Wirkungen umweltpolitischer Instrumente auf Produktionsentscheidungen im Rahmen eines speziellen Leontief-Produktionsmodells

Imre Dobos, Knut Richter, Mirko Sombrutzki, Jens Weber
Europa-Universität Viadrina

Europa-Universität Viadrina
Frankfurt (Oder)
Fakultät für Wirtschaftswissenschaften

Discussion paper Nr. 61

Wirkung umweltpolitischer Instrumente auf Produktionsentscheidungen im Rahmen eines speziellen Leontief-Produktionsmodells

Imre Dobos, Knut Richter, Mirko Sombrutzki, Jens Weber
Europa-Universität Viadrina

Discussion paper Nr. 61 - September 1996

1. Einführung
2. Leontief-Technologie mit 2 Prozessen
   2.1. Das Modell
   2.2. Die Lösungstruktur
3. Klassifizierung der umweltpolitischen Instrumente
4. Die Wirkungen der umweltpolitischen Instrumente auf das Modell und die Veränderung der Lösungsstruktur
   4.1. Auflagen
   4.2. Abgaben
   4.3. Subventionen
   4.4. Zertifikate
5. Zusammenfassung und Ausblick
6. Literatur

Zusammenfassung:

Das vorliegende Diskussionspapier setzt sich mit den Auswirkungen umweltpolitischer Maßnahmen auf unternehmerische Entscheidungen im Produktionsbereich auseinander. Dabei wird anhand eines modifizierten Leontief-Produktionsmodells analysiert, in welcher Weise die optimale Produktionsentscheidung von den gegebenen umweltpolitischen Rahmenbedingungen abhängt und welche quantitativen Veränderungen durch Variation der umweltpolitischen Instrumente bewirkt werden. Es ergeben sich einige typische Verhaltensmuster, die eine Klassifikation der betrachteten umweltpolitischen Instrumente bezüglich ihrer Wirkungen auf strategische Produktionsentscheidungen zulassen.

Abstract:

The paper deals with the impact of environmetal policy on decisions in the field of production ...anagement. A Leontief production model is modified in order to include issues relevant to environmental policy. For this model an analysis of the optimal solution and its changes in a varying framework of environmental policy and legislation is carried out. The analysis of the model and its solutions reveals some typical patterns of actions, and so a classification of the considered political measures according to their impact on strategic production decisions can be done.

Stichworte: Produktionstheorie, ökologisches Produktionsmanagement, Umweltpolitik

Keywords: theory of production, ecological production management, environmental policy

Das Projekt MWU wurde aus Mitteln des brandenburgischen Ministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kultur gefördert.

Kontakt: Prof. Dr. Knut Richter, Europa-Universität Viadrina, Postfach 776, D-15207 Frankfurt an der Oder, Tel. 0335-5534-423, Fax 0335-5534-675, E-Mail richter@euv-frankfurt-o.de

1. Einführung

Die durch die Anwendung umweltpolitischer Instrumente, wie zum Beispiel Gebühren, Steuern oder Emissionsauflagen erzielten Wirkungen werden zu recht seit langem von der Öffentlichkeit kritisch beobachtet und diskutiert. Von der Wirksamkeit und Zweckmäßigkeit staatlicher Umweltpolitik hängt es ab, ob und wie schnell der notwendige ökologische Wandlungsprozeß in der Wirtschaft ablaufen wird. Eine exakte wissenschaftliche Analyse der Wirkungen umweltpolitischer Instrumente (auf allen Ebenen) ist deshalb für eine vorurteilsfreie Einschätzung dieses Prozesses unumgänglich.

Aus ökonomischer Sicht konzentrierten sich derartige Untersuchungen bisher vor allem auf die volkswirtschaftliche Ebene. Zusammenstellungen entsprechender Ergebnisse findet man zum Beispiel in [Huppes 1993], [Kemper 1989] oder [Weimann 1990]. Mindestens ebenso wichtig ist jedoch auch die Betrachtung der Management-Ebene, da die umweltbelastenden Wirkungen wirtschaftlicher Tätigkeit letzten Endes immer auf konkrete Managemententscheidungen zurückzuführen sind und deshalb auch an dieser Stelle ein Ansatzpunkt zur Beurteilung umweltpolitischer Aktivitäten gegeben ist. Bis jetzt liegen auf diesem Gebiet noch wenige befriedigenden Ergebnisse vor, so daß mit diesem Bericht ein weiterer, wenn auch bescheidener Beitrag zur Schließung dieser Lücke geleistet werden soll.

Abbildung 1 macht deutlich, daß die Politik auf den Zustand der Umwelt nur indirekt, über den Umweg der Veränderung der Rahmenbedingungen für unternehmerische Einzelentscheidungen Einfluß nehmen kann. Damit sind für die Betrachtung der Management-Ebene zwei Teilprobleme zu klären:

1. Wie hängen Managemententscheidungen von den umweltpolitischen Rahmenbedingungen ab?

2. Wie wirken Managemententscheidungen auf den Zustand der Umweltressourcen?

Abbildung 1: Indirekte Wirkung der umweltpolitischen Instrumente

Bei der Betrachtung von Managemententscheidungen orientieren sich die Verfasser dieses Beitrages am normativen Managementansatz, der davon ausgeht, daß Managemententscheidungen durch die Optimierung einer (normativen) Zielfunktion über einer beschränkten Menge von Alternativen entstehen. Der entscheidende Vorzug dieser Betrachtungsweise ist, daß die Entscheidungen hier durch quantitative Größen ausgedrückt werden können und damit, wenn das Modell es technisch zuläßt, eine Sensitivitätsanalyse der Entscheidungen bezüglich der Umgebungsvariablen möglich ist. Die quantitative Sensitivitätsanalyse ist für die von den Verfassern beabsichtigten Untersuchungen wohl die den meisten Erfolg versprechende Methode, da sie sowohl quantitative als auch strukturelle Aussagen über die Abhängigkeiten zwischen Umweltpolitik und einzelnen Managemententscheidungen erlaubt.

An dieser Stelle ist es günstig, kurz unsere Vorgehensweise darzustellen. Zuerst wird nach gewissen Kriterien ein geeignetes quantitatives Modell (Basismodell) ausgewählt. Dieses Basismodell wird dann so erweitert, daß alle relevanten umweltpolitischen Instrumente innerhalb dieses Modells als Parameter berücksichtigt werden können. Anhand dieses erweiterten Basismodells wird eine Sensitivitätsanalyse bezüglich Veränderungen in der Anwendung der einzelnen umweltpolitischer Instrumente vorgenommen. Dabei wird allerdings auf eine simultane Betrachtung mehrerer Instrumente verzichtet, da es uns hier vorrangig um überschaubare und interpretierbare Ergebnisse auf einer relativ allgemeinen Ebene und weniger um eine absolut vollständige Analyse geht. Unseres Erachtens sind Ergebnisse einer simultanen Analyse bereits bei zwei Instrumenten nur noch für die Betrachtung des konkreten Einzelfalles, aber nicht mehr für allgemeine Aussagen brauchbar. Als notwendiger Schritt nach der Sensitivitätsanalyse schließt sich dann eine Systematisierung und Interpretation der Ergebnisse an.

Aus dem weiter oben gesagten ergeben sich die folgenden Kriterien für die Auswahl eines geeigneten Modells:

(1) Das Modell soll eine quantitative Beschreibung für bestimmte Entscheidungssituationen in der Produktion liefern.

(2) Das Modell soll umweltpolitische Instrumente als Parameter berücksichtigen, oder sich zumindest entsprechend erweitern lassen.

(3) Das Modell soll soweit vereinfacht sein, daß die Sensitivitätsanalyse aussagekräftige und explizit darstellbare Ergebnisse liefert.

(4) Das Modell soll von einer ökologisch-orientierten Deckungsbeitragsmaximierung ausgehen.

Mit Ausnahme einiger spezieller Modellklassen[1] gehen alle bisher veröffentlichten quantitativen Modelle im Produktionsbereich, die ökologische Bezüge beinhalten, auf die produktionstheoretische Aktivitätsanalyse zurück. Mit anderen Worten, sie betrachten auf einer etwas abstrakteren Ebene produktionsstrategische Entscheidungen, so zum Beispiel über die Anwendung bestimmter Produktionsverfahren oder über die Festlegung des Produktionsprogramms. Beispiele hierfür findet man bei [Dyckhoff 1992], [Dinkelbach/Rosenberg 1994], [Kistner 1994], [Steven 1994] und [Bogaschewski 1995]. Für die weiteren Untersuchungen verwenden wir entsprechend der oben genannten Kriterien ein Modell, das sich an [Dinkelbach/Rosenberg 1994] anlehnt, aus verschiedenen Gründen jedoch leicht modifiziert wurde.

Wir betrachten die folgende Entscheidungssituation: Ein Unternehmen kann ein bestimmtes Produkt mit Hilfe von zwei verschiedenen Verfahren produzieren, die sich in ihrer Umweltwirkung unterscheiden. Dabei können beliebige Mengen produziert und zu einem festen Preis p auf dem Markt abgesetzt werden, und es können beide Verfahren auch in beliebigem Verhältnis miteinander kombiniert werden.

[1] Es handelt sich dabei um Lagerbestandsmodelle, in denen die Möglichkeit des Lagerns und Entsorgens von Abfällen oder die Möglichkeit des Recyclings berücksichtigt ist, siehe z.B. [Heyman 1977], [Muckstadt/Isaac 1981], [Kelle/Silver 1989], [van der Laan 1993], [Flapper 1994], [van der Laan et al. 1994] oder [Richter 1995,1996]. Wegen der sehr aufwendigen Sensitivitätsanalyse werden diese Modelle hier nicht weiter betrachtet.

Das Unternehmen hat das Ziel, den Gesamtdeckungsbeitrag zu maximieren, wobei die für die Produktion verfügbare Kapazität beschränkt ist. Des weiteren wird angenommen, daß eine gewisse Menge x mindestens produziert werden muß, damit die Produktion technologisch durchführbar ist.

Ansatzmöglichkeiten für umweltpolitische Instrumente sollen in diesem Basismodell in einer Obergrenze für die Umweltbelastung (z.B. durch Emissionen oder durch Abfälle), in der Berücksichtigung von Umweltbelastungsgebühren und in der direkten Einflußnahme auf die übrigen Parameter bestehen. Dieser Ansatz führt auf das in Kapitel 2.1 dargestellte Modell einer Leontief-Technologie mit zwei Prozessen.

Obwohl das Modell relativ stark abstrahiert und vereinfacht, hat es sich für die weiteren Untersuchungen bewährt, denn es ermöglicht eine explizite Angabe der Optimallösung in Abhängigkeit von den Parametern und es repräsentiert eine wichtige unternehmerische Entscheidung: die Auswahl zwischen zwei Produktionsverfahren, von denen eines in der Regel umweltfreundlicher und das andere umweltschädigender ist. Für die Beurteilung der Umweltwirkungen der Produktion (s. Abbildung 1) kommt es also darauf an, in welchem Verhältnis diese beiden Verfahren miteinander kombiniert werden.

