Vergleichsmaßstab in einer Produktionsfunktion<sup>6)</sup> – wie beispielsweise einer Cobb-Douglas-Produktionsfunktion<sup>7)</sup> – als effizientem Rand der Technologiemenge. Wenn die Technologiemenge unbekannt ist, können die Entscheidungseinheiten nur untereinander verglichen werden. Wenn beispielsweise die Effizienz von Filialen eines Handelsunternehmens gemessen werden soll, ist keine Produktionsfunktion gegeben, sodass die Effizienz nur durch einen Vergleich der Filialen untereinander ermittelt werden kann. Diese Art der Effizienz wird als *relative Effizienz* bezeichnet<sup>8)</sup>. Bei relativer Effizienz wird die Technologiemenge aus den berücksichtigten Entscheidungseinheiten partiell entwickelt. Im vorliegenden Arbeitsbericht wird ausschließlich relative Effizienz betrachtet.

---

6) Vgl. zu Produktionsfunktionen z. B. BLACKORBY/PRIMONT/RUSSELL (1978), S. 1 ff.; DYCKHOFF (1994), S. 89 ff.; GUTENBERG (1983), S. 303 ff.

7) Vgl. zur Cobb-Douglas-Produktionsfunktion z. B. DYCKHOFF (1994), S. 98.

8) Vgl. z. B. CHARNES/COOPER/RHODES (1978), S. 430; DYCKHOFF/ALLEN (1999), S. 415.

## **3 Die Effizienz-Analysetechnik EATWOS**

### **3.1 Vorgehensmodell zur Anwendung von EATWOS**

In Abbildung 1 ist das Vorgehensmodell zur Anwendung von EATWOS als Ablaufplan<sup>9)</sup> dargestellt. Durch die Hinterlegung des Ablaufplans mit vier grauen Quadrern wird in Abbildung 1 zudem illustriert, dass sich das Vorgehen in vier Schritte gliedert. In Schritt 1 werden die Parameter ermittelt, die zur Durchführung der Effizienz-Analyse erforderlich sind. Dieser Schritt beinhaltet keine Spezifika von EATWOS und sähe bei Vorgehensmodellen für andere Effizienz-Analysetechniken genauso oder zumindest ähnlich aus. Schritt 2 umfasst die Anwendung von EATWOS ohne Berücksichtigung von Satisfizierungsgrenzen und die Entscheidung darüber, ob Schritt 3 und 4 durchgeführt werden sollen. EATWOS kann also auch angewendet werden, wenn der Anwender keine Satisfizierungsgrenzen festlegen möchte. Die Schritte 3 und 4 sind jedoch jene, die EATWOS gegenüber anderen Effizienz-Analysetechniken auszeichnen, da diese die Berücksichtigung von Satisfizierungsgrenzen für Outputs bzw. die Ableitung von Effizienzerhöhungspotenzialen ermöglichen.

---

9) Vgl. zu (Programm-)Ablaufplänen: z. B. STAHLKNECHT/HASENKAMP (2005), S. 264 ff.

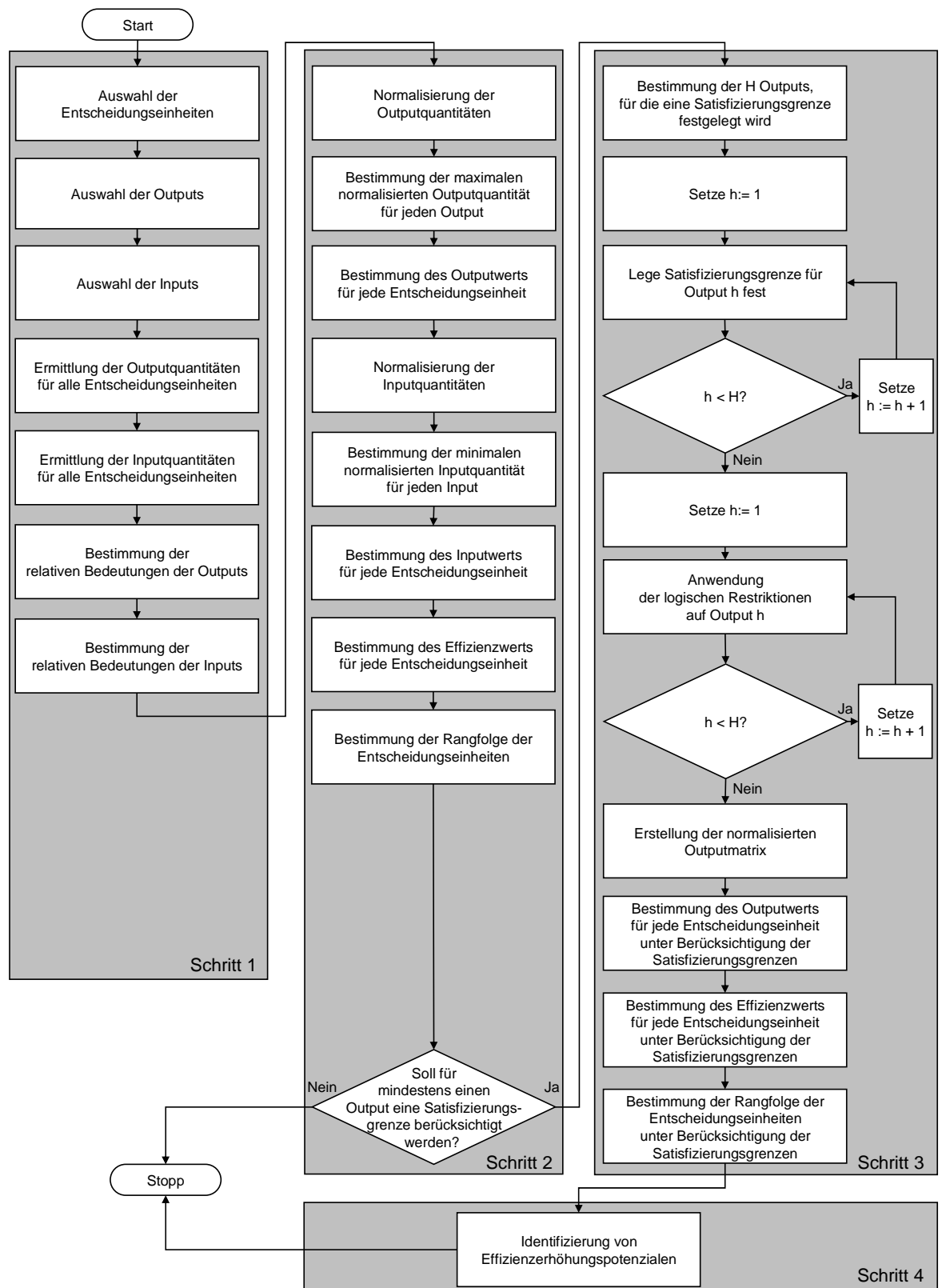


Abbildung 1: Vorgehensmodell zur Anwendung von EATWOS

### 3.2 Ermittlung der erforderlichen Parameter

Zunächst gilt es zu eruieren, welche Entscheidungseinheiten im Rahmen der Effizienz-Analyse betrachtet werden sollen. Darüber hinaus muss der EATWOS-Anwender entscheiden, durch welche Inputs und Outputs diese Entscheidungseinheiten charakterisiert werden sollen.

Alsdann muss der EATWOS-Anwender die Outputquantitäten  $y_{ij}$  und die Inputquantitäten  $x_{ik}$  für alle berücksichtigten Entscheidungseinheiten ermitteln. Die Quantitäten  $y_{ij}$  aller Outputs  $j$  ( $j=1,\dots,J$ ) werden für die Entscheidungseinheiten  $i$  ( $i=1,\dots,I$ ) in die Outputmatrix  $\underline{Y}$  eingetragen.

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1j} & \dots & y_{1J} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & & \dots & y_{2J} \\ \dots & \dots & & & & \dots \\ y_{i1} & y_{i2} & \dots & y_{ij} & \dots & y_{iJ} \\ \dots & \dots & & & & \dots \\ y_{I1} & y_{I2} & \dots & y_{Ij} & \dots & y_{IJ} \end{bmatrix} \quad \text{mit } y_{ij} \in \mathbb{R}_{\geq 0} \quad \begin{array}{l} \forall i = 1, \dots, I \\ \forall j = 1, \dots, J \end{array} \quad (1)$$

Jede Spalte der Outputmatrix  $\underline{Y}$  repräsentiert einen Output  $j$ , während jede Zeile einer Entscheidungseinheit  $i$  entspricht. Die Inputmatrix  $\underline{X}$  wird analog ermittelt.

$$\underline{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} & \dots & x_{1K} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & & \dots & x_{2K} \\ \dots & \dots & & & & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ik} & \dots & x_{iK} \\ \dots & \dots & & & & \dots \\ x_{I1} & x_{I2} & \dots & x_{Ik} & \dots & x_{IK} \end{bmatrix} \quad \text{mit } x_{ik} \in \mathbb{R}_{\geq 0} \quad \begin{array}{l} \forall i = 1, \dots, I \\ \forall k = 1, \dots, K \end{array} \quad (2)$$

Analog zur Outputmatrix entspricht jede Spalte der Inputmatrix  $\underline{X}$  einem Input  $k$  ( $k=1,\dots,K$ ), während jede Zeile eine Entscheidungseinheit  $i$  repräsentiert. EATWOS setzt voraus, dass Inputs und Outputs kardinal-skaliert sind. Wenn ordinal-skalierte Inputs und/oder Outputs berücksichtigt werden sollen, müssen die Input- und Outputquantitäten mit einer einfachen Scoring-Technik oder elaborierteren Techniken – wie beispielsweise

dem *Analytic Hierarchy Process (AHP)*<sup>10)</sup> – in kardinal-skalierte Ersatzgrößen transformiert werden.