Der Bereich der zulässigen Alternativen ist (neben der technologischen Mindestmenge) durch zwei Kapazitätsrestriktionen beschränkt: durch eine Obergrenze für die verfügbaren Produktionsfaktoren (z.B. Rohstoffe oder Arbeitszeit) und durch eine Obergrenze für die verfügbaren Umweltressourcen (Emissionen). Man betrachtet hier also zwei verschiedene Formen der Intensität von Prozessen: die Rohstoff-Intensität und die Umwelt-Intensität. Die dabei möglichen Konstellationen können zu einem Regelfall und einem Ausnahmefall zusammengefaßt werden.

Der triviale Ausnahmefall liegt dann vor, wenn ein Prozeß den anderen dominiert, d.h. wenn einer der beiden Prozesse sowohl ressourcenschonender als auch umweltfreundlicher als der andere ist. Alle übrigen Konstellationen bilden den Regelfall mit einem umweltfreundlicheren und einem ressourcenschonenderen Prozeß. Wir beschränken uns im weiteren auf diesen Regelfall und analysieren die Effekte, die auftreten, wenn die umweltpolitisch relevanten Modellparameter über alle möglichen Werte variiert werden. Dabei ergibt es sich, daß das Management in seiner Entscheidung über die optimale Prozeßwahl auf Änderungen in der Einwirkung eines umweltpolitischen Instruments jeweils nach ganz bestimmten Mustern reagiert. Es kann auch der Fall eintreten, daß ein umweltpolitisches Instrument überhaupt keine Auswirkungen auf die Prozeßwahl hat, d.h. daß sich am gewählten Prozeß oder der gewählten Kombination beider Prozesse bei beliebiger Einwirkung eines umweltpolitischen Instruments nichts ändert[2].

In den folgenden Abbildungen sind die angesprochenen Reaktionsmuster zusammengestellt.
Die Abbildung 2 zeigt Auswirkungen für das Instrument Umweltauflagen[3].

[2] Auswirkungen auf die Höhe des optimalen Deckungsbeitrages wurden in dieser Arbeit nicht untersucht. Diese Problematik wurde u.a. in [Steven 1994] behandelt.

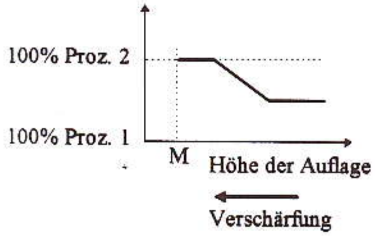
[3] Vgl. hierzu Abschnitt 4.1.

		Regelfall (ohne Wirkung eines umweltpolitischen Instruments)		
		D: Umweltschonender Prozeß optimal	E: Kombin. beider Prozesse optimal	F: Ressourcensch. Prozeß optimal
Auflagen	A: für Produktmenge	keine Auswirkungen	Muster I, II o. keine Auswirkungen	keine Auswirkungen
	B: für Rohstoffverbrauch	Muster III	Muster II	keine Auswirkungen
	C: für Emissionen	keine Auswirkungen	Muster I	Muster IV

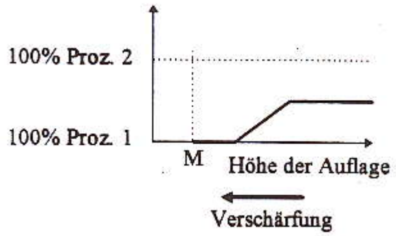
Abbildung 2: Auswirkungen von Umweltauflagen auf die Prozeßauswahl

Die einzelnen Muster[4,5] haben das folgende Aussehen:

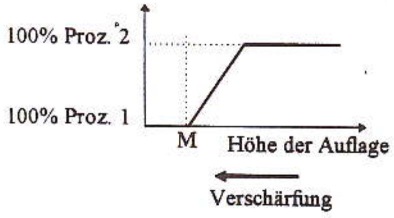
Muster I



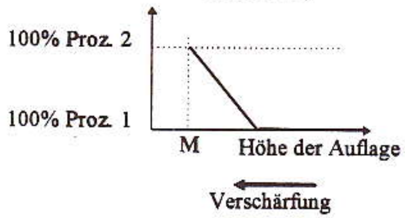
Muster II



Muster III



Muster IV



Daraus lassen sich einige Aussagen ableiten:

1. Die Umweltauflagen greifen erst ab einem gewissen Schwellenwert, danach wirken sie so, daß der Anteil eines der beiden Prozesse soweit zurückgeht, bis nur noch der andere Prozeß verwendet wird (Fälle: [A,E], [B,D], [B,E], [C,E], [C,F]).

[4] In den folgenden Mustern wird als Prozeß 1 der ressourcenschonendere Prozeß und als Prozeß 2 der umweltschonendere Prozeß angenommen.

[5] M bezeichnet den kleinstmöglichen Wert, für den unter den gegebenen Nebenbedingungen noch zulässige Alternativen für die Prozeßwahl existieren. (Eine noch weitere Verschärfung der Auflagen führt dann dazu, daß nicht mehr produziert werden kann.)

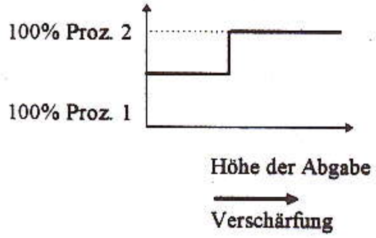
2. Es gibt Fälle, in denen eine Umweltauflage überhaupt keine Wirkung hat (Fälle: [A,D], [A,F)], [B,F], [C,D], [A,E]).
3. Ein vollständiger Prozeßwechsel vom ressourcenintensiveren zum ressourcenschonenderen Prozeß findet erst statt, wenn die Auflage für den Rohstoffverbrauch ihren größtmöglicher Wert annimmt (Fall: [B,D]).
4. Ein vollständiger Prozeßwechsel vom umweltintensiveren zum umweltschonenderen Prozeß findet erst statt, wenn die Emissionsauflage ihren größtmöglichen Wert annimmt (Fall: [C,F]).

In der Abbildung 3 werden die Auswirkungen des umweltpolitischen Instruments Abgaben[6] aufgezeigt:

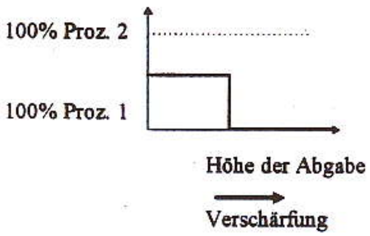
		Regelfall (ohne Wirkung eines umweltpolitischen Instrumentes)		
		D: Umweltschon. Prozeß optimal	E: Kombin. beider Prozesse optimal	F: Ressourcensch. Prozeß optimal
Abgaben	A: auf Produktmenge	keine Auswirkungen	Muster VI, VII o. keine Auswirkungen	keine Auswirkungen
	B: auf Rohstoffverbrauch	keine Auswirkungen	Muster VII	keine Auswirkungen
	C: auf Emissionen	keine Auswirkungen	Muster VI	keine Auswirkungen

Abbildung 3: Auswirkungen von Umweltabgaben auf die Prozeßauswahl

Muster VI



Muster VII



Folgende Aussagen lassen sich ableiten:

1. Umweltabgaben zeigen keine Wirkung, wenn es ohne Einfluß umweltpolitischer Instrumente optimal war, nur nach einem Prozeß zu produzieren (Fälle: [A,D], [A,F], [B,D], [B,F], [C,D], [C,F]).
2. War es dagegen optimal, nach einer Kombination beider Prozesse zu produzieren, dann greifen die Abgaben erst ab einem Schwellenwert (bis auf eine Ausnahme). Bei Überschreiten dieses Schwellenwertes ändert sich die optimale Lösung sprungartig, es wird dann nur noch nach einem Prozeß produziert (Fälle: [A,E], [B,E], [C,E]).

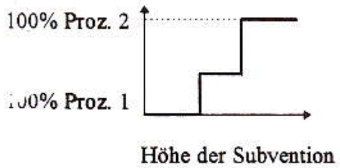
[6] Vgl. hierzu Abschnitt 4.2.

Es gibt darüber hinaus verschiedene Arten von Subventionen zur Verbesserung der Umweltschutzmaßnahmen in Unternehmen, beispielsweise Zuschüsse, Sonderabschreibungen oder zinsgünstige Darlehen. In dieser Studie wurde der Fall betrachtet, daß Produkte dann subventioniert werden, wenn sie nach dem umweltfreundlicheren Prozeß gefertigt werden. In der Abbildung 4 sind die Wirkungen dieser Art von Subventionen[7] zusammengestellt.

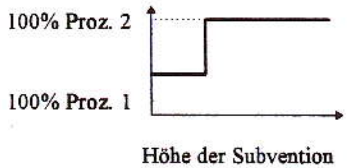
	Regelfall (ohne Wirkung eines umweltpolitischen Instrumentes)		
	D: Umweltschon. Prozeß optimal	E: Komb. beider Prozesse optimal	F: Ressourcensch. Prozeß optimal
Subventionen	keine Auswirkungen	Muster IX	Muster VIII

Abbildung 4: Auswirkungen von Subventionen auf die Prozeßauswahl

Muster VIII



Muster IX



Subventionen bewirken in jedem Fall bei Überschreiten eines Schwellenwertes, daß nur nach dem umweltfreundlicherem Prozeß 2 produziert wird (Fälle E,F).

Bei der Berücksichtigung von Umweltzertifikaten wird von den folgenden drei Annahmen ausgegangen:

a) Der Zertifikatskauf ist erst ab einer bestimmten Schadstoffmenge notwendig.
b) Eine beliebig kleine Stückelung der Schadstoffmengen, für die Zertifikate erworben werden können, ist möglich.
c) Schadstoffmengen und Zertifikatskosten sind proportional.

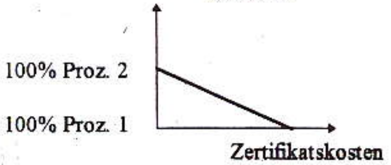
In Abbildung 5 sind Auswirkungen beim Kauf von Zertifikaten[8] dargestellt:

	Regelfall (ohne Wirkung eines umweltpolitischen Instrumentes)		
	D: Umweltschon. Prozeß optimal	E: Kombin. beider Prozesse optimal	F: Ressourcensch. Prozeß optimal
Zertifikate	keine Auswirkungen	Muster X oder keine Auswirkungen	keine Auswirkungen

Abbildung 5: Auswirkungen von Umweltzertifikaten auf die Prozeßauswahl

[7] Vgl. hierzu Abschnitt 4.3.
[8] Vgl. hierzu Abschnitt 4.4.

Muster X



Es zeigt sich, daß eine Veränderung der Optimallösungen nicht stattfindet, falls die Zertifikatskosten den zusätzlich erwirtschafteten Deckungsbeitrag übersteigen. Zertifikate wirken nur, wenn

a) der zusätzlich erwirtschaftete Deckungsbeitrag die Zertifikatskosten übersteigt,
b) ohne Einfluß dieses umweltpolitischen Instruments eine Kombination beider Prozesse optimal war (Fall E).

Grundsätzlich kann man die Auswirkungen von Zertifikaten wie folgt beschreiben:

1. Mit zunehmenden Zertifikatskosten nimmt der Anteil des ressourcenschonenderen Prozesses zu.

2. Es gibt eine Schadstoffmengen- und damit eine Kostengrenze. Es ist nicht optimal, über diese Grenze hinaus Zertifikate zu erwerben.

Die Auswirkungen des Einflusses der betrachteten umweltpolitischen Instrumente sind nicht nur von einzelwirtschaftlichem Interesse. Es kann beispielsweise angenommen werden, daß der Staat anstrebt, daß Unternehmen nach dem umweltschonenderen, also weniger umweltschädliche Emissionen verursachenden Prozess produzieren, und versucht, dieses Ziel durch Einsatz der in dieser Studie untersuchten Instrumente zu erreichen. Die Analyse zeigt, daß ein Prozeßwechsel vom umweltintensiveren zum umweltschonenderen Prozeß nicht immer stattfinden muß. Zertifikate und Emissionsabgaben sind ohne Wirkungen. Emissionsauflagen wirken erst beim größtmöglichen, für das Unternehmen noch tragbaren Wert. Nur Subventionen zeigen ab einer gewissen Höhe problemlos den gewünschten Erfolg.

Die Studie ist nun im weiteren wie folgt aufgebaut: Im Kapitel 2 wird das verwendete Basismodell sowie die Struktur seiner Lösung vorgestellt, während im nächsten Kapitel die einzelnen umweltpolitischen Instrumente des Staates zusammengestellt und eingeordnet sind. Kapitel 4 ist der Sensitivitätsanalyse des Modells gewidmet, und das letzte Kapitel besteht schließlich aus einer Zusammenfassung und Auswertung der Ergebnisse.

2. LEONTIEF-Technologie mit 2 Prozessen

2.1. Das Modell

Das betrachtete Modell geht von einem Einprodukt-Produktionssystem aus. Zur Herstellung diese Produktes können 2 Prozesse verwendet werden, die sich durch einen unterschiedlichen Ressourcenverbrauch und eine unterschiedliche Umweltbelastung auszeichnen. Obergrenzen für die Beschaffung und für die Umweltbelastung seien vorgegeben. Aus technologischen Gründen darf eine bestimmte Produktionsmenge nicht unterschritten werden.

Die genannten Annahmen führen zu folgender Variablen- und Konstantendefinition:

Entscheidungsvariablen:	x_1	Produktionsmenge mit Prozeß 1
	x_2	Produktionsmenge mit Prozeß 2
Konstanten	a_1	Ressourcenverbrauch pro ME des Produktes nach Prozeß 1
(Parameter)	a_2	Ressourcenverbrauch pro ME des Produktes nach Prozeß 2
	c_1	Umweltbelastung pro ME des Produktes mit Prozeß 1
	c_2	Umweltbelastung pro ME des Produktes mit Prozeß 1
	$\bar{x}$	technologische Untergrenze
	$\bar{r}$	Beschaffungsobergrenze
	$\bar{v}$	Umweltbelastungsobergrenze

Damit ergibt sich das folgende Modell für den zulässigen Bereich:

Modell 1: (zulässiger Bereich)

$$x_1 + x_2 \geq \bar{x}$$
$$a_1x_1 + a_2x_2 \leq \bar{r}$$
$$c_1x_1 + c_2x_2 \leq \bar{v}$$
$$x_1, x_2 \geq 0$$

Dieses Modell beschreibt den Bereich der nach den getroffenen Annahmen zulässigen Prozeßmengen.

Der Fall $x_i \geq \bar{x}_i$ für i = 1 oder 2 wurde nicht betrachtet, da das Modell leicht in obiges transformiert werden kann.

Ein wichtiges Kriterium für ein Unternehmen ist die Höhe des Deckungsbeitrages. Dieser berechnet sich aus der Differenz zwischen dem Erlös und den variablen Kosten. Neben den variablen Produktionskosten sollen dabei auch variable Umweltverschmutzungskosten betrachtet werden.

Das Modell 1 wird nun um die zu maximierende Deckungsbeitragsfunktion erweitert, dabei seien noch die folgenden Parameter ergänzt:

e	Kosten (Gebühr) pro Schadstoff-ME
q	Kosten pro Ressourcen-ME

Daraus erhält man das folgende Entscheidungsmodell:

Modell 2: (lineares Optimierungsmodell)

$$(p - qa_1 - ec_1)x_1 + (p - qa_2 - ec_2)x_2 \longrightarrow \max$$

$$x_1 + x_2 \geq \bar{x}$$
$$a_1x_1 + a_2x_2 \leq \bar{r}$$
$$c_1x_1 + c_2x_2 \leq \bar{v}$$
$$x_1, x_2 \geq 0$$

Im folgenden Abschnitt ist die Struktur der optimalen Lösung des Modells 2 beschrieben.

2.2. Die Lösungsstruktur

<u>*Dominanz eines Prozesses*</u>

Falls ein Prozeß den anderen dominiert, d. h. wenn er sowohl ressourcenschonender als auch umweltschonender ist, dann ist es für das Unternehmen immer optimal, nur diesen Prozeß anzuwenden. Die Anzahl der herzustellenden Produkte richtet sich dann nach der schärfsten Restriktion (Beschaffungsobergrenze oder Umweltbelastungsobergrenze).

Zum Beweis dieser Aussage nehmen wir an, es sei $a_1 < a_2$ und $c_1 < c_2$. Der Prozeß 1 dominiert also den Prozeß 2. Dann gilt $(p-qa_1-ec_1) > (p-qa_2-ec_2)$.

Daraus folgen die Beziehungen $\frac{-(p - qa_1 - ec_1)}{(p - qa_2 - ec_2)} < \frac{-a_1}{a_2}$ und $\frac{-(p - qa_1 - ec_1)}{(p - qa_2 - ec_2)} < \frac{-c_1}{c_2}$

Der Anstieg einer Niveaulinie[1] der Zielfunktion $\frac{-(p - qa_1 - ec_1)}{(p - qa_2 - ec_2)}$ ist damit steiler als die Anstiege der Restriktionsfunktionen und damit hat die optimale Lösung immer die Struktur $x^* = (x_1^*;0)$, wobei

$x_1^* = \frac{\bar{r}}{a_1}$ (bei schärferer Beschaffungsobergrenze) oder

$x_1^* = \frac{\bar{v}}{c_1}$ (bei schärferer Umweltbelastungsobergrenze).

Bei den weiteren Untersuchungen kann man sich also auf den Fall nicht dominierender Prozesse beschränken.

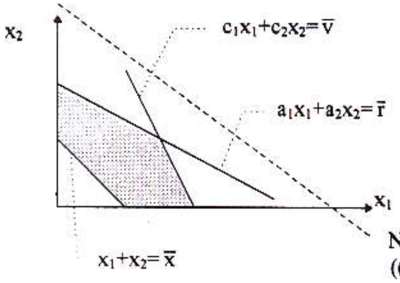
[1] Eine Niveaulinie kennzeichnet alle Lösungen, die einen konstanten Zielfunktionswert ergeben. Die Niveaulinien bilden hier eine Schar paralleler Geraden und haben deshalb alle denselben Anstieg.

Nichtdominierende Prozesse

Es sei deshalb $a_2 > a_1$ und $c_2 < c_1$. Der Prozeß 1 sei damit also ressourcenschonender und der Prozeß 2 umweltschonender.
Die Struktur der optimalen Lösung soll zuerst für den folgenden Fall untersucht werden:

$$\bar{x} \leq \frac{\bar{r}}{a_2} < \frac{\bar{v}}{a_2} \quad \text{und} \quad \bar{x} \leq \frac{\bar{v}}{c_1} < \frac{\bar{r}}{c_1}.$$

Alle anderen Fälle entstehen durch Verschiebung der Restriktionsgeraden und werden bei den parametrischen Untersuchungen im Abschnitt 4.1. betrachtet.



Niveaulinie der Zielfunktion
$((p - qa_1 - ec_1)x_1 + (p - qa_2 - ec_2)x_2 = \text{const.})$

Eine weitere Annahme für die Untersuchung soll sein, daß der Deckungsbeitrag für jeden Prozeß positiv ist. Sollte ein Prozeß einen nichtpositiven und der andere einen positiven Deckungsbeitrag haben, kann daraus geschlußfolgert werden, daß dann nur nach dem Prozeß mit dem positiven Deckungsbeitrag produziert wird. Sollten beide Prozesse nichtpositive Deckungsbeiträge haben, dann kann man davon ausgehen, daß keine Produktion stattfindet.

Aus der Annahme positiver Deckungsbeiträge, also $p\text{-}qa_1\text{-}ec_1 > 0$ und $p\text{-}qa_2\text{-}ec_2 > 0$ folgt, daß der Anstieg einer Niveaulinie der Zielfunktion $\frac{-(p - qa_1 - ec_1)}{(p - qa_2 - ec_2)}$ immer negativ ist.

Zur Untersuchung der optimalen Lösungen des Problems kann man deshalb 5 Fälle unterscheiden.