Des Weiteren bietet EATWOS die Möglichkeit, für jeden Output  $j$  eine Satisfizierungsgrenze  $SG_j$  festzulegen. Wenn keine Satisfizierungsgrenzen berücksichtigt werden, kann ein Entscheider EATWOS anwenden, indem er nur Schritt 2 – der im nachfolgenden Kapitel 3.3 erörtert wird – durchführt und die Schritte 3 und 4 vernachlässigt. Darüber hinaus erfordert EATWOS, dass die relativen Bedeutungsgewichte  $v_j$  der Outputs und die relativen Bedeutungsgewichte  $w_k$  der Inputs ermittelt werden. Diese relativen Bedeutungsgewichte können – wie oben bereits erwähnt – mithilfe einer einfachen Scoring-Technik oder einer elaborierteren Technik – wie beispielsweise dem AHP – bestimmt werden.

### 3.3 Anwendung von EATWOS ohne Berücksichtigung von Satisfizierungsgrenzen

Schritt 2 des Vorgehensmodells<sup>11)</sup> besteht in der Anwendung von EATWOS ohne Berücksichtigung von Satisfizierungsgrenzen. Zunächst werden die Outputquantitäten  $y_{ij}$  normalisiert. Diese Normalisierung der Outputquantitäten erfolgt wie in der Technik TOPSIS<sup>12)</sup>.

$$\exists i \quad \exists j \quad y_{ij} \neq 0: \quad r_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^I y_{ij}^2}} \quad \forall i = 1, \dots, I \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (3a)$$

$$\forall i = 1, \dots, I \quad \forall j = 1, \dots, J \quad y_{ij} = 0: \quad r_{ij} = 0 \quad (3b)$$

Im Nenner von Gleichung (3a) wird  $y_{ij}$  quadriert, um zu vermeiden, dass der Nenner negativ wird und um Kompensationseffekte zwischen Termen mit  $y_{ij} < 0$  und  $y_{ij} > 0$  zu vermeiden. Als Ergebnis der Normalisierung ergibt sich die normalisierte Outputmatrix  $\underline{R}$ :

10) Vgl. SAATY (1994), S. 21 ff.; SAATY (2001), S. 5 ff.; SAATY (2004); und ferner: PETERS/ZELEWSKI (2002); PETERS/ZELEWSKI (2004), S. 297 ff.; ZELEWSKI/PETERS (2003).

11) Vgl. Abbildung 1, S. 5.

12) Vgl. HWANG/YOON (1981), S. 128 ff.; und ferner: AGRAWAL/KOHLI/GUPTA (1991), S. 1637; AGRAWAL/VERMA/AGARWAL (1992), S. 2727.

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1j} & \dots & r_{1J} \\ \dots & \dots & & \dots & & \dots \\ r_{i1} & r_{i2} & \dots & r_{ij} & \dots & r_{iJ} \\ \dots & \dots & & \dots & & \dots \\ r_{I1} & r_{I2} & \dots & r_{Ij} & \dots & r_{IJ} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Alsdann wird auf Basis der Spaltenvektoren  $\bar{r}_j$  der normalisierten Outputmatrix  $\underline{R}$  für jeden Output  $j$  die maximale normalisierte Outputquantität  $r_j^*$  ermittelt.

$$r_j^* = \max_i \{ \bar{r}_j \} \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (5)$$

Ebenso wie in zahlreichen bekannten Effizienz-Analysetechniken – wie DEA, OCRA und TOPSIS – wird auch im Rahmen von EATWOS auf Abstandsmaße zurückgegriffen. Die Abstandsmaße  $op_{ij}$  für Outputs werden mithilfe der normalisierten Outputmatrix  $\underline{R}$  und der maximalen normalisierten Outputquantitäten  $r_j^*$  bestimmt.

$$op_{ij} = 1 - (r_j^* - r_{ij}) \quad \forall i = 1, \dots, I \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (6)$$

Diese Outputabstandsmaße  $op_{ij}$  sind folgendermaßen zu interpretieren: Je geringer der Abstand von  $r_{ij}$  zu  $r_j^*$  ist, desto näher ist  $op_{ij}$  am Wert Eins. Eine Entscheidungseinheit mit der höchsten Outputquantität erhält ein Outputabstandsmaß in Höhe von Eins, während Entscheidungseinheiten mit geringeren Outputquantitäten geringere Outputabstandsmaße zwischen Null und Eins aufweisen. Die Outputabstandsmaße werden als Outputwerte bezeichnet.

Ebenso wie die Outputquantitäten müssen auch die Inputquantitäten normalisiert werden. Die Normalisierung erfolgt analog zu den Outputquantitäten.

$$\exists i \quad \exists k \quad x_{ik} \neq 0: \quad s_{ik} = \frac{x_{ik}}{\sqrt{\sum_{i=1}^I x_{ik}^2}} \quad \forall i = 1, \dots, I \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (7a)$$

$$\forall i = 1, \dots, I \quad \forall k = 1, \dots, K \quad x_{ik} = 0: \quad s_{ik} = 0 \quad (7b)$$

Alsdann lässt sich die normalisierte Inputmatrix  $\underline{S}$  analog zur normalisierten Outputmatrix bestimmen:



$$\underline{S} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1k} & \dots & s_{1K} \\ \dots & \dots & & \dots & & \dots \\ s_{i1} & s_{i2} & \dots & s_{ik} & \dots & s_{iK} \\ \dots & \dots & & \dots & & \dots \\ s_{I1} & s_{I2} & \dots & s_{Ik} & \dots & s_{IK} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Dann werden die minimalen normalisierten Inputquantitäten  $s_k^*$  für jeden Input  $k$  auf Basis der Spaltenvektoren  $\vec{s}_k$  der normalisierten Inputmatrix  $\underline{S}$  bestimmt.

$$s_k^* = \min_i \{ \vec{s}_k \} \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (9)$$

Die Abstandsmaße für die Inputs lassen sich berechnen, indem der jeweilige Wert  $s_{ik}$  aus der Matrix  $\underline{S}$  zum Wert Eins addiert wird und hiervon die minimale normalisierte Inputquantität  $s_k^*$  subtrahiert wird.

$$ip_{ik} = 1 + s_{ik} - s_k^* \quad \forall i = 1, \dots, I \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (10)$$

Diese Inputabstandsmaße sind folgendermaßen zu interpretieren: Je geringer der Abstand von  $s_{ik}$  zu  $s_k^*$  ist, desto näher ist  $ip_{ik}$  am Wert Eins. Eine Entscheidungseinheit mit der geringsten Inputquantität erhält ein Inputabstandsmaß in Höhe von Eins, während die Inputabstandsmaße für Entscheidungseinheiten mit höheren Inputquantitäten höhere Werte aufweisen. Um zu vermeiden, dass ein Abstandsmaß  $ip_{ik}$  den Wert Null annimmt, wird jeweils der Wert Eins addiert. Analog zu den Outputwerten werden die Inputabstandsmaße  $ip_{ik}$  als Inputwerte bezeichnet.

Die Inputabstandsmaße (Inputwerte) und die Outputabstandsmaße (Outputwerte) werden verwendet, um einen Effizienzwert  $E_i$  für jede Entscheidungseinheit  $i$  zu ermitteln. Dieser Effizienzwert weist die klassische Form auf, in welcher die gewichteten Outputwerte im Zähler und die gewichteten Inputwerte im Nenner berücksichtigt werden. Derartige Effizienzwerte sind in der Literatur verbreitet. Zum Beispiel wird im Rahmen der so genannten „ratio form“ der DEA auf einen ähnlichen Effizienzwert zurückgegriffen<sup>13)</sup>.

---

13) Vgl. z. B. CHARNES/COOPER/ROHDES (1978), S. 430; CHARNES/COOPER/THRALL (1991), S. 198.

$$E_i = \frac{\sum_{j=1}^J v_j * op_{ij}}{\sum_{k=1}^K w_k * ip_{ik}} \quad \forall i = 1, \dots, I \quad (11)$$

Ein hoher (geringer) Effizienzwert  $E_i$  einer Entscheidungseinheit  $i$  steht für eine hohe (geringe) relative Effizienz im Vergleich zu den anderen Entscheidungseinheiten. Daher kann auf Basis der Effizienzwerte  $E_i$  eine Rangordnung  $R$  der relativen Effizienz der Entscheidungseinheiten abgeleitet werden, indem die Entscheidungseinheiten anhand ihrer Effizienzwerte in absteigender Ordnung sortiert werden (d. h. die Entscheidungseinheit mit dem höchsten Effizienzwert auf Rang Eins und die Entscheidungseinheit mit dem niedrigsten Effizienzwert auf dem niedrigsten Rang).

### 3.4 Anwendung von EATWOS unter Berücksichtigung von Satisfizierungsgrenzen

Schritt 3 des Vorgehensmodells<sup>14)</sup> besteht in der Anwendung von EATWOS unter Berücksichtigung von Satisfizierungsgrenzen  $SG_j$ . In diesem Schritt wird für wenigstens einen Output  $j$  mit  $j \in \{1, \dots, J\}$  eine Satisfizierungsgrenze  $SG_j$  festgelegt. Die Outputs, für die keine Satisfizierungsgrenzen existieren, werden wie in Schritt 2 des Vorgehensmodells behandelt. Das Konzept der Satisfizierung wird in EATWOS durch die Modellierung der folgenden *logischen Regel* integriert:

Wenn die Outputquantität  $y_{ij}$  der Entscheidungseinheit  $i$  eine bestimmte Satisfizierungsgrenze  $SG_j$  übersteigt, dann erhält diese Entscheidungseinheit den gleichen Outputwert wie eine Entscheidungseinheit, deren Outputquantität gleich der Satisfizierungsgrenze ist.