1. Fall:

$$\frac{-(p - qa_1 - ec_1)}{(p - qa_2 - ec_2)} > \frac{-a_1}{a_2} \quad \text{dann ist } x^* = (0; \frac{\bar{r}}{a_2})$$

2. Fall:

$$\frac{-(p - qa_1 - ec_1)}{(p - qa_2 - ec_2)} = \frac{-a_1}{a_2} \quad \text{dann ist } x^* = \lambda(0; \frac{\bar{r}}{a_2}) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2}) \quad \lambda \in [0,1]$$

3. Fall:

$$\frac{-c_1}{c_2} < \frac{-(p - qa_1 - ec_1)}{(p - qa_2 - ec_2)} < \frac{-a_1}{a_2} \quad \text{dann ist } x^* = (\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$$

4. Fall:

$$\frac{-(p - qa_1 - ec_1)}{(p - qa_2 - ec_2)} = \frac{-c_1}{c_2} \quad \text{dann ist } x^* = \lambda(\frac{\bar{v}}{c_1}; 0) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2}) \quad \lambda \in [0,1]$$

5. Fall:

$$\frac{-(p - qa_1 - ec_1)}{(p - qa_2 - ec_2)} < \frac{-c_1}{c_2} \quad \text{dann ist } x^* = (\frac{\bar{v}}{c_1}; 0)$$

3. Klassifizierung der umweltpolitischen Instrumente

Die Vielfalt der umweltpolitischen Instrumente zwingt dazu, eine Klassifizierung vorzunehmen. Nach dem Kriterium des Einflusses auf öffentliche Einnahmen und Ausgaben stellt Wicke [1991] die umweltpolitischen Instrumente wie folgt dar[2]:

Instrumente der Umweltpolitik

a) Nicht-fiskalische Instrumente

- Umweltauflagen
- Umweltbedeutsame Änderungen der rechtlichen Rahmenbedingungen
- Umweltpolitische Kooperationslösungen
- Zwangfreie nicht-fiskalische umweltpolitische Instrumente
- Benutzervorteile
- Umweltplanerische Instrumente

b) Umweltpolitik mit öffentlichen Ausgaben

- Direkter öffentlicher Umweltschutz mit Gebühren- und Beitragsfinanzierung
- Direkter öffentlicher Umweltschutz mit Steuerfinanzierung
- Finanzierung sonstiger umweltrelevanter Maßnahmen
- Umweltbewußte staatliche Beschaffungspolitik (Vorreiterrolle des Staates)
- Induzieren umweltverbessernder (privat-)wirtschaftlicher Aktivitäten
- Umweltbedeutsame Forschungs- und Entwicklungsförderung
- Finanzierung des institutionellen Umweltschutzes

[2] Wicke, L. (1991), S.166

c) Umweltpolitik mit öffentlichen Einnahmen

- Umweltlizenzen
- Umweltabgaben

Diese umfassende Klassifizierung umweltpolitischer Instrumente ist vorrangig aus staatlicher Perspektive erstellt worden. Ventzke[3] betrachtet diese Instrumente aus unternehmerischer Sicht und versucht die Wirkungen auf betriebswirtschaftliche Probleme zu prognostizieren. Er unterscheidet Preis- und Mengenlösungen. Wenn der Gesetzgeber festlegt, in welchem mengenmäßigem Ausmaß eine ökologische Ressource maximal ausgebeutet werden darf, so spricht man von Mengenlösungen. Der Entscheidungsrahmen der Unternehmen wird dadurch beschränkt, daß ökologische Restriktionen vorgegeben werden. Wenn der Gesetzgeber einen Preis für die Umweltnutzung vorgibt, so ist das eine Preislösung. Ökologische Ressourcen, die verbraucht werden, werden damit kostenwirksam und bewirken über die Zielfunktion der Unternehmen eine Änderung des Verhaltens.

Mengenlösungen (nach [Ventzke 1993])

- Auflagen für die Produktion
- Auflagen für die Produktionsverfahren
- Auflagen hinsichtlich der Emissionen
- Zertifikate

Preislösungen (nach [Ventzke 1993])

- Abgaben auf eingesetzte Rohstoffmengen
- Abgaben auf gefertigte Produkte
- Abgaben auf freigesetzte Schadstoffe

Andere Instrumente (nach [Ventzke 1993])

- Moral suasion
- Infrastrukturmaßnahmen
- Subventionen

[3] Ventzke, R. (1993) S. 20ff

4. Die Wirkungen der umweltpolitischen Instrumente auf das Modell und die Veränderung der Lösungsstruktur

In den folgenden Teilabschnitten sollen die umweltpolitischen Instrumente vorgestellt werden, die Einfluß auf das im Abschnitt 2 präsentierte Modell haben. Weiterhin werden die Auswirkungen dieser Instrumente auf die Lösungsstruktur des Modells untersucht, wobei jedoch auf eine Kombination mehrerer Instrumente, das heißt eine gleichzeitige Veränderung mehrerer Parameter verzichtet wurde.

4.1. Auflagen[1]

4.1.1. Mengenlimitierung für die Produktion

Zur Einschränkung der Herstellung von Produkten, die umweltbelastend sind, kann der Gesetzgeber eine Mengenlimitierung für diese Produkte einführen. Bei Betrachtung dieses umweltpolitischen Instruments ergibt sich für das obige Modell 2 eine zusätzliche Restriktion: $x_1 + x_2 \le \hat{x}$.

Ob diese Restriktion Einfluß auf den zulässigen Bereich hat, hängt von der Größe der Mengenlimitierung $\hat{x}$ ab. Ist $\hat{x} < \bar{x}$ dann ist offensichtlich, daß eine Produktion unmöglich ist. Eine Wirkung auf den zulässigen Bereich und damit eine Veränderung der Lösungsstruktur tritt erst ein, wenn $\hat{x} < \frac{\bar{v}(a_2 - a_1) + \bar{r}(c_1 - c_2)}{c_1 a_2 - a_1 c_2}$ gilt.

Ausgehend von den optimalen Lösungen , die bei der Betrachtung der 5 Fälle aus Kapitel 2.2. ermittelt wurden, soll nun die Veränderung der Lösungsstruktur für den Parameter $\bar{x}$ gezeigt werden. Zur Vereinfachung werde im weiteren $T = \frac{\bar{v}(a_2 - a_1) + \bar{r}(c_1 - c_2)}{c_1 a_2 - a_1 c_2}$ bezeichnet.

<u>1. Fall:</u>

Man hat im Modell 2 die optimale Lösung $x^* = (0; \frac{\bar{r}}{a_2})$ erhalten.

a) Falls $\hat{x} \ge \frac{\bar{r}}{a_2}$, dann bleibt als optimale Lösung $x^* = (0; \frac{\bar{r}}{a_2})$.

b) Falls $\bar{x} \le \hat{x} < \frac{\bar{r}}{a_2}$ dann ist $x^* = (0; \hat{x})$.

<u>2. Fall:</u>

Das Unternehmen produziert nach einer der möglichen, im Modell 2 erhaltenen optimalen Lösungen $x^* = \lambda(0; \frac{\bar{r}}{a_2}) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$ $\lambda \in [0,1]$.

[1] Vgl. Abbildung 2

a) Falls $\hat{x} \geq T$, dann bleibt $x^* = \lambda(0; \frac{\bar{r}}{a_2}) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$ $\lambda \in [0,1]$.

b) Falls $\frac{\bar{r}}{a_2} \leq \hat{x} < T$, dann ist $x^* = \lambda(0; \frac{\bar{r}}{a_2}) + (1-\lambda)(\frac{a_2\hat{x} - \bar{r}}{a_2 - a_1}; \frac{\bar{r} - a_1\hat{x}}{a_2 - a_1})$ $\lambda \in [0,1]$.

c) Falls $\bar{x} \leq \hat{x} < \frac{\bar{r}}{a_2}$, dann ist $x^* = (0; \hat{x})$.

3. Fall:

Man hat im Modell 2 die optimale Lösung $x^* = (\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$ erhalten. Weiterhin sei $\frac{\bar{r}}{a_2} \geq \frac{\bar{v}}{c_1}$ angenommen. (Der Fall $\frac{\bar{r}}{a_2} < \frac{\bar{v}}{c_1}$ kann analog dazu betrachtet werden.)

a) Falls $\hat{x} \geq T$, dann bleibt $x^* = (\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$.

b) Falls $\frac{\bar{v}}{c_1} \leq \hat{x} < T$ müssen 3 Fälle betrachtet werden.

b1) Wenn $-1 < \frac{-(p - qa_1 - ec_1)}{(p - qa_2 - ec_2)} < \frac{-a_1}{a_2}$, dann ist $x^* = (\frac{a_2\hat{x} - \bar{r}}{a_2 - a_1}; \frac{\bar{r} - a_1\hat{x}}{a_2 - a_1})$.

b2) Wenn $\frac{-(p - qa_1 - ec_1)}{(p - qa_2 - ec_2)} = -1$, dann ist

$$x^* = \lambda(\frac{c_2\hat{x} - \bar{v}}{c_2 - c_1}; \frac{\bar{v} - c_1\hat{x}}{c_2 - c_1}) + (1-\lambda)(\frac{a_2\hat{x} - \bar{r}}{a_2 - a_1}; \frac{\bar{r} - a_1\hat{x}}{a_2 - a_1}) \quad \lambda \in [0,1]$$

b3) Wenn $\frac{-c_1}{c_2} < \frac{-(p - qa_1 - ec_1)}{(p - qa_2 - ec_2)} < -1$, dann ist $x^* = (\frac{c_2\hat{x} - \bar{v}}{c_2 - c_1}; \frac{\bar{v} - c_1\hat{x}}{c_2 - c_1})$.

c) Falls $\frac{\bar{r}}{a_2} \leq \hat{x} < \frac{\bar{v}}{c_1}$ müssen 3 Fälle betrachtet werden.

c1) Wenn $-1 < \frac{-(p - qa_1 - ec_1)}{(p - qa_2 - ec_2)} < \frac{-a_1}{a_2}$, dann ist $x^* = (\frac{a_2\hat{x} - \bar{r}}{a_2 - a_1}; \frac{\bar{r} - a_1\hat{x}}{a_2 - a_1})$.

c2) Wenn $\frac{-(p - qa_1 - ec_1)}{(p - qa_2 - ec_2)} = -1$, dann ist

$$x^* = \lambda(\hat{x}; 0) + (1-\lambda)(\frac{a_2\hat{x} - \bar{r}}{a_2 - a_1}; \frac{\bar{r} - a_1\hat{x}}{a_2 - a_1}) \quad \lambda \in [0,1].$$

c3) Wenn $\frac{-c_1}{c_2} < \frac{-(p - qa_1 - ec_1)}{(p - qa_2 - ec_2)} < -1$, dann ist $x^* = (\hat{x}; 0)$.

d) Falls $\bar{x} \leq \hat{x} < \frac{\bar{r}}{a_2}$ müssen 3 Fälle betrachtet werden.

d1) Wenn $-1 < \frac{-(p - qa_1 - ec_1)}{(p - qa_2 - ec_2)} < \frac{-a_1}{a_2}$, dann ist $x^* = (0; \hat{x})$.

d2) Wenn $\frac{-(p - qa_1 - ec_1)}{(p - qa_2 - ec_2)} = -1$, dann ist $x^* = \lambda(\hat{x}; 0) + (1-\lambda)(0; \hat{x})$ $\lambda \in [0,1]$.

d3) Wenn $\frac{-c_1}{c_2} < \frac{-(p - qa_1 - ec_1)}{(p - qa_2 - ec_2)} < -1$, dann ist $x^* = (\hat{x}; 0)$.

4. Fall:

Das Unternehmen produziert nach einer der möglichen, im Modell 2 erhaltenen optimalen Lösungen $x^* = \lambda(\frac{\bar{v}}{c_1}; 0) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$ $\lambda \in [0,1]$.

a) Falls $\hat{x} \geq T$, dann bleibt $x^* = \lambda(\frac{\bar{v}}{c_1}; 0) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$ $\lambda \in [0,1]$.

b) Falls $\frac{\bar{v}}{c_1} \leq \hat{x} < T$, dann ist $x^* = \lambda(\frac{c_2\hat{x} - \bar{v}}{c_2 - c_1}; \frac{\bar{v} - c_1\hat{x}}{c_2 - c_1}) + (1-\lambda)(\frac{\bar{v}}{c_1}; 0)$ $\lambda \in [0,1]$.

c) Falls $\bar{x} \leq \hat{x} \leq \frac{\bar{v}}{c_1}$, dann ist $x^* = (\hat{x}; 0)$.

5. Fall:

Man hat im Modell 2 die optimale Lösung $x^* = (\frac{\bar{v}}{c_1}; 0)$ erhalten.

a) Falls $\hat{x} \geq \frac{\bar{v}}{c_1}$, dann ist $x^* = (\frac{\bar{v}}{c_1}; 0)$.

b) Falls $\bar{x} \leq \hat{x} \leq \frac{\bar{v}}{c_1}$, dann ist $x^* = (\hat{x}; 0)$.

Fazit:

Wenn es für das Unternehmen nach Modell 2 optimal ist, mit nur einem Prozeß zu produzieren (Fälle 1 und 5), dann bleibt das auch so, wenn eine Produktmengenlimitierung eingeführt wird. Die Höhe der Produktion richtet sich danach, welche Restriktion wirkt (Beschaffungsobergrenze/Umweltbelastungsobergrenze oder Mengenlimitierung).

Wenn es für das Unternehmen nach Modell 2 optimal ist, mit einer Kombination beider Prozesse zu produzieren, dann kommt es bei einer Produktmengenlimitierung zu Veränderungen in der Kombination. Bei Verschärfung der Restriktion nimmt die Höhe der Produktion eines Prozesses zu, während die des anderen abnimmt. Ist die Restriktion der Mengenlimitierung so stark, daß nur noch diese wirkt, dann wird nur noch nach einem Prozeß in der Höhe der Mengenlimitierung produziert.

4.1.2. Auflagen auf Produktionsverfahren

Bei Auflagen auf Produktionsverfahren können Auflagen auf die Inputs und die Betriebsmittel betrachtet werden. Da Betriebsmittel im Modell 2 nicht berücksichtigt werden, entfällt also die Wirkung auf dieses Modell.

Für eine Inputlimitierung betrachtet man die zweite Nebenbedingung des Modells 2: $a_1x_1 + a_2x_2 \le \bar{r}$. Dabei ist $\bar{r}$ die Beschaffungsobergrenze der betrachteten Ressource. Eine vom Staat festgelegte Auflage wird wie folgt abgebildet: $a_1x_1 + a_2x_2 \le \hat{r}$. Falls $\hat{r} > \bar{r}$ braucht das Modell 2 nicht geändert werden. Die Veränderungen der optimalen Lösungen des Modells 2 sollen nun bei Änderung des Parameters $\hat{r}$ betrachtet werden.

<u>1. Fall:</u>

Man hat im Modell 2 die optimale Lösung $x^* = (0; \frac{\bar{r}}{a_2})$ erhalten.

a) Falls $a_2\bar{x} \le \hat{r} \le \bar{r}$, dann bleibt als optimale Lösung $x^* = (0; \frac{\bar{r}}{a_2})$.

b) Falls $a_1\bar{x} \le \hat{r} < a_2\bar{x}$, dann ist $x^* = (\frac{a_2\bar{x} - \hat{r}}{a_2 - a_1}; \frac{\hat{r} - a_1\bar{x}}{a_2 - a_1})$.

<u>2. Fall:</u>

Das Unternehmen produziert nach einer der möglichen, im Modell 2 erhaltenen optimalen Lösungen $x^* = \lambda(0; \frac{\bar{r}}{a_2}) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$ $\lambda \in [0,1]$. Es sei $\frac{\bar{v}}{c_1} < \frac{\bar{r}}{a_1}$. (Der andere Fall wird analog betrachtet.)

a) Falls $a_2\bar{x} \le \hat{r} < \bar{r}$, dann ist $x^* = \lambda(0; \frac{\hat{r}}{a_2}) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{v} - c_2\hat{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\hat{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$ $\lambda \in [0,1]$.

b) Falls $a_1\frac{\bar{v}}{c_1} \le \hat{r} < a_2\bar{x}$, dann ist

$$x^* = \lambda(\frac{a_2\bar{x} - \hat{r}}{a_2 - a_1}; \frac{\hat{r} - a_1\bar{x}}{a_2 - a_1}) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{v} - c_2\hat{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\hat{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2}) \quad \lambda \in [0,1]$$

c) Falls $a_1\bar{x} \le \hat{r} < a_1\frac{\bar{v}}{c_1}$, dann ist $x^* = \lambda(\frac{a_2\bar{x} - \hat{r}}{a_2 - a_1}; \frac{\hat{r} - a_1\bar{x}}{a_2 - a_1}) + (1-\lambda)(\frac{\hat{r}}{a_1}; 0)$ $\lambda \in [0,1]$

<u>3. Fall:</u>

Man hat im Modell 2 die optimale Lösung $x^* = (\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$ erhalten.

a) Falls $a_1\frac{\bar{v}}{c_1} \le \hat{r} < \bar{r}$, dann ist $x^* = (\frac{a_2\bar{v} - c_2\hat{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\hat{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$.

b) Falls $a_1\bar{x} \le \hat{r} < a_1\frac{\bar{v}}{c_1}$, dann ist $x^* = (\frac{\hat{r}}{a_1}; 0)$.

<u>4. Fall:</u>

Das Unternehmen produziert nach einer der möglichen, im Modell 2 erhaltenen optimalen Lösungen $x^* = \lambda(\frac{\bar{v}}{c_1}; 0) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$ $\lambda \in [0,1]$.

a) Falls $a_1\frac{\bar{v}}{c_1} \le \hat{r} < \bar{r}$, dann ist $x^* = \lambda(\frac{\bar{v}}{c_1}; 0) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{v} - c_2\hat{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\hat{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$ $\lambda \in [0,1]$.

b) Falls $a_1\bar{x} \le \hat{r} < a_1\frac{\bar{v}}{c_1}$, dann ist $x^* = (\frac{\hat{r}}{a_1}; 0)$.

<u>5. Fall:</u>

Man hat im Modell 2 die optimale Lösung $x^* = (\frac{\bar{v}}{c_1}; 0)$ erhalten.

a) Falls $a_1\frac{\bar{v}}{c_1} \le \hat{r} < \bar{r}$, dann bleibt $x^* = (\frac{\bar{v}}{c_1}; 0)$.

b) Falls $a_1\bar{x} \le \hat{r} < a_1\frac{\bar{v}}{c_1}$, dann ist $x^* = (\frac{\hat{r}}{a_1}; 0)$.

<u>Fazit:</u>

Wenn es für das Unternehmen nach Modell 2 optimal ist, nur mit dem Prozeß 2, welcher ressourcenintensiver ist, zu produzieren, dann zwingt zwar eine wirksame Inputlimitierung das Unternehmen, die Produktion und damit den Ressourcenverbrauch einzuschränken, aber eine Kombination mit dem ressourcenschonenderen Prozeß 1 findet erst dann statt, wenn die Produktion nach Prozeß 2 an der technologischen Untergrenze $\bar{x}$ angelangt ist. Ein vollständiger Prozeßwechsel findet erst dann statt, wenn die Inputlimitierung so stark wirkt, daß dem Unternehmen nur noch eine Produktionsmöglichkeit bleibt, die technologische Untergrenze für Prozeß 1.

Wenn es für das Unternehmen nach Modell 2 optimal ist, nur mit dem Prozeß 1, welcher ressourcenschonender ist, zu produzieren, dann ändert sich daran auch bei unterschiedlichen Werten der Inputlimitierung nichts. Die Höhe der Produktion nach Prozeß 1 richtet sich danach, wie stark die Inputlimitierung wirkt.

Wenn es für das Unternehmen nach Modell 2 optimal ist, beide Prozesse zu kombinieren, dann verändert sich das Kombinationsverhältnis bei Inputlimitierungen derart, daß der ressourcenschonendere Prozeß 1 an Bedeutung gewinnt.

4.1.3. Emissionsauflagen

Der Fall der Betrachtung von Emissionsauflagen verhält sich ähnlich zu dem Fall der Inputlimitierung. Die dritte Nebenbedingung $c_1x_1 + c_2x_2 \le \bar{v}$ aus dem Modell 2 enthält als Konstante die Umweltbelastungsobergrenze $\bar{v}$. Um die Veränderbarkeit der Umweltbelastungsobergrenze zu zeigen, wird jetzt die Form $c_1x_1 + c_2x_2 \le \hat{v}$ mit dem Parameter $\hat{v}$ gewählt. Bei $\hat{v} > \bar{v}$ gibt es keine Wirkung auf das Modell 2 und dessen Lösungsstruktur.

Die Veränderungen der optimalen Lösungen des Modells 2 sollen nun bei Änderung des Parameters $\hat{v}$ betrachtet werden.

1. Fall:

Man hat im Modell 2 die optimale Lösung $x^* = (0; \frac{\bar{r}}{a_2})$ erhalten.

a) Falls $\bar{r}\frac{c_2}{a_2} \le \hat{v} \le \bar{v}$, dann bleibt als optimale Lösung $x^* = (0; \frac{\bar{r}}{a_2})$.

b) Falls $c_2\bar{x} \le \hat{v} < \bar{r}\frac{c_2}{a_2}$, dann ist $x^* = (0; \frac{\hat{v}}{2})$.

2. Fall:

Das Unternehmen produziert nach einer der möglichen, im Modell 2 erhaltenen optimalen Lösungen $x^* = \lambda(0; \frac{\bar{r}}{a_2}) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$ $\lambda \in [0,1]$.

a) Falls $\bar{r}\frac{c_2}{a_2} \le \hat{v} \le \bar{v}$, dann ist $x^* = \lambda(0; \frac{\bar{r}}{a_2}) + (1-\lambda)(\frac{a_2\hat{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\hat{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$ $\lambda \in [0,1]$.

b) Falls $c_2\bar{x} \le \hat{v} < \bar{r}\frac{c_2}{a_2}$, dann ist $x^* = (0; \frac{\hat{v}}{2})$.

3. Fall:

Man hat im Modell 2 die optimale Lösung $x^* = (\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$ erhalten.

a) Falls $\bar{r}\frac{c_2}{a_2} \le \hat{v} \le \bar{v}$, dann ist $x^* = (\frac{a_2\hat{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\hat{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$.

b) Falls $c_2\bar{x} \le \hat{v} < \bar{r}\frac{c_2}{a_2}$, dann ist $x^* = (0; \frac{\hat{v}}{2})$.