Diese logische Regel wird durch die folgenden fünf *logischen Restriktionen* modelliert. Die allgemeine Technik der linearen Repräsentation von logischen Regeln stammt von YAN/YU/CHENG<sup>15)</sup>. Die spezielle Repräsentation der oben angegebenen logischen Regel durch die fünf nachfolgenden Restriktionen wurde von den Autoren dieses Arbeitsberichts kreiert. Die folgenden fünf Restriktionen werden für alle Outputs angewendet, für die Satisfizierungsgrenzen  $SG_j$  festgelegt worden sind:

---

14) Vgl. Abbildung 1, S. 5.

15) Vgl. YAN/YU/CHENG (2003), S. 2143 ff.

$$[1a] \quad \left( \frac{SG_j - y_{ij}}{SG_j} \right) + z_1 \leq 1$$

$$[1b] \quad \left( \frac{SG_j - y_{ij}}{SG_j} \right) * z_2 \geq 0$$

$$[2] \quad z_1, z_2 \in \{0;1\}$$

$$[3] \quad z_1 + z_2 = 1$$

$$[4] \quad a_{ij} = \frac{y_{ij}}{SG_j} * z_2 + 1 * z_1$$

Die Restriktionen [1a] und [1b] beschränken die möglichen Werte für die logischen Variablen  $z_1$  und  $z_2$ . Durch Restriktion [2] sind diese logischen Variablen als Binärvariablen definiert. Restriktion [2] stellt zusammen mit Restriktion [3] sicher, dass nur eine der logischen Variablen den Wert Eins annehmen kann, während die jeweils andere den Wert Null annimmt.

$$z_1 = 1 \Rightarrow z_2 = 0 \wedge z_1 = 0 \Rightarrow z_2 = 1$$

$$z_2 = 1 \Rightarrow z_1 = 0 \wedge z_2 = 0 \Rightarrow z_1 = 1$$

Die möglichen Werte der logischen Variablen in Restriktion [4] werden durch die Restriktionen [1a], [1b], [2], und [3] bestimmt. Abhängig von den Werten der Outputquantität  $y_{ij}$  und der zugehörigen Satisfizierungsgrenze  $SG_j$  sind die folgenden vier Wertekombinationen möglich:

a.) Die Outputquantität hat den Wert Null ( $y_{ij} = 0$ ):

$$[1a] \quad \left( \frac{SG_j - 0}{SG_j} \right) + z_1 \leq 1$$

$$\Rightarrow 1 + z_1 \leq 1 \Rightarrow z_1 = 0$$

$$z_1 = 0 \wedge [3] \Rightarrow z_2 = 1$$

$$[1b] \quad \left( \frac{SG_j - 0}{SG_j} \right) * 1 \geq 0$$

$$\Rightarrow 1 \geq 0 \quad \checkmark$$

$$[4] \quad \Rightarrow a_{ij} = \frac{0}{SG_j} * 1 + 1 * 0 = 0$$

b) Die Outputquantität nimmt einen Wert zwischen Null und der Satisfizierungsgrenze an ( $0 < y_{ij} < SG_j$ ):

$$[1a] \quad ]0; 1[ + z_1 \leq 1 \quad \parallel z_1 \in \{0; 1\} \quad \text{wegen [2]}$$

$$\Rightarrow z_1 = 0$$

$$z_1 = 0 \quad \wedge \quad [3] \quad \Rightarrow \quad z_2 = 1$$

$$[1b] \quad ]0; 1[ * 1 \geq 0$$

$$\Rightarrow ]0; 1[ \geq 0 \quad \checkmark$$

$$[4] \quad \Rightarrow a_{ij} = \frac{y_{ij}}{SG_j} * 1 + 1 * 0 = \frac{y_{ij}}{SG_j}$$

c) Die Outputquantität ist gleich der Satisfizierungsgrenze ( $y_{ij} = SG_j$ ):

$$[1a] \quad \frac{SG_j - SG_j}{SG_j} + z_1 \leq 1 \quad \parallel z_1 \in \{0; 1\} \quad \text{wegen [2]}$$

$$\Rightarrow z_1 \in \{0; 1\}$$

$$[1b] \quad \frac{SG_j - SG_j}{SG_j} * z_2 \geq 0 \quad \parallel z_2 \in \{0; 1\} \quad \text{wegen [2]}$$

$$\Rightarrow z_2 \in \{0; 1\}$$

Im Rahmen der Wertekombination c) sind die Restriktionen [3], [1a] und [1b] konsistent zu zwei alternativen Fällen, die beide zum gleichen Wert von  $a_{ij}$  führen.

$$[4] \quad \left. \begin{array}{l} z_1 = 0 \quad \wedge \quad z_2 = 1 \\ a_{ij} = \frac{SG_j}{SG_j} * 1 + 1 * 0 = 1 \\ \vee \quad z_1 = 1 \quad \wedge \quad z_2 = 0 \\ a_{ij} = \frac{SG_j}{SG_j} * 0 + 1 * 1 = 1 \end{array} \right\} \Rightarrow a_{ij} = 1$$

d) Die Outputquantität ist größer als die Satisfizierungsgrenze ( $y_{ij} > SG_j$ ):

$$[1a] \quad ]-\infty; 0[ + z_1 \leq 1 \quad \parallel z_1 \in \{0; 1\} \quad \text{wegen [2]}$$

$$\Rightarrow z_1 \in \{0; 1\}$$

$$[1b] \quad ]-\infty; 0[* z_2 \geq 0$$

$$\Rightarrow z_2 = 0$$

$$z_2 = 0 \wedge [3] \Rightarrow z_1 = 1$$

$$[4] \quad \Rightarrow a_{ij} = \frac{y_{ij}}{SG_j} * 0 + 1 * 1 = 1$$

Die normalisierten Outputquantitäten  $a_{ij}$  ergeben sich durch die Anwendung der Restriktionen [1a], [1b], [2], [3] und [4], wenn die Satisfizierungsgrenze  $SG_j$  für den jeweiligen Output  $j$  festgelegt worden ist. Diese Outputquantitäten werden in die normalisierte Outputmatrix  $\underline{A}$  eingetragen. Wenn für Output  $j$  keine Satisfizierungsgrenze  $SG_j$  festgelegt worden ist, entspricht der Spaltenvektor  $\vec{a}_j$  in der Matrix  $\underline{A}$  dem Spaltenvektor  $\vec{r}_j$  in der Matrix  $\underline{R}$ .

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} & \dots & a_{1J} \\ \dots & \dots & & \dots & & \dots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} & \dots & a_{iJ} \\ \dots & \dots & & \dots & & \dots \\ a_{I1} & a_{I2} & \dots & a_{Ij} & \dots & a_{IJ} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Alsdann wird die maximale normalisierte Outputquantität  $a_j^*$  bestimmt, indem für jeden Output  $j$  der maximale Wert des jeweiligen Spaltenvektors  $\vec{a}_j$  ermittelt wird.

$$a_j^* = \max_i \{ \vec{a}_j \} \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (13)$$

Die maximale normalisierte Outputquantität  $a_j^*$  wird verwendet, um die Abstandsmaße für die Outputs zu bestimmen. Diese Abstandsmaße werden für alle Entscheidungseinheiten  $i$  und für alle Outputs  $j$  bestimmt.

$$op_{ij}^{SG} = 1 - (a_j^* - a_{ij}) \quad \forall i = 1, \dots, I \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (14)$$

Wie in Schritt 2 des Vorgehensmodells wird ein Effizienzwert für jede Entscheidungseinheit bestimmt. Aber im Gegensatz zum Effizienzwert  $E_i$ , der in Schritt 2 berechnet worden ist, basieren die Effizienzwerte  $E_i^{SG}$  auf den Abstandsmaßen  $op_{ij}^{SG}$ , sodass die Satisfizierungsgrenzen  $SG_j$  für die Outputs berücksichtigt werden.

$$E_i^{SG} = \frac{\sum_{j=1}^J v_j * op_{ij}^{SG}}{\sum_{k=1}^K w_k * ip_{ik}} \quad \forall i = 1, \dots, I \quad (15)$$

Analog zu Schritt 2 wird auf Basis der Effizienzwerte  $E_i^{SG}$  eine Rangordnung  $R^{SG}$  für die relative Effizienz der Entscheidungseinheiten ermittelt.

### 3.5 Identifizierung von Potenzialen zur Effizienzsteigerung

Effizienzsteigerungspotenziale lassen sich im Rahmen von EATWOS durch den Vergleich der Rangordnung  $R$  mit der Rangordnung  $R^{SG}$  identifizieren. Wenn die Rangordnung  $R^{SG}$  sich von der Rangordnung  $R$  unterscheidet, ist dies ein Hinweis darauf, dass die Effizienz einer Entscheidungseinheit, die in der Rangordnung  $R^{SG}$  einen höheren Rang einnimmt als in der Rangordnung  $R$ , wohlmöglich gesteigert werden kann.

Dieser Sachverhalt lässt sich anhand eines einfachen Beispiels illustrieren. Es sei angenommen, dass zwei Entscheidungseinheiten betrachtet werden, die sich jeweils durch eine Outputquantität ( $y_1$  für Entscheidungseinheit 1,  $y_2$  für Entscheidungseinheit 2) und eine Inputquantität ( $x_1$  für Entscheidungseinheit 1,  $x_2$  für Entscheidungseinheit 2) charakterisieren lassen. In diesem Ein-Input/Ein-Output-Fall ist es ausreichend, den ungewichteten Quotienten aus Outputquantität und Inputquantität als Effizienzwert einer Entscheidungseinheit zu wählen. Es sei angenommen, dass Entscheidungseinheit 1 im Vergleich zu Entscheidungseinheit 2 effizienter ist. Des Weiteren wird unterstellt, dass die Outputquantität  $y_1$  größer ist als die Outputquantität  $y_2$ , während  $y_2$  gleich der Satisfizierungsgrenze  $SG$  ist.

$$\frac{y_1}{x_1} > \frac{y_2}{x_2} \quad \text{mit } y_1 > y_2 = SG \quad (16)$$

Wenn die Satisfizierungsgrenze  $SG$  berücksichtigt wird, können die Outputquantitäten  $y_1$  und  $y_2$  durch diese Satisfizierungsgrenze substituiert werden, da die Bedingung

$y_1 > y_2 = SG$  gilt. Im betrachteten Beispiel wird angenommen, dass sich durch die Berücksichtigung der Satisfizierungsgrenze die Rangordnung der beiden Entscheidungseinheiten ändert:

$$\frac{SG}{x_1} < \frac{SG}{x_2} \tag{17}$$

Entscheidungseinheit 2 nimmt mit Rang 1 in der Rangordnung  $R^{SG}$  einen höheren Rang als in der Rangordnung  $R$  (Rang 2) ein. Dieses ist ein Hinweis darauf, dass eventuell Möglichkeiten bestehen, um die relative Effizienz von Entscheidungseinheit 2 zu erhöhen. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Alternativen, die sich grundsätzlich zur Variation der Input- und Outputquantität von Entscheidungseinheit 2 anbieten.

	$\Delta y_2 > 0$	$\Delta y_2 = 0$	$\Delta y_2 < 0$
$\Delta x_2 > 0$	A2 zusätzlich: $ \Delta y_2  >  \Delta x_2 $	B2	B3
$\Delta x_2 = 0$	A1	B1	B4
$\Delta x_2 < 0$	A3	A3	A4 zusätzlich: $ \Delta y_2  <  \Delta x_2 $

Tabelle 1: Alternativen zur Variation der Input- und Outputquantität von Entscheidungseinheit 2

Grundsätzlich lassen sich die folgenden Alternativen unterscheiden, um die relative Effizienz der Entscheidungseinheit 2 zu steigern:

- A1) Die erste Alternative besteht in der Steigerung der Outputquantität ( $\Delta y_2 > 0$ ), ohne die Inputquantität zu variieren ( $\Delta x_2 = 0$ ).

- A2) Die zweite Alternative ist, sowohl die Outputquantität ( $\Delta y_2 > 0$ ) als auch die Inputquantität ( $\Delta x_2 > 0$ ) zu erhöhen und dabei sicherzustellen, dass der Betrag  $|\Delta y_2|$  der Erhöhung der Outputquantität den Betrag  $|\Delta x_2|$  der Erhöhung der Inputquantität übersteigt.
- A3) Die dritte Alternative besteht in der Senkung der Inputquantität ( $\Delta x_2 < 0$ ), ohne die Outputquantität zu verringern ( $\Delta y_2 \geq 0$ ).
- A4) Die vierte Alternative ist, sowohl die Inputquantität ( $\Delta x_2 < 0$ ) als auch die Outputquantität ( $\Delta y_2 < 0$ ) zu verringern und sicherzustellen, dass der Betrag  $|\Delta y_2|$  der Verringerung der Outputquantität geringer ausfällt als der Betrag  $|\Delta x_2|$  der Reduzierung der Inputquantität.

Als Alternativen zur Erhöhung der Effizienz von Entscheidungseinheit 2 scheiden folgende Fälle grundsätzlich aus:

- B1) Wegen  $\Delta y_2 = \Delta x_2 = 0$  tritt keine Veränderung gegenüber dem Ausgangszustand ein, a fortiori auch keine Effizienzerhöhung.
- B2) Wegen  $\Delta x_2 > 0$  bei  $\Delta y_2 = 0$  wird der Input vergrößert bei konstantem Output, sodass die Effizienz sinken muss.
- B3) Wegen  $\Delta x_2 > 0$  bei  $\Delta y_2 < 0$  wird der Input vergrößert und der Output verkleinert, sodass die Effizienz besonders stark sinken muss.
- B4) Wegen  $\Delta y_2 < 0$  bei  $\Delta x_2 = 0$  wird der Output verringert bei konstantem Input, sodass die Effizienz sinken muss.

Im vorliegenden Beispiel führt die Erhöhung der Outputquantität ( $\Delta y_2 > 0$ ) zu keiner Effizienzsteigerung, wenn die Satisfizierungsgrenze berücksichtigt wird, weil die Outputquantität  $y_2$  gleich der Satisfizierungsgrenze  $SG$  ist. Daher können die Alternativen A1 und A2 nicht angewendet werden, um die relative Effizienz von Entscheidungseinheit 2 zu erhöhen. Effizienzsteigerungspotenziale können folglich nur durch die Alternativen A3 und A4 realisiert werden. Die folgende Gleichung (18) verdeutlicht das Effizienzsteigerungspotenzial für das vorliegende Beispiel.



$$\frac{y_1}{x_1} = \frac{y_2 + \Delta y_2}{x_2 + \Delta x_2} \quad \text{mit } \Delta y_2 \leq 0 \Rightarrow |\Delta y_2| < |\Delta x_2| \quad (18)$$

Gemäß Gleichung (18) muss, um die relative Effizienz von Entscheidungseinheit 2 zu erhöhen, der Betrag  $|\Delta y_2|$  der Reduzierung der Outputquantität kleiner sein als der Betrag  $|\Delta x_2|$  der Reduzierung der Inputquantität. Wenn angenommen wird, dass es nicht wünschenswert ist, die Outputquantität zu reduzieren ( $\Delta y_2 = 0$ ), lässt sich die maximale Effizienzerhöhung folgendermaßen realisieren:

$$\Delta x_2 = y_2 \frac{x_1}{y_1} - x_2 \quad (19)$$

Wenn Gleichung (19) gilt, entspricht der Effizienzwert von Entscheidungseinheit 2 dem Effizienzwert von Entscheidungseinheit 1 ohne Berücksichtigung der Satisfizierungsgrenze.

Im voranstehenden Beispiel wurde – mit Ausnahme der Gleichung (19) – präsupponiert, dass sowohl eine Variation der Inputquantitäten als auch eine Variation der Outputquantitäten möglich ist. In praxi ist eine Variation der Quantitäten jedoch oftmals nicht möglich, da sich Inputs und Outputs teilweise der Kontrolle des Entscheidungsträgers entziehen. Daher wird in der Literatur oftmals zwischen kontrollierbaren („discretionary“) und nicht-kontrollierbaren („non-discretionary“) Inputs und Outputs differenziert<sup>16)</sup>. Der EATWOS-Anwender muss bei den kontrollierbaren Inputs und Outputs ansetzen, wenn er eine Erhöhung der relativen Effizienz einer Entscheidungseinheit erzielen möchte.

---

16) Vgl. z. B. CHARNES/COOPER/GOLANY ET AL. (1985), S. 105 f.; COOPER/SEIFORD/ZHU (2004), S. 19 ff.

## 4 Fallbeispiel

### 4.1 Ermittlung der erforderlichen Parameter für die Effizienz-Analyse von Wärmebehandlungsöfen

Ein Unternehmen für Härtetechnik, das in Süddeutschland ansässig ist, verfügt über die drei Wärmebehandlungsöfen, die in Tabelle 2 angeführt sind. Abbildung 2 zeigt einen Schachtofen mit Stahlretorte, während in Abbildung 3 exemplarisch ein Kammerofen mit Stahlretorte zu sehen ist. Diese Öfen werden zum Gas-Nitrieren verwendet. Das Gas-Nitrieren ist eine Wärmebehandlungsmethode für Eisenwerkstoffe, die die Änderung der Eigenschaften der Eisenwerkstoffe zum Ziel hat<sup>17)</sup>. Im Wesentlichen wird das Gas-Nitrieren zur Oberflächenhärtung und zur Verbesserung des Korrosionsverhaltens verwendet.

Ofen	Bauart des Ofens	maximale Anschlussleistung [Kilowatt]
1	Schachtofen mit Stahlretorte	75
2	Kammerofen mit Stahlretorte	64
3	Kammerofen mit Stahlretorte	77

Tabelle 2: Wärmebehandlungsöfen

---

17) Vgl. hierzu ausführlich: LIEDTKE (1995), S. 1 ff.



Abbildung 2: Schachtofen mit Stahlretorte



Abbildung 3: Kammerofen mit Stahlretorte

Drei Gase – Ammoniakgas, Ammoniakspaltgas und Stickstoff – werden im Rahmen der Methode des Gas-Nitrierens in einen Wärmebehandlungsofen geleitet. Des Weiteren benötigt jeder Ofen Elektrizität, die hauptsächlich für die Beheizung des Ofens benötigt wird.