4. Fall:

Das Unternehmen produziert nach einer der möglichen, im Modell 2 erhaltenen optimalen Lösungen $x^* = \lambda(\frac{\bar{v}}{c_1}; 0) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$ $\lambda \in [0,1]$. Es sei $\frac{\hat{v}}{c_2} > \frac{\bar{r}}{a_2}$. (Der andere Fall kann analog betrachtet werden.)

a) Falls $c_1\bar{x} \le \hat{v} < \bar{v}$, dann ist $x^* = \lambda(\frac{\hat{v}}{c_1}; 0) + (1-\lambda)(\frac{a_2\hat{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\hat{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$ $\lambda \in [0,1]$.

b) Falls $c_2\frac{\bar{r}}{a_2} \le \hat{v} < c_1\bar{x}$, dann ist

$$x^* = \lambda(\frac{c_2\bar{x} - \hat{v}}{c_2 - c_1}; \frac{\hat{v} - c_1\bar{x}}{c_2 - c_1}) + (1-\lambda)(\frac{a_2\hat{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\hat{v}}{c_1a_2 - a_1c_2}) \quad \lambda \in [0,1]$$

c) Falls $c_2\bar{x} \le \hat{v} < c_2\frac{\bar{r}}{a_2}$, dann ist $x^* = \lambda(\frac{c_2\bar{x} - \hat{v}}{c_2 - c_1}; \frac{\hat{v} - c_1\bar{x}}{c_2 - c_1}) + (1-\lambda)(0; \frac{\hat{v}}{c_2})$ $\lambda \in [0,1]$

5. Fall:

Man hat im Modell 2 die optimale Lösung $x^* = (\frac{\bar{v}}{c_1}; 0)$ erhalten.

a) Falls $c_1\bar{x} \le \hat{v} < \bar{v}$, dann ist $x^* = \lambda(\frac{\hat{v}}{c_1}; 0)$.

c) Falls $c_2\bar{x} \le \hat{v} < c_1\bar{x}$, dann ist $x^* = (\frac{c_2\bar{x} - \hat{v}}{c_2 - c_1}; \frac{\hat{v} - c_1\bar{x}}{c_2 - c_1})$.

Fazit:

Wenn es für das Unternehmen nach Modell 2 optimal ist, nur mit dem umweltschädigenderen Prozeß 1 zu produzieren, dann zwingt zwar eine wirksame Emissionsauflage das Unternehmen, die Produktion und damit die Umweltbelastung einzuschränken, aber eine Kombination mit dem umweltschonenderen Prozeß 2 findet erst statt, wenn die Produktion nach Prozeß 1 an der technologischen Untergrenze $\bar{x}$ angelangt ist. Ein vollständiger Prozeßwechsel zu Prozeß 2 findet erst dann statt, wenn die Emissionsauflage so stark wirkt, daß dem Unternehmen nur noch eine Produktionsmöglichkeit bleibt, die technologische Untergrenze für Prozeß 2.

Wenn es für das Unternehmen nach Modell 2 optimal ist, nur mit dem Prozeß 2, welcher umweltschonender ist, zu produzieren, dann ändert sich daran auch bei unterschiedlichen Werten der Emissionsauflage nichts. Die Höhe der Produktion nach Prozeß 2 richtet sich danach, wie stark die Emissionsauflage wirkt.

Wenn es für das Unternehmen nach Modell 2 optimal ist, die beiden Prozesse miteinander kombiniert anzuwenden, dann verändert sich das Mengenverhältnis der Kombination bei Emissionsauflagen derart, daß der umweltschonendere Prozeß 2 an Bedeutung gewinnt.

4.2. Abgaben[1]

4.2.1. Emissionsabgaben

Das lineare Optimierungsproblem wird durch Betrachtung einer vom Staat festgelegten Emissionsabgabe (Umweltgebühr) zu einem linearen parametrischen Optimierungsproblem mit dem Parameter e in der Zielfunktion $(p - qa_1 - ec_1)x_1 + (p - qa_2 - ec_2)x_2 \longrightarrow \max$.

Da sich der zulässige Bereich (Modell 1) nicht ändert, gibt es auch keine Änderungen in den Fällen optimaler Lösungen, wie sie Im Kapitel 2.2 beschrieben worden sind. Die Frage ist aber, bei welcher Höhe der Umweltgebühr e, welcher der 5 Fälle eintritt und inwieweit die Umweltgebühr Auswirkungen auf die Wahl des umweltfreundlicheren Prozesses hat.

Als erstes muß untersucht werden, wie sich der Anstieg einer Niveaulinie der Zielfunktion bei Erhöhung des Parameters e verhält. Man stellt fest , daß der Vergleich der Deckungsbeiträge pro Schadstoffmengeneinheit $\frac{p - qa_1}{c_1}$ und $\frac{p - qa_2}{c_2}$ einen großen Einfluß auf die Änderung des Anstiegs einer Niveaulinie der Zielfunktion hat.

Es existieren 3 Möglichkeiten:

a) $\frac{p - qa_1}{c_1} < \frac{p - qa_2}{c_2}$, dann steigt bei wachsendem e der Anstieg einer Niveaulinie der Zielfunktion,

b) $\frac{p - qa_1}{c_1} = \frac{p - qa_2}{c_2}$, dann ändert sich bei wachsendem e der Anstieg einer Niveaulinie der Zielfunktion nicht,

c) $\frac{p - qa_1}{c_1} > \frac{p - qa_2}{c_2}$, dann fällt bei wachsendem e der Anstieg einer Niveaulinie der Zielfunktion.

Zur Beschreibung des Übergangs der optimalen Lösungen ist noch die Einführung einer Größe, die <u>kritische Umweltgebühr</u> genannt werden soll, notwendig: $e' = \frac{a_2 - a_1}{c_1a_2 - c_2a_1}p$. Außerdem soll die Veränderung der Umweltgebühr nur bis zu der Höhe betrachtet werden, die wenigstens noch einen positiven Deckungsbeitrag für einen der beiden Prozesse garantiert.

Optimale Lösungen:

a) wenn $\frac{p - qa_1}{c_1} < \frac{p - qa_2}{c_2}$, dann gilt:

[1] Vgl. Abbildung 3

a1) $0 \le e < e' \Rightarrow x^* = (\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$

a2) $e = e' \Rightarrow x^* = \lambda(0; \frac{\bar{r}}{a_2}) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2}) \qquad \lambda \in [0,1]$

a3) $e' < e < \frac{p-qa_2}{c_2} \Rightarrow x^* = (0; \frac{\bar{r}}{a_2})$

b) wenn $\frac{p - qa_1}{c_1} = \frac{p - qa_2}{c_2}$, dann gilt:

$$0 \le e < \frac{p-qa_1}{c_1} \Rightarrow x^* = \lambda(\frac{\bar{v}}{c_1}; 0) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2}) \qquad \lambda \in [0,1]$$

c) wenn $\frac{p - qa_1}{c_1} > \frac{p - qa_2}{c_2}$, dann gilt:

$$e < \frac{p-qa_2}{c_2} \Rightarrow x^* = (\frac{\bar{v}}{c_1}; 0)$$

Fazit:

Die Interpretation dieser Lösungsstruktur bringt einige interessante Ergebnisse:

Wenn der Deckungsbeitrag pro Schadstoffmengeneinheit des umweltschonenderen Prozesses geringer ist als derjenige des umweltschädlicheren Prozesses, dann ist es für das Unternehmen optimal, nur den umweltschädlicheren Prozeß anzuwenden. Eine Erhöhung der Umweltgebühr vom Staat ändert nichts an dieser Optimallösung. Man kann also die Schlußfolgerung ziehen, daß kleine Verbesserungen eines Prozesses bezüglich seiner Umweltverträglichkeit keine Auswirkungen auf das optimale Verhalten des Unternehmens haben.

Wenn der Deckungsbeitrag pro Schadstoffmengeneinheit des umweltschonenderen Prozesses größer ist als derjenige des umweltschädlicheren Prozesses verhält sich die optimale Lösung bei unterschiedlichen Umweltgebühren vollkommen anders. Wenn keine Umweltgebühr gefordert wird, dann ist die optimale Lösung der Schnittpunkt beider Restriktionsgeraden, also eine Kombination der beiden Prozesse. Bei Einführung einer Umweltgebühr bleibt diese Lösung so lange optimal bis die kritische Umweltgebühr e' erreicht wird. Ist die Umweltgebühr größer als die kritische Umweltgebühr, dann verändert sich die optimale Lösung zur reinen Anwendung des umweltfreundlicheren Prozesses. Die Wirksamkeit der Umweltgebühr ist also vorhanden. Das Unternehmen kann vom Staat zur Anwendung eines umweltfreundlicheren Prozesses gezwungen werden.

4.2.2. Abgaben auf den Ressourcenverbrauch

Die für die Produktion verbrauchte Ressourcenmenge $a_1x_1 + a_2x_2$ soll vom Staat mit einer Abgabe q^* belegt werden. Diese Abgabe erhöht die Beschaffungskosten der Ressource auf $(q+q^*)(a_1x_1 + a_2x_2)$. Für die weitere Betrachtung wird von Ressourcenkosten in Höhe von $q(a_1x_1 + a_2x_2)$ ausgegangen. Dabei ist q beliebig größer als 0 und in q sind sowohl die nicht vom Staat beeinflußten Ressourcenkosten als auch die Ressourcenabgabe enthalten.

Das Modell 2 wird daher zu einem parametrischem Optimierungsproblem mit dem Parameter q in der Zielfunktion $(p - qa_1 - ec_1)x_1 + (p - qa_2 - ec_2)x_2 \longrightarrow \max$.

Analog zu dem Fall der Emissionsabgabe kann festgestellt werden, daß sich der zulässige Bereich (Modell 1) nicht ändert und es daher auch zu keiner Änderung möglicher optimaler Lösungen kommt (siehe Kapitel 2.2). Es soll aber untersucht werden, bei welcher Höhe der Ressourcenabgabe welche Lösung optimal ist und inwieweit die Ressourcenabgabe Auswirkungen auf die Wahl des ressourcenschonenderen Prozesses hat.

Analog zum Emissionsabgaben-Fall wird zuerst untersucht, wie sich der Anstieg einer Niveaulinie der Zielfunktion bei Erhöhung des Parameters q verhält. Die Kennzahlen $\frac{p - ec_1}{a_1}$ und $\frac{p - ec_2}{a_2}$ haben dabei Einfluß auf die Änderung des Anstiegs einer Niveaulinie der Zielfunktion.

Es existieren 2 Möglichkeiten:

a) $\frac{p - ec_1}{a_1} < \frac{p - ec_2}{a_2}$, dann steigt bei wachsendem q der Anstieg einer Niveaulinie der Zielfunktion.

b) $\frac{p - ec_1}{a_1} = \frac{p - ec_2}{a_2}$, dann ändert sich bei wachsendem q der Anstieg einer Niveaulinie der Zielfunktion nicht.

c) $\frac{p - ec_1}{a_1} > \frac{p - ec_2}{a_2}$, dann fällt bei wachsendem q der Anstieg einer Niveaulinie der Zielfunktion.

Zur Beschreibung des Übergangs der optimalen Lösungen ist analog zur kritischen Umweltgebühr jetzt die Einführung einer Größe, die die kritischen Ressourcenkosten (einschließlich der Ressourcenabgabe) darstellt, notwendig: $q' = \frac{c_1 - c_2}{c_1a_2 - c_2a_1} p$. Außerdem soll die Veränderung der Ressourcenkosten wiederum nur bis zu der Höhe betrachtet werden, die einen positiven Deckungsbeitrag für zumindest einen der beiden Prozesse garantiert.