Ofen	Verbrauch an Ammoniakgas [Kubikmeter pro Stunde]	Kosten des Ammoniakgasverbrauchs [€/pro Stunde]	Verbrauch an Ammoniakspaltgas [Kubikmeter pro Stunde]	Kosten des Ammoniakspaltgasverbrauchs [€/pro Stunde]	Verbrauch an Stickstoff [Kubikmeter pro Stunde]	Kosten des Stickstoffverbrauchs [€/pro Stunde]	Durchschnittlicher Elektrizitätsverbrauch [Kilowattstunde]	Kosten des durchschnittlichen Elektrizitätsverbrauchs [€/pro Stunde]
		[1,12 €/pro Kubikmeter Ammoniakgas]		[0,65 €/pro Kubikmeter Ammoniakspaltgas]		[0,15 €/pro Kubikmeter Stickstoff]		[0,09 €/je Kilowatt/ Stunde]
1	1,4	1,568	0,2	0,130	0,4	0,060	22	1,980
2	1,1	1,232	0,3	0,195	0,6	0,090	20	1,800
3	1,3	1,456	0,4	0,260	0,7	0,105	25	2,250

Tabelle 3: Verbrauch und Kosten der Gase und des Stroms pro Stunde<sup>18)</sup>

Die Kosten in Tabelle 3 werden zu einem Input „Gesamtkosten pro Stunde“ aggregiert<sup>19)</sup>. Der zweite Input ist durch den „Arbeitsaufwand für das Be- und Entladen des Ofens“ gegeben. Die „Quantitäten“ dieses Inputs wurden mit quasi-kardinalen Prioritäten bewertet, da die Kosten in Abhängigkeit davon, ob ein Arbeiter, Vorarbeiter oder der Betriebsleiter einen Ofen be- und entlädt, unterschiedlich hoch ausfallen und deshalb nicht exakt quantifiziert werden können. Die Prioritäten in der dritten Spalte von Tabelle 4 können mithilfe einer einfachen Scoring-Technik oder einer elaborierteren Technik – wie beispielsweise dem AHP – ermittelt werden.

18) Kosten, die – wie beispielsweise die Kosten des Stromverbrauchs der Ammoniakgasspaltergeräte („NH<sub>3</sub>-Spalter“) – für alle drei Wärmebehandlungsöfen in der gleichen Höhe anfallen, werden in der vorliegenden Effizienz-Analyse nicht berücksichtigt.

19) Vgl. hierzu die zweite Spalte in Tabelle 4, S. 23.

Nachfolgend ist exemplarisch der AHP angewendet worden, indem die Paarvergleichsmatrix  $\underline{B}$  mit Paarvergleichsurteilen ausgefüllt worden ist. Die beiden Paarvergleichsurteile „6“ in der oberen Dreiecksmatrix von  $\underline{B}$  bedeuten, dass der Arbeitsaufwand beim Schachtofen mit Stahlretorte wesentlich höher ist als bei den beiden Kammeröfen mit Stahlretorte<sup>20)</sup>. Der Eintrag des Paarvergleichsurteils „1“ in der oberen Dreiecksmatrix von  $\underline{B}$  bedeutet, dass der Arbeitsaufwand für das Be- und Entladen der beiden Kammeröfen mit Stahlretorte als gleich hoch beurteilt wird. Die untere Dreiecksmatrix enthält die Reziprokwerte zu den korrespondierenden Paarvergleichsurteilen in der oberen Dreiecksmatrix.

$$\underline{B} = \begin{pmatrix} 1 & 6 & 6 \\ 1/6 & 1 & 1 \\ 1/6 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad C.R. = 0 \quad \vec{u} = \begin{pmatrix} 0,750 \\ 0,125 \\ 0,125 \end{pmatrix}$$

Der Konsistenzwert ( $C.R. = \text{Consistency Ratio}$ ) in Höhe von Null zeigt an, dass die Paarvergleichsurteile in der Paarvergleichsmatrix  $\underline{B}$  vollkommen konsistent angegeben worden sind<sup>21)</sup>. Aus der Paarvergleichsmatrix  $\underline{B}$  lässt sich der Prioritätenvektor  $\vec{u}$  ableiten<sup>22)</sup>. Für Ofen 1 wurde die Priorität 0,750 bestimmt, die besagt, dass der Arbeitsaufwand für das Be- und Entladen von Ofen 1 größer ist als für die anderen beiden Öfen, für die eine Priorität von 0,125 berechnet worden ist. Dieser höhere Arbeitsaufwand bei Ofen 1 ist zum einen darauf zurückzuführen, dass dieser ein Schachtofen mit Stahlretorte ist, der – wie aus Abbildung 4 ersichtlich ist – von oben beladen werden muss. Die Kammeröfen mit Stahlretorte (Öfen 2 und 3) hingegen werden – wie aus Abbildung 5 ersichtlich ist – von vorne beladen. Zum anderen müssen beim Be- und Entladen des Schachtofens mit Stahlretorte mehrere Schrauben befestigt bzw. gelöst werden. Zur Be- und Entladung der Kammeröfen mit Stahlretorte hingegen kann einfach die Fronttür geschlossen und geöffnet werden.

---

20) Hierzu wurde auf die Standard-AHP-Skala zurückgegriffen, die die Werte 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 sowie die Reziprokwerte 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8 und 1/9 umfasst. Vgl. z. B. SAATY (1994), S. 26; SAATY (2001), S. 73; und ferner: PETERS/ZELEWSKI (2002), S. 9; PETERS/ZELEWSKI (2004), S. 298; ZELEWSKI/PETERS (2003), S. 1211.

21) Vgl. zur Konsistenzprüfung von Paarvergleichsurteilen und den hierzu erforderlichen Berechnungen: SAATY (1994), S. 41 f.; SAATY (2001), S. 80; und ferner: PETERS/ZELEWSKI (2002), S. 12 ff.; ZELEWSKI/PETERS (2003), S. 1211 ff.

22) Vgl. zur Berechnung des Prioritätenvektors auf Basis einer Paarvergleichsmatrix: SAATY (2001), S. 76 ff.



Abbildung 4: Beladung eines Schachtofens  
mit Stahlretorte



Abbildung 5: Beladung eines Kammerofens  
mit Stahlretorte

Im Rahmen der vorliegenden Effizienz-Analyse wurden das *maximale Chargengewicht* und das *maximale Chargenvolumen* als Outputs gewählt. Da die Chargen nie schwerer als 350 Kilogramm sind und in der Regel nicht mehr als eine Charge am Tag anfällt, ist die Satisfizierungsgrenze für den Output *maximales Chargengewicht* auf 350 Kilogramm ( $SG_1 = 350$ ) festgelegt worden.

	Inputs		Outputs	
Ofen	Gesamtkosten pro Stunde (= Summe der Kosten aus Tabelle 3) [€pro Stunde]	Arbeitsaufwand für das Be- und Entladen des Ofens [Prioritäten]	maximales Chargengewicht [Kilogramm]	maximales Chargenvolumen [Kubikzentimeter]
1	3,738  (= 1,568 + 0,130 + 0,060 + 1,980)	0,750	300	382.756
2	3,317  (=1,232+ 0,195 + 0,090 + 1,800)	0,125	350	360.000
3	4,071  (=1,456 + 0,260 + 0,105 + 2,250)	0,125	650	429.000

Tabelle 4: Inputs und Outputs im Rahmen der Effizienz-Analyse

Alsdann muss der EATWOS-Anwender die relativen Bedeutungsgewichte  $v_j$  für die Outputs und die relativen Bedeutungsgewichte  $w_k$  für die Inputs bestimmen. Der EATWOS-Anwender kann hierzu – wie in Kapitel 3.2 erörtert – auf verschiedene Bewertungstechniken zurückgreifen. Im vorliegenden Fallbeispiel sind – wie aus Tabelle 5 ersichtlich ist – die *Gesamtkosten pro Stunde* als etwas bedeutender als der *Arbeitsaufwand für das Be- und Entladen des Ofens* beurteilt worden. Des Weiteren hat der EATWOS-Anwender die beiden Outputs *maximales Chargengewicht* und *maximales Chargenvolumen* als gleich bedeutend beurteilt, sodass beide ein relatives Bedeutungsgewicht in Höhe von 0,5 erhalten.

relative Bedeutungsgewichte $w_k$ der Inputs		relative Bedeutungsgewichte $v_j$ der Outputs	
Gesamtkosten pro Stunde	Arbeitsaufwand für das Be- und Entladen des Ofens	maximales Chargengewicht	maximales Chargenvolumen
0,6	0,4	0,5	0,5

Tabelle 5: Relative Bedeutungsgewichte der Inputs und Outputs

## 4.2 Anwendung von EATWOS ohne Berücksichtigung der Satisfizierungsgrenze zur Effizienz-Analyse von Wärmebehandlungsöfen

Zunächst müssen die Outputquantitäten normalisiert werden. Da *zwei* Outputs für *drei* Wärmebehandlungsöfen im Rahmen der Effizienz-Analyse berücksichtigt werden, müssen sechs normalisierte Outputquantitäten berechnet werden:

$$r_{11} = \frac{300}{\sqrt{300^2 + 350^2 + 650^2}} \approx 0,38$$

$$r_{21} = \frac{350}{\sqrt{300^2 + 350^2 + 650^2}} \approx 0,44$$

$$r_{31} = \frac{650}{\sqrt{300^2 + 350^2 + 650^2}} \approx 0,82$$

$$r_{12} = \frac{382.756}{\sqrt{382.756^2 + 360.000^2 + 429.000^2}} \approx 0,56$$

$$r_{22} = \frac{360.000}{\sqrt{382.756^2 + 360.000^2 + 429.000^2}} \approx 0,53$$

$$r_{32} = \frac{429.000}{\sqrt{382.756^2 + 360.000^2 + 429.000^2}} \approx 0,63$$



Aus diesen sechs normalisierten Outputquantitäten wird die normalisierte Outputmatrix  $\underline{R}$  gebildet:

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} 0,38 & 0,56 \\ 0,44 & 0,53 \\ 0,82 & 0,63 \end{bmatrix}$$

Auf Basis der Spaltenvektoren  $\vec{r}_j$  der normalisierten Outputmatrix  $\underline{R}$  werden die maximalen normalisierten Outputquantitäten  $r_1^*$  und  $r_2^*$  bestimmt:

$$r_1^* = 0,82 \quad \wedge \quad r_2^* = 0,63$$

Dann können die folgenden sechs Outputabstandsmaße berechnet werden:

$$op_{11} = 1 - (0,82 - 0,38) = 0,56 \quad op_{12} = 1 - (0,63 - 0,56) = 0,93$$

$$op_{21} = 1 - (0,82 - 0,44) = 0,62 \quad op_{22} = 1 - (0,63 - 0,53) = 0,90$$

$$op_{31} = 1 - (0,82 - 0,82) = 1,00 \quad op_{32} = 1 - (0,63 - 0,63) = 1,00$$

Die Inputquantitäten werden ebenso wie die Outputquantitäten normalisiert:

$$s_{11} = \frac{3,738}{\sqrt{3,738^2 + 3,317^2 + 4,071^2}} \approx 0,58$$

$$s_{21} = \frac{3,317}{\sqrt{3,738^2 + 3,317^2 + 4,071^2}} \approx 0,51$$

$$s_{31} = \frac{4,071}{\sqrt{3,738^2 + 3,317^2 + 4,071^2}} \approx 0,63$$

$$s_{12} = \frac{0,750}{\sqrt{0,750^2 + 0,125^2 + 0,125^2}} \approx 0,97$$

$$s_{22} = s_{32} = \frac{0,125}{\sqrt{0,750^2 + 0,125^2 + 0,125^2}} \approx 0,16$$

Die Resultate der Normalisierung werden in die normalisierte Inputmatrix  $\underline{S}$  eingetragen:

$$\underline{S} = \begin{bmatrix} 0,58 & 0,97 \\ 0,51 & 0,16 \\ 0,63 & 0,16 \end{bmatrix}$$

Aus dieser normalisierten Inputmatrix lassen sich die minimalen normalisierten Inputquantitäten  $s_1^*$  und  $s_2^*$  ablesen:

$$s_1^* = 0,51 \quad \wedge \quad s_2^* = 0,16$$

Dann können die sechs Inputabstandsmaße berechnet werden:

$$ip_{11} = 1 + 0,58 - 0,51 = 1,07$$

$$ip_{12} = 1 + 0,97 - 0,16 = 1,81$$

$$ip_{21} = 1 + 0,51 - 0,51 = 1,00$$

$$ip_{22} = 1 + 0,16 - 0,16 = 1,00$$

$$ip_{31} = 1 + 0,63 - 0,51 = 1,12$$

$$ip_{32} = 1 + 0,16 - 0,16 = 1,00$$

Als letztes müssen in diesem Schritt die Effizienzwerte  $E_i$  berechnet werden:

$$E_1 = \frac{0,5 * 0,56 + 0,5 * 0,93}{0,6 * 1,07 + 0,4 * 1,81} \approx 0,55$$

$$E_2 = \frac{0,5 * 0,62 + 0,5 * 0,90}{0,6 * 1,00 + 0,4 * 1,00} \approx 0,76$$

$$E_3 = \frac{0,5 * 1,00 + 0,5 * 1,00}{0,6 * 1,12 + 0,4 * 1,00} \approx 0,93$$

Aus diesen Effizienzwerten ergibt sich die folgende Rangordnung  $R: E_3 \succ E_2 \succ E_1$

### 4.3 Anwendung von EATWOS unter Berücksichtigung von Satisfizierungsgrenzen zur Effizienz-Analyse von Wärmebehandlungsöfen

Die logischen Restriktionen, die in Kapitel 3.3 erörtert wurden, werden auf den Output *maximales Chargengewicht* angewendet, da für diesen Output eine Satisfizierungsgrenze ( $SG_1 = 350$ ) festgelegt worden ist.

Die Outputquantität von Ofen 1 nimmt einen Wert zwischen Null und der Satisfizierungsgrenze an ( $0 < 300 = y_{11} < 350 = SG_1$ ):

$$[1a] \quad \left( \frac{350-300}{350} \right) + z_1 \leq 1 \Rightarrow z_1 = 0 \Rightarrow z_2 = 1$$

$$[1b] \quad \left( \frac{350-300}{350} \right) * 1 \geq 0 \quad \checkmark$$

$$[4] \quad a_{11} = \frac{300}{350} * 1 + 1 * 0 \approx 0,86$$

Die Outputquantität von Ofen 2 ist gleich der Satisfizierungsgrenze ( $y_{21} = SG_1 = 350$ ):

$$[1a] \quad \left( \frac{350-350}{350} \right) + z_1 \leq 1$$

$$\Rightarrow z_1 \in \{0; 1\}$$

$$[1b] \quad \left( \frac{350-350}{350} \right) * z_2 \geq 0$$

$$\Rightarrow z_2 \in \{0; 1\}$$

$$[4] \quad \left. \begin{array}{l} z_1 = 0 \quad \wedge \quad z_2 = 1 \\ a_{21} = \frac{350}{350} * 1 + 1 * 0 = 1 \\ \vee \\ z_1 = 1 \quad \wedge \quad z_2 = 0 \\ a_{21} = \frac{350}{350} * 0 + 1 * 1 = 1 \end{array} \right\} \Rightarrow a_{21} = 1$$

Die Outputquantität von Ofen 3 übersteigt die Satisfizierungsgrenze

( $y_{31} = 650 > 350 = SG_1$ ):

$$[1a] \quad \left( \frac{350-650}{350} \right) + z_1 \leq 1$$

$$\Rightarrow z_1 \in \{0; 1\}$$

$$[1b] \quad \left( \frac{350-650}{350} \right) * z_2 \geq 0$$

$$\Rightarrow z_2 = 0$$

$$z_2 = 0 \quad \wedge \quad [3] \quad \Rightarrow \quad z_1 = 1$$

$$[4] \quad a_{31} = \frac{650}{350} * 0 + 1 * 1 = 1$$

Alsdann können die normalisierten Outputquantitäten  $a_{11}$ ,  $a_{21}$  und  $a_{31}$  in die normalisierte Outputmatrix  $\underline{A}$  übernommen werden. Der Spaltenvektor  $\vec{a}_2$  ist gleich dem Spaltenvektor  $\vec{r}_2$ , da für Output 2 – das maximale Chargenvolumen – keine Satisfizierungsgrenze festgelegt worden ist.

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 0,86 & 0,56 \\ 1,00 & 0,53 \\ 1,00 & 0,63 \end{bmatrix}$$

Auf Basis der Matrix  $\underline{A}$  können die maximalen normalisierten Outputquantitäten  $a_1^*$  und  $a_2^*$  bestimmt werden.

$$a_1^* = 1,00 \quad \wedge \quad a_2^* = r_2^* = 0,63$$

Die Outputabstandsmaße werden für den Output maximales Chargengewicht berechnet, um die Satisfizierungsgrenze für diesen Output in die Effizienz-Analyse einzubeziehen:

$$op_{11}^{SG} = 1 - (1,00 - 0,86) = 0,86$$

$$op_{21}^{SG} = 1 - (1,00 - 1,00) = 1,00$$

$$op_{31}^{SG} = 1 - (1,00 - 1,00) = 1,00$$

Die  $op_{i2}$ -Werte können aus Kapitel 4.3 übernommen werden, da für Output 2 keine Satisfizierungsgrenze festgelegt worden ist. Schließlich werden die Effizienzwerte  $E_i^{SG}$  unter Berücksichtigung der Satisfizierungsgrenze für den Output *maximales Chargengewicht* berechnet.

$$E_1^{SG} = \frac{0,5 * 0,86 + 0,5 * 0,93}{0,6 * 1,07 + 0,4 * 1,81} \approx 0,66$$

$$E_2^{SG} = \frac{0,5 * 1,00 + 0,5 * 0,90}{0,6 * 1,00 + 0,4 * 1,00} \approx 0,95$$

$$E_3^{SG} = \frac{0,5 * 1,00 + 0,5 * 1,00}{0,6 * 1,12 + 0,4 * 1,00} \approx 0,93$$

Folglich lautet die Rangordnung  $R^{SG}$  der relativen Effizienz unter Berücksichtigung der Satisfizierungsgrenze  $SG_1$  wie folgt:  $E_2^{SG} \succ E_3^{SG} \succ E_1^{SG}$

Ofen 2 nimmt in der Rangordnung  $R^{SG}$  mit Rang 1 einen höheren Rang ein als in der Rangordnung  $R$  (Rang 2). Dieser höhere Rang für Ofen 2 ist darauf zurückzuführen, dass in der Analyse, die der Rangordnung  $R^{SG}$  zugrunde liegt, im Gegensatz zur ursprünglichen Analyse die Satisfizierungsgrenze  $SG_1$  für den Output *maximales Chargengewicht* berücksichtigt wurde.