Optimale Lösungen:

a) wenn $\frac{p-ec_1}{a_1} < \frac{p-ec_2}{a_2}$, dann gilt:

$$q < \frac{p-ec_1}{a_1} \Rightarrow x^* = (0; \frac{\bar{r}}{a_2})$$

b) wenn $\frac{p-ec_1}{a_1} = \frac{p-ec_2}{a_2}$, dann gilt:

$$q < \frac{p-ec_1}{a_1} \Rightarrow x^* = \lambda(0; \frac{\bar{r}}{a_2}) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2}) \qquad \lambda \in [0,1]$$

c) wenn $\frac{p-ec_1}{a_1} > \frac{p-ec_2}{a_2}$, dann gilt:

c1) $q < q' \Rightarrow x^* = (\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$

c2) $q = q' \Rightarrow x^* = \lambda(\frac{\bar{v}}{c_1}; 0) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2}) \qquad \lambda \in [0,1]$

c3) $q' < q < \frac{p-ec_2}{a_2} \Rightarrow x^* = (\frac{\bar{v}}{c_1}; 0)$

Fazit:

Die Interpretation dieser Ergebnisse weist Analogien zum Fall der Emissionsgebühr auf. Wenn $\frac{p-ec_1}{a_1} < \frac{p-ec_2}{a_2}$, dann ist es optimal, nur mit dem ressourcenintensiveren Prozeß zu produzieren, unabhängig davon wie hoch die Abgabe auf die Ressourcenmenge ist (negative Deckungsbeiträge sollen dabei natürlich ausgeschlossen werden).

Wenn $\frac{p-ec_1}{a_1} > \frac{p-ec_2}{a_2}$, dann kann der Staat das Unternehmen zum ressourcenschonenderen Prozeß durch Erhöhung der Abgabe auf die Ressourcenmenge zwingen.

4.2.3. Abgaben auf die Produktmengen

Bei Einführung einer Produktmengenabgabe verändert sich die Zielfunktion in Modell 2 wie folgt: $(p - m - qa_1 - ec_1)x_1 + (p - m - qa_2 - ec_2)x_2 \longrightarrow \max$, wobei m die veränderliche Produktmengenabgabe ist. Im folgenden wollen wir aber die Zielfunktion $(p - qa_1 - ec_1)x_1 + (p - qa_2 - ec_2)x_2 \longrightarrow \max$ des Modells 2 beibehalten und dabei den Preis p als Parameter betrachten. Eine Erhöhung der Produktmengenabgabe würde also bedeuten, daß p verringert wird[2].

Wie in den beiden vorangegangenen Fällen muß zuerst untersucht werden, wie sich der Anstieg einer Niveaulinie der Zielfunktion bei Veränderung des Parameters verhält. Dabei treten 3 Fälle auf:

a) Ist $\frac{-(p - qa_1 - ec_1)}{(p - qa_2 - ec_2)} > -1$, also $(p - qa_1 - ec_1) < (p - qa_2 - ec_2)$, dann wird bei Erhöhung der Produktmengenabgabe der Anstieg einer Niveaulinie der Zielfunktion größer.

b) Ist $\frac{-(p - qa_1 - ec_1)}{(p - qa_2 - ec_2)} = -1$, also $(p - qa_1 - ec_1) = (p - qa_2 - ec_2)$, dann bleibt bei Erhöhung der Produktmengenabgabe der Anstieg einer Niveaulinie der Zielfunktion gleich -1.

c) Ist $\frac{-(p - qa_1 - ec_1)}{(p - qa_2 - ec_2)} < -1$, also $(p - qa_1 - ec_1) > (p - qa_2 - ec_2)$, dann wird bei Erhöhung der Produktmengenabgabe der Anstieg einer Niveaulinie der Zielfunktion geringer.

Es wird jetzt die Veränderung der Lösungsstruktur bei Verringerung des Parameters p, also der Erhöhung der Produktmengenabgabe untersucht. Dabei darf p nur bis zu dem Wert sinken, bei dem gerade noch gewährleistet ist, daß die Deckungsbeiträge für beide Prozesse größer als 0 sind.

1. Fall:

Man hat im Modell 2 die optimale Lösung $x^* = (0; \frac{\bar{r}}{a_2})$ erhalten. Der Anstieg einer Niveaulinie der Zielfunktion ist also größer als -1. Demzufolge bleibt, solange $p \geq qa_1 + ec_1$ ist, als optimale Lösung $x^* = (0; \frac{\bar{r}}{a_2})$ erhalten.

[2] Die Weitergabe dieser Produktabgabe über den Preis ist dabei ausgeschlossen. Entsprechend der im Kapitel 2.1 getroffenen Modellannahmen ist der Preis in allen Fällen als konstant anzusehen.

2. Fall:

Das Unternehmen produziert nach einer der möglichen, im Modell 2 erhaltenen optimalen Lösungen $x^* = \lambda(0; \frac{\bar{r}}{a_2}) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{V} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{V}}{c_1a_2 - a_1c_2})$ $\lambda \in [0,1]$. Der Anstieg einer Niveaulinie der Zielfunktion ist weiterhin größer als -1. Bei Verringerung von p, wobei aber $p \geq qa_1 + ec_1$ gilt, ändert sich die optimale Lösung zu $x^* = (0; \frac{\bar{r}}{a_2})$.

3. Fall:

Man hat im Modell 2 die optimale Lösung $x^* = (\frac{a_2\bar{V} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{V}}{c_1a_2 - a_1c_2})$ erhalten. Dann gilt folgendes:

a) $\frac{-(p - qa_1 - ec_1)}{(p - qa_2 - ec_2)} > -1$

a1) Wenn $p > \frac{e(c_1a_2 - a_1c_2)}{a_2 - a_1}$, dann bleibt $x^* = (\frac{a_2\bar{V} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{V}}{c_1a_2 - a_1c_2})$.

a2) Wenn $p = \frac{e(c_1a_2 - a_1c_2)}{a_2 - a_1}$, dann ist

$$x^* = \lambda(0; \frac{\bar{r}}{a_2}) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{V} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{V}}{c_1a_2 - a_1c_2}) \quad \lambda \in [0,1]$$

a3) Wenn $qa_1 + ec_1 \leq p < \frac{e(c_1a_2 - a_1c_2)}{a_2 - a_1}$, dann ist $x^* = (0; \frac{\bar{r}}{a_2})$.

b) $\frac{-(p - qa_1 - ec_1)}{(p - qa_2 - ec_2)} = -1$

Die optimale Lösung bleibt $x^* = (\frac{a_2\bar{V} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{V}}{c_1a_2 - a_1c_2})$.

c) $\frac{-(p - qa_1 - ec_1)}{(p - qa_2 - ec_2)} < -1$

c1) Wenn $p > \frac{q(a_1c_2 - a_2c_1)}{c_2 - c_1}$, dann bleibt $x^* = (\frac{a_2\bar{V} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{V}}{c_1a_2 - a_1c_2})$.

c2) Wenn $p = \frac{q(a_1c_2 - a_2c_1)}{c_2 - c_1}$, dann ist

$$x^* = \lambda(\frac{\bar{V}}{c_1}; 0) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{V} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{V}}{c_1a_2 - a_1c_2}) \quad \lambda \in [0,1].$$

c3) Wenn $qa_2 + ec_2 \leq p < \frac{q(a_1c_2 - a_2c_1)}{c_2 - c_1}$, dann ist $x^* = (\frac{\bar{V}}{c_1}; 0)$.

4. Fall:

Das Unternehmen produziert nach einer der möglichen, im Modell 2 erhaltenen optimalen Lösungen $x^* = \lambda(\frac{\bar{V}}{c_1}; 0) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{V} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{V}}{c_1a_2 - a_1c_2})$ $\lambda \in [0,1]$. Der Anstieg einer Niveaulinie der Zielfunktion ist hier kleiner als -1. Bei Verringerung von p, wobei $p \geq qa_2 + ec_2$ erfüllt ist, ändert sich die optimale Lösung zu $x^* = (\frac{\bar{V}}{c_1}; 0)$.

5. Fall:

Man hat im Modell 2 die optimale Lösung $x^* = (\frac{\bar{V}}{c_1}; 0)$ erhalten. Der Anstieg einer Niveaulinie der Zielfunktion ist kleiner als -1. Demzufolge bleibt, solange $p \geq qa_2 + ec_2$ ist, als optimale Lösung $x^* = (\frac{\bar{V}}{c_1}; 0)$ erhalten.

Fazit:

Zusammenfassend kann man sagen, daß bei zunehmender Produktmengenabgabe nur mit einem Prozeß produziert wird und zwar mit dem, der den höheren Deckungsbeitrag erbringt. Eine Ausnahme ist der Fall gleicher Deckungsbeiträge bei beiden Prozessen. Dann ist eine Kombination von beiden Prozessen optimal.

4.3. Subventionen[1]

Es gibt verschiedene Arten von Subventionen zur Verbesserung der Umweltschutzmaßnahmen in Unternehmen, beispielsweise Zuschüsse, Investitionszulagen, Sonderabschreibungen oder zinsgünstige Darlehen. Für das oben betrachtete Modell 2 wäre ein Zuschuß für Produkte, die nach dem umwelt-freundlicheren Prozeß hergestellt wurden, denkbar. Dabei würde sich die Zielfunktion wie folgt verändern: $(p - qa_1 - ec_1)x_1 + (p - qa_2 - ec_2 + s)x_2 \longrightarrow \max$. Die Variable s bezeichnet dabei den Betrag, den das Unternehmen für jedes Produkt, welches nach dem umwelt-freundlicheren Prozeß 2 hergestellt wurde, erhält.

Zur Analyse der Lösungsstruktur wird wiederum zuerst der Anstieg einer Niveaulinie der Zielfunktion untersucht. Es ist offensichtlich, daß sich bei einer Erhöhung des Zuschusses s der Anstieg der Zielfunktion vergrößert. Das bedeutet, wenn s genügend groß ist, ist es immer optimal, mit dem umweltfreundlicheren Prozeß zu produzieren. Die exakte Analyse ergibt folgendes:

1. Fall:

Man hat im Modell 2 die optimale Lösung $x^* = (0; \frac{\bar{r}}{a_2})$ erhalten.

Auch ohne Subventionierung ist es optimal, nur mit dem umweltfreundlicheren Prozeß 2 zu produzieren. Bei Einführung eines beliebigen Zuschusses s ändert sich natürlich die optimale Lösung nicht. Das Unternehmen kann sich über einen zusätzlichen Gewinn freuen.

2. Fall:

Das Unternehmen produziert nach einer der möglichen, im Modell 2 erhaltenen optimalen Lösungen $x^* = \lambda(0; \frac{\bar{r}}{a_2}) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$ $\lambda \in [0,1]$. Sobald ein beliebiger Zuschuß s eingeführt wird, ändert sich die optimale Lösung zu $x^* = (0; \frac{\bar{r}}{a_2})$.