#### 4.4 Identifizierung von Potenzialen zur Effizienzsteigerung für den zweiten Wärmebehandlungssofen

Da die Rangordnung  $R$  von der Rangordnung  $R^{SG}$  abweicht und Ofen 2 in  $R^{SG}$  eine höhere relative Effizienz als in  $R$  hat, besteht möglicherweise ein Potenzial, die relative Effizienz von Ofen 2 zu erhöhen. Hierzu muss der EATWOS-Anwender prüfen, welche Variationen der Input- und Outputquantitäten von Ofen 2 möglich sind und zu Effizienzerhöhungen führen können. Der EATWOS-Anwender kann durch die Erhöhung der Outputquantität  $y_{21}$  keine Effizienzerhöhung erzielen, weil das maximale Chargengewicht gleich der Satisfizierungsgrenze  $SG_1$  ist. Darüber hinaus kann angenommen werden, dass das maximale Chargenvolumen ein nicht-kontrollierbarer Output ist. Denn es dürfte technisch nicht möglich oder zumindest zu kostspielig sein, das maximale Chargenvolumen des Ofens zu variieren. Daher kann die Outputquantität  $y_{22}$  nicht geändert werden, sodass der EATWOS-Anwender nur bei den Inputquantitäten ansetzen kann, um eine Effizienzerhöhung zu erzielen. Der Input „Arbeitsaufwand für das Be- und Entladen des Ofens“ bietet keine Möglichkeit zur Erhöhung der relativen Effizienz von Ofen 2 in Vergleich zu Ofen 3, weil die Öfen von der gleichen Bauart sind. Folglich besteht der einzige Ansatzpunkt zur Verbesserung der relativen Effizienz von Ofen 2 in der Reduzierung der Inputquantität  $x_{21}$ . Beispielsweise kann der Ofen aufgrund von Undichtigkeiten einen zu hohen Gasverbrauch aufweisen. In diesem Fall kann eine Effizienzsteigerung erzielt werden, indem die Undichtigkeiten beseitigt werden und somit die Kosten für den Gasverbrauch reduziert werden. Eine andere Möglichkeit zur Effizienzsteigerung kann in der Reduzierung der Kosten für

den Stromverbrauch bestehen, indem eine eventuell überalterte Heizeinheit des Ofens durch eine moderne, sparsamere Heizeinheit ersetzt wird. Im besten Fall kann die relative Effizienz von Ofen 2 so weit gesteigert werden, dass der Ofen die gleiche relative Effizienz wie Ofen 3 aufweist ( $E'_2 = E'_3$ ). Die Inputquantität  $x_{21}$  muss hierzu – wie sich im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse ermitteln lässt – sukzessive von 3,317 € auf 1,119 € gesenkt werden. Nach der erneuten Bestimmung der Abstandsmaße für Input 1 ergeben sich die folgenden Effizienzwerte:

$$E'_1 = \frac{0,5 * 0,56 + 0,5 * 0,93}{0,6 * 1,46 + 0,4 * 1,81} \approx 0,47$$

$$E'_2 = \frac{0,5 * 0,62 + 0,5 * 0,90}{0,6 * 1,00 + 0,4 * 1,00} \approx 0,76$$

$$E'_3 = \frac{0,5 * 1,00 + 0,5 * 1,00}{0,6 * 1,12 + 0,4 * 1,00} \approx 0,76$$

## 5 Fazit

Im vorliegenden Arbeitsbericht wurde EATWOS als relativ neue Effizienz-Analysetechnik erörtert. Diese Analysetechnik kombiniert bekannte Elemente der Effizienz-Analyse wie Abstandsmaße und Effizienzwerte mit SIMONS Konzept der Satisfizierung. Wenn eine Satisfizierungsgrenze für mindestens einen Output festgelegt wird, weist EATWOS andere Effizienzwerte für die Entscheidungseinheiten aus und führt daher gegebenenfalls zu einer anderen Effizienz-Rangordnung als bekannte Effizienz-Analysetechniken. Die Anwendung von EATWOS kann Entscheidungsträger zum Überdenken von Investitionsentscheidungen oder anderen schwerwiegenden Entscheidungen – wie beispielsweise Standortschließungen – anregen. Wenn ein Entscheidungsträger sich über Satisfizierungsgrenzen für Outputs bewusst ist, kann er EATWOS anwenden und so gegebenenfalls fehlerhafte Entscheidungen vermeiden.

Da fraglich ist, ob ein EATWOS-Anwender in praxi in der Lage ist, Satisfizierungsgrenzen stets genau anzugeben, scheint zukünftig eine Weiterentwicklung von EATWOS mithilfe der *Fuzzy-Set-Theorie*<sup>23)</sup> sinnvoll. So genannte *Fuzzy Sets* ermöglichen einem Anwender, Bewertungen ungenau („fuzzy“) anzugeben.

Darüber hinaus erscheint es sinnvoll, zukünftig die Grundidee von EATWOS – die Berücksichtigung des Konzepts der Satisfizierung in die Effizienz-Analyse – in andere Effizienz-Analysetechniken zu integrieren. Insbesondere die DEA bietet sich für eine derartige Weiterentwicklung an. Denn die DEA weist – mit der modellendogenen Ermittlung der relativen Bedeutungsgewichte der Inputs und Outputs – ein Charakteristikum auf, das in bestimmten Anwendungsfällen sehr nützlich ist und in dem sie sich von EATWOS unterscheidet.

---

23) Vgl. z. B. LOWEN (1996); ZIMMERMANN/ZADEH/GAINES (1984).

## Literatur

AGRAWAL/VERMA/AGARWAL (1992)

Agrawal, V. P.; Verma, A.; Agarwal, S.: Computer-aided evaluation and selection of optimum grippers. In: International Journal of Production Research, Vol. 30 (1992), No. 11, S. 2713-2732.

AGRAWAL/KOHLI/GUPTA (1991)

Agrawal, V. P.; Kohli, V.; Gupta, S.: Computer aided robot selection: the 'multiple attribute decision making' approach. In: International Journal of Production Research, Vol. 29 (1991), No. 8, S. 1629-1644.

BLACKORBY/PRIMONT/RUSSELL (1978)

Blackorby, C.; Primont, D.; Russell, R. R.: Duality, Separability, and Functional Structure: Theory and Economic Applications. New York – Oxford – Shannon 1978.

CHARNES/COOPER/GOLANY ET AL. (1985)

Charnes, A.; Cooper, W. W.; Golany, B.; Seiford, L.; Stutz, J.: Foundations of Data Envelopment Analysis for Pareto-Koopmans Efficient Empirical Production Functions. In: Journal of Econometrics, Vol. 30 (1985), No. 1-2, S. 91-107.

CHARNES/COOPER/RHODES (1978)

Charnes, A.; Cooper, W.; Rhodes, E.: Measuring the efficiency of decision making units. In: European Journal of Operational Research, Vol. 2 (1978), No. 6, S. 429-444.

CHARNES/COOPER/RHODES (1981)

Charnes, A.; Cooper, W. W.; Rhodes, E.: Evaluating Program and Managerial Efficiency: An Application of Data Envelopment Analysis to Program Follow Through. In: Management Science, Vol. 27. (1981), No. 6, S. 668-697.

CHARNES/COOPER/THRALL (1991)

Charnes, A.; Cooper, W. W.; Thrall, R. M.: A Structure for Classifying and Characterizing Efficiency and Inefficiency in Data Envelopment Analysis. In: Journal of Productivity Analysis, Vol. 2 (1991), No. 3, S. 197-237.



COOPER/SEIFORD/ZHU (2004)

Cooper, W. W.; Seiford, L. M.; Zhu, J. (Hrsg.): Handbook on Data Envelopment Analysis. Boston – Dordrecht – London 2004.

DYCKHOFF (1994)

Dyckhoff, H.: Betriebliche Produktion – Theoretische Grundlagen einer umweltorientierten Produktionswirtschaft. 2. Aufl., Berlin – Heidelberg – New York et al. 1994.

DYCKHOFF/ALLEN (1999)

Dyckhoff, H.; Allen, K.: Theoretische Begründung einer Effizienzanalyse mittels Data Envelopment Analysis (DEA). In: Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 51. Jg. (1999), Heft 5, S. 411-436.

GUTENBERG (1983)

Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Erster Band – Die Produktion. 24. Aufl., Berlin – Heidelberg – New York 1983.

HWANG/YOON (1981)

Hwang, C.-L.; Yoon, K.: Multiple Attribute Decision Making – Methods and Applications – A State-of-the-Art Survey. Berlin – Heidelberg – New York 1981.

JANIC (2003)

Janic, M.: Multicriteria Evaluation of High-Speed Rail, Transrapid Maglev and Air Passenger Transport in Europe. In: Transportation Planning & Technology, Vol. 26 (2003), No. 6, S. 491-512.

JAYANTHI/KOCHA/SINHA (1999)

Jayanthi, S.; Kocha, B.; Sinha, K. K.: Competitive analysis of manufacturing plants: An application to the US processed food industry. In: European Journal of Operational Research, Vol. 118 (1999), No. 2, S. 217-234.

KLEINE (2004)

Kleine, A.: A general model framework for DEA. In: Omega, Vol. 32 (2004), No. 1, S. 17-23.

LIEDTKE (1995)

Liedtke, D.: Grundlegende Betrachtung des Nitrierens und Nitrocarburierens von Eisenwerkstoffen. In: Chatterjee-Fischer, R. (Hrsg.): Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen – Nitrieren und Nitrocarburieren. 2. Aufl., Renningen-Malmsheim 1995, S. 1-70.

LOWEN (1996)

Lowen, R.: Fuzzy Set Theory – Basic Concepts, Techniques and Bibliography. Dordrecht 1996.

PARKAN/WU (1998)

Parkan, C.; Wu, M.-L.: Process selection with multiple objective and subjective attributes. In: Production Planning & Control, Vol. 9 (1998), No. 2, S. 189-200.

PARKAN/WU (1999)

Parkan, C.; Wu, M.-L.: Measuring the performance of operations of Hong Kong's manufacturing industries. In: European Journal of Operational Research, Vol. 118 (1999), No. 2, S. 235-258.

PARKAN/WU (2000)

Parkan, C.; Wu, M.-L.: Comparison of three modern multicriteria decision-making tools. In: International Journal of Systems Science, Vol. 31 (2000), No. 4, S. 497-517.

PETERS/ZELEWSKI (2002)

Peters, M. L.; Zelewski, S.: Analytical Hierarchy Process (AHP) – dargestellt am Beispiel der Auswahl von Projektmanagement-Software zum Multiprojektmanagement. Arbeitsbericht Nr. 14, Institut für Produktion und Industrielles Informationsmanagement, Universität Essen, Essen 2002.

PETERS/ZELEWSKI (2004)

Peters, M. L.; Zelewski, S.: Möglichkeiten und Grenzen des “Analytic Hierarchy Process“ (AHP) als Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsanalyse. In: Zeitschrift für Planung & Unternehmenssteuerung, 15. Jg. (2004), Heft 3, S. 295-324.

## PETERS/ZELEWSKI (2006)

Peters, M. L.; Zelewski, S.: Efficiency Analysis under Consideration of Satisficing Levels for Output Quantities. In: o.V.: Proceedings of the 17th Annual Conference of the Production and Operations Management Society – Operations Management in the New World Uncertainties, CD-ROM-Proceedings, Boston, USA, April 28-May 1. o.O. 2006.

## SAATY (1994)

Saaty, T. L.: How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. In: Interfaces, Vol. 24 (1994), No. 6, S. 19-43.

## SAATY (2001)

Saaty, T. L.: Decision Making for Leaders – The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World. 3. Aufl., 4. Druck, Pittsburgh 2001.

## SAATY (2004)

Saaty, T. L.: Decision Making – The Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). In: Journal of System Science and Systems Engineering, Vol. 13 (2004), No. 1, S. 1-35.

## SIMON (1979)

Simon, H. A.: Rational Decision Making in Business Organizations. In: American Economic Review, Vol. 69 (1979), No. 4, S. 493-513.

## STAHLKNECHT/HASENKAMP (2005)

Stahlknecht, P.; Hasenkamp, U.: Einführung in die Wirtschaftsinformatik. 11. Aufl., Berlin – Heidelberg – New York 2005.

## YAN/YU/CHENG (2003)

Yan, H.; Yu, Z.; Cheng, T. C. E.: A strategic model for supply chain design with logical constraints: formulation and solution. In: Computers & Operations Research, Vol. 30 (2003), No. 14, S. 2135-2155.

ZELEWSKI/PETERS (2003)

Zelewski, S.; Peters, M. L.: Lösung multikriterieller Entscheidungsprobleme mit Hilfe des Analytical Hierarchy Process (AHP). In: Das Wirtschaftsstudium, 32. Jg. (2003), Heft 10, S. 1210-1218.

ZIMMERMANN/ZADEH/GAINES (1984)

Zimmermann, H.-J.; Zadeh, L. A.; Gaines, B. R. (Hrsg.): Fuzzy Sets and Decision Analysis. Amsterdam – New York – Oxford 1984.

**Institut für Produktion und  
Industrielles Informationsmanagement  
Universität Duisburg-Essen / Campus Essen**

---

**Verzeichnis der Arbeitsberichte  
(ISSN 1614-0842)**

- Nr. 1: Zelewski, S.: Stickels theoretische Begründung des Produktivitätsparadoxons der Informationstechnik. Universität Essen, Essen 1999.
- Nr. 2: Zelewski, S.: Flexibilitätsorientierte Koordinierung von Produktionsprozessen. Universität Essen, Essen 1999.
- Nr. 3: Zelewski, S.: Ontologien zur Strukturierung von Domänenwissen. Universität Essen, Essen 1999.
- Nr. 4: Siedentopf, J.; Schütte, R.; Zelewski, S.: Wirtschaftsinformatik und Wissenschaftstheorie. Universität Essen, Essen 1999.
- Nr. 5: Fischer, K.; Zelewski, S.: Ontologiebasierte Koordination von Anpassungsplanungen in Produktions- und Logistiknetzwerken mit Multi-Agenten-Systemen. Universität Essen, Essen 1999.
- Nr. 6: Weihermann, A. E.; Wöhlert, K.: Gentechnikakzeptanz und Kommunikationsmaßnahmen in der Lebensmittelindustrie. Universität Essen, Essen 1999.
- Nr. 7: Schütte, R.: Zum Realitätsbezug von Informationsmodellen. Universität Essen, Essen 2000.
- Nr. 8: Zelewski, S.: Erweiterungen eines Losgrößenmodells für betriebliche Entsorgungsprobleme. Universität Essen, Essen 2000.
- Nr. 9: Schütte, R.: Wissen, Zeichen, Information, Daten. Universität Essen, Essen 2000.
- Nr. 10: Hemmert, M.: The Impact of Internationalization and Externalization on the Technology Acquisition Performance of High-Tech Firms. Universität Essen, Essen 2001.
- Nr. 11: Hemmert, M.: Erfolgswirkungen der internationalen Organisation von Technologiegewinnungsaktivitäten. Universität Essen, Essen 2001.
- Nr. 12: Hemmert, M.: Erfolgsfaktoren der Technologiegewinnung von F&E-intensiven Großunternehmen. Universität Essen, Essen 2001.

- Nr. 13: Schütte, R.; Zelewski, S.: Epistemological Problems in Working with Ontologies. Universität Essen, Essen 2001.
- Nr. 14: Peters, M. L.; Zelewski, S.: Analytical Hierarchy Process (AHP). Universität Essen, Essen 2002.
- Nr. 15: Zelewski, S.: Wissensmanagement mit Ontologien. Universität Essen, Essen 2002.
- Nr. 16: Klumpp, M.; Krol, B.; Zug, S.: Management von Kompetenzprofilen im Gesundheitswesen. Universität Essen, Essen 2002.
- Nr. 17: Zelewski, S.: Der „non statement view“ – eine Herausforderung für die (Re-) Konstruktion wirtschaftswissenschaftlicher Theorien –. Universität Essen, Essen 2002.
- Nr. 18: Peters, M. L.; Zelewski, S.: A heuristic algorithm to improve the consistency of judgments in the Analytical Hierarchy Process (AHP). Universität Duisburg-Essen (Campus Essen), Essen 2003.
- Nr. 19: Peters, M. L.; Zelewski, S.: Fallstudie zur Lösung eines Standortplanungsproblems mit Hilfe des Analytical Hierarchy Process (AHP). Universität Duisburg-Essen (Campus Essen), Essen 2003.
- Nr. 20: Zelewski, S.: Konventionelle versus strukturalistische Produktionstheorie. Universität Duisburg-Essen (Campus Essen), Essen 2003.
- Nr. 21: Alparslan, A.; Zelewski, S.: Moral Hazard in JIT Production Settings. Universität Duisburg-Essen (Campus Essen), Essen 2004.
- Nr. 22: Dittmann, L.: Ontology-based Skills Management. Universität Duisburg-Essen (Campus Essen), Essen 2004.
- Nr. 23: Peters, M. L.; Zelewski, S.: Ein Modell zur Auswahl von Produktionsaufträgen unter Berücksichtigung von Synergien. Universität Duisburg-Essen (Campus Essen), Essen 2004.
- Nr. 24: Peters, M. L.; Zelewski, S.: Ein Modell zur Zuordnung ähnlicher Kundenbetreuer zu Kunden. Universität Duisburg-Essen (Campus Essen), Essen 2004.
- Nr. 25: Zelewski, S.: Kooperatives Wissensmanagement in Engineering-Netzwerken – (Vorläufiger) Abschlussbericht zum Verbundprojekt KOWIEN. Zugleich KOWIEN-Projektbericht 10/2004. Universität Duisburg-Essen (Campus Essen), Essen 2004.
- Nr. 26: Siemens, F.: Vorgehensmodell zur Auswahl einer Variante der Data Envelopment Analysis. Universität Duisburg-Essen (Campus Essen), Essen 2005.
- Nr. 27: Alan, Y.: Integrative Modellierung kooperativer Informationssysteme – Ein Konzept auf der Basis von Ontologien und Petri-Netzen. Dissertation, Universität Duisburg-Essen (Campus Essen), Essen 2005.
- Nr. 28: Akca, N.; Ilas, A.: Produktionsstrategien – Überblick und Systematisierung. Universität Duisburg-Essen (Campus Essen), Essen 2005.

- Nr. 29: Zelewski, S.: Relativer Fortschritt von Theorien – ein strukturalistisches Rahmenkonzept zur Beurteilung der Fortschrittlichkeit wirtschaftswissenschaftlicher Theorien (Langfassung). Universität Duisburg-Essen (Campus Essen), Essen 2005.
- Nr. 30: Peters, M. L.; Schütte, R.; Zelewski, S.: Erweiterte Wirtschaftlichkeitsanalyse mithilfe des Analytic Hierarchy Process (AHP) unter Berücksichtigung des Wissensmanagements zur Beurteilung von Filialen eines Handelsunternehmens. Universität Duisburg-Essen (Campus Essen), Essen 2006.
- Nr. 31: Zelewski, S.: Beurteilung betriebswirtschaftlichen Fortschritts – ein metatheoretischer Ansatz auf Basis des „non statement view“ (Langfassung). Universität Duisburg-Essen (Campus Essen), Essen 2006.
- Nr. 32: Kijewski, F.; Moog, M.; Niehammer, M.; Schmidt, H. ; Schröder, K.: Gestaltung eines Vorgehensmodells für die Durchführung eines Promotionsprojekts am Fachbereich Wirtschaftswissenschaften der Universität Duisburg-Essen, Campus Essen, zum Erwerb des „Dr. rer. pol.“ mithilfe von PETRI-Netzen. Universität Duisburg-Essen (Campus Essen), Essen 2006.
- Nr. 33: Peters, M. L.; Zelewski, S.: Effizienz-Analyse unter Berücksichtigung von Satisfizierungsgrenzen für Outputs – Die Effizienz-Analysetechnik EATWOS. Universität Duisburg-Essen (Campus Essen), Essen 2006.