3. Fall:

Man hat im Modell 2 die optimale Lösung $x^* = (\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$ erhalten.

a) Wenn $0 \le s < \frac{p(a_2 - a_1) + e(c_2a_1 - c_1a_2)}{a_1}$, dann bleibt $x^* = (\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$.

b) Wenn $s = \frac{p(a_2 - a_1) + e(c_2a_1 - c_1a_2)}{a_1}$, dann ist

$$x^* = \lambda(0; \frac{\bar{r}}{a_2}) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2}) \quad \lambda \in [0,1].$$

[1] Vgl. Abbildung 4

c) Wenn $s > \frac{p(a_2 - a_1) + e(c_2a_1 - c_1a_2)}{a_1}$, dann ist $x^* = (0; \frac{\bar{r}}{a_2})$.

4. Fall:

Das Unternehmen produziert nach einer der möglichen, im Modell 2 erhaltenen optimalen Lösungen $x^* = \lambda(\frac{\bar{v}}{c_1}; 0) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$ $\lambda \in [0,1]$.

a) Wenn $0 < s < \frac{p(a_2 - a_1) + e(c_2a_1 - c_1a_2)}{a_1}$, dann ist $x^* = (\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$.

b) Wenn $s = \frac{p(a_2 - a_1) + e(c_2a_1 - c_1a_2)}{a_1}$, dann ist

$$x^* = \lambda(0; \frac{\bar{r}}{a_2}) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2}) \quad \lambda \in [0,1].$$

c) Wenn $s > \frac{p(a_2 - a_1) + e(c_2a_1 - c_1a_2)}{a_1}$, dann ist $x^* = (0; \frac{\bar{r}}{a_2})$.

5. Fall:

Man hat im Modell 2 die optimale Lösung $x^* = (\frac{\bar{v}}{c_1}; 0)$ erhalten.

a) Wenn $0 \le s < \frac{p(c_2 - c_1) + q(a_2c_1 - a_1c_2)}{c_1}$, dann bleibt $x^* = (\frac{\bar{v}}{c_1}; 0)$.

b) Wenn $s = \frac{p(c_2 - c_1) + q(a_2c_1 - a_1c_2)}{c_1}$, dann ist

$$x^* = \lambda(\frac{\bar{v}}{c_1}; 0) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2}) \quad \lambda \in [0,1].$$

c) Wenn $\frac{p(c_2 - c_1) + q(a_2c_1 - a_1c_2)}{c_1} < s < \frac{p(a_2 - a_1) + e(c_2a_1 - c_1a_2)}{a_1}$, dann ist

$$x^* = (\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2}).$$

d) Wenn $s = \frac{p(a_2 - a_1) + e(c_2a_1 - c_1a_2)}{a_1}$, dann ist

$$x^* = \lambda(0; \frac{\bar{r}}{a_2}) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2}) \quad \lambda \in [0,1].$$

e) Wenn $s > \frac{p(a_2 - a_1) + e(c_2a_1 - c_1a_2)}{a_1}$, dann ist $x^* = (0; \frac{\bar{r}}{a_2})$.

Fazit:

Durch Subventionierung des umweltfreundlichen Prozesses 2 kann man in jedem Fall erreichen, daß ausschließlich dieser Prozeß verwendet wird. Die Subvention muß hierfür mindestens die Höhe $s = \frac{p(a_2 - a_1) + e(c_2 a_1 - c_1 a_2)}{a_1}$ haben. Damit erweisen sich im Rahmen dieses Modells Subventionen als ein sehr wirksames Mittel, die Unternehmer zur Verwendung umweltfreundlicher Prozesse zu bewegen.

Aus Sicht des Staates bergen Subventionen jedoch die Gefahr der Verschwendung in sich, da die Höhe des oben genannten Schwellenwertes den staatlichen Entscheidungsträgern in der Regel unbekannt sein dürfte, und eine darüber liegende Subvention zwar den Unternehmer freut, aber natürlich keinen weiteren Zuwachs an Umweltqualität erreichen kann. Entsprechendes gilt für den Fall, daß es bereits ohne Subventionen optimal ist, nach Prozeß 2 zu produzieren. Hier bewirkt eine Subvention selbstverständlich keine Veränderung.

4.4. Zertifikate[2]

Umweltzertifikate sind Rechte, die Umwelt bis zu einer gewissen Obergrenze zu verschmutzen. Diese Rechte vergibt der Staat gegen Bezahlung an Unternehmen.

In einem Umwelt-Produktions-Modell wirken Zertifikate einerseits auf den zulässigen Bereich durch Hinzunahme einer neuen oder Erweiterung einer bestehenden Restriktion, andererseits wird durch die entstehenden Kosten natürlich auch die Zielfunktion beeinflußt. Zunächst soll das Modell 1 und damit der zulässige Bereich untersucht werden. Die Umweltbelastung der Produktion wird in der Nebenbedingung $c_1x_1 + c_2x_2 \le \bar{v}$ dargestellt. Es soll angenommen werden, daß bis zur Schranke $\bar{v}$ für das Unternehmen keine Umweltkosten entstehen. Für eine Umweltbelastung darüberhinaus muß vom Staat ein Zertifikat erworben werden. Es wird weiterhin angenommen, daß eine beliebig kleine Stückelung der Schadstoffmengen möglich ist. Die Nebenbedingung der Umweltbelastung verändert sich zu $c_1x_1 + c_2x_2 \le \tilde{v}$. Dabei wird $\tilde{v}$ als beliebige reelle Zahl größer als $\bar{v}$ angesehen.

In der Zielfunktion nach Modell 2 wird die Summe der Deckungsbeiträge nach beiden Prozessen maximiert. Bei Einfluß des umweltpolitischen Instruments Zertifikat müssen auch dessen Kosten betrachtet werden. Es seien k die Kosten für eine Schadstoffmengeneinheit, dann sind $k(\tilde{v} - \bar{v})$ die Kosten für den Kauf eines Zertifikats mit dem Recht, die Umwelt mit Schadstoffen der Menge $\tilde{v}$ zu belasten. Ein Kauf eines Zertifikats für eine bestimmte Umweltbelastungsmenge lohnt sich nur, wenn der zusätzlich erwirtschaftete Deckungsbeitrag diese Zertifikatskosten $k(\tilde{v} - \bar{v})$ übersteigt. Das soll im folgenden analysiert werden.

1. Fall:

Man hat im Modell 2 die optimale Lösung $x^* = (0; \frac{\bar{r}}{a_2})$ erhalten.

[2] Vgl. Abbildung 5

Die Nebenbedingung $c_1x_1 + c_2x_2 \le \tilde{v}$ hat keinerlei Einfluß auf die optimale Lösung, es bleibt $x^* = (0; \frac{\bar{r}}{a_2})$. Daraus folgt, daß sich der optimale Zielfunktionswert ebenfalls nicht ändert. Es lohnt sich also nicht, Zertifikate zu kaufen.

2. Fall:

Das Unternehmen produziert nach einer der möglichen, im Modell 2 erhaltenen optimalen Lösungen $x^* = \lambda(0; \frac{\bar{r}}{a_2}) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$ $\lambda \in [0,1]$.

Die optimalen Lösungen verändern sich zwar bei $\tilde{v} \le \frac{c_1\bar{r}}{a_1}$ zu

$x^* = \lambda(0; \frac{\bar{r}}{a_2}) + (1-\lambda)(\frac{a_2\tilde{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\tilde{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$ $\lambda \in [0,1]$. Der optimale Zielfunktionswert wird aber nicht verändert. Es lohnt sich also ebenfalls nicht, Zertifikate zu kaufen.

3. Fall:

Man hat im Modell 2 die optimale Lösung $x^* = (\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$ erhalten.

Durch Zertifikatskauf mit $\tilde{v} \le \frac{c_1\bar{r}}{a_1}$ erhält man als neue optimale Lösung

$x^* = (\frac{a_2\tilde{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\tilde{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$. Ein Zertifikatskauf lohnt sich, falls

$\frac{a_2(\tilde{v} - \bar{v})}{c_1a_2 - a_1c_2}(p - qa_1 - ec_1) + \frac{-a_1(\tilde{v} - \bar{v})}{c_1a_2 - a_1c_2}(p - qa_2 - ec_2) > k(\tilde{v} - \bar{v})$, also

$k < \frac{a_2(p - qa_1 - ec_1) - a_1(p - qa_2 - ec_2)}{c_1a_2 - a_1c_2}$.

Falls diese Bedingung nicht erfüllt ist, lohnt sich ein Zertifikatskauf nicht.

Falls sie jedoch erfüllt sein sollte, müßte untersucht werden, für welche Schadstoffmenge ein Zertifikat gekauft werden sollte. Da der Term auf der rechten Seite der Bedingung unabhängig von $\tilde{v}$ ist, wird man das größte, im Modell noch mögliche $\tilde{v}$ wählen. Das ist $\tilde{v} = \frac{c_1\bar{r}}{a_1}$. Die optimale Lösung ist dann $x^* = (\frac{\bar{r}}{a_1}; 0)$.

4. Fall:

Das Unternehmen produziert nach einer der möglichen, im Modell 2 erhaltenen optimalen Lösungen $x^* = \lambda(\frac{\bar{v}}{c_1}; 0) + (1-\lambda)(\frac{a_2\bar{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2}; \frac{c_1\bar{r} - a_1\bar{v}}{c_1a_2 - a_1c_2})$ $\lambda \in [0,1]$.

Durch Zertifikatskauf mit $\tilde{v} \le \frac{c_1 \bar{r}}{a_1}$ erhält man als neue optimale Lösung

$$x^* = \lambda(\frac{\bar{v}}{c_1};0) + (1-\lambda)(\frac{a_2\tilde{v} - c_2\bar{r}}{c_1a_2 - a_1c_2};\frac{c_1\bar{r} - a_1\tilde{v}}{c_1a_2 - a_1c_2}) \quad \lambda \in [0,1].$$

Ein Zertifikatskauf lohnt sich, falls $\frac{\tilde{v} - \bar{v}}{c_1}(p - qa_1 - ec_1) > k(\tilde{v} - \bar{v})$, also $k < \frac{p - qa_1 - ec_1}{c_1}$.
Falls diese Bedingung nicht erfüllt ist, lohnt sich ein Zertifikatskauf nicht. Man sieht wiederum, daß diese Bedingung unabhängig von $\tilde{v}$ ist. Demzufolge wählt man beim Zertifikatskauf als Schadstoffmenge $\tilde{v} = \frac{c_1\bar{r}}{a_1}$ und erhält als optimale Lösung $x^* = (\frac{\bar{r}}{a_1};0)$.

5. Fall:
Man hat im Modell 2 die optimale Lösung $x^* = (\frac{\bar{v}}{c_1};0)$ erhalten.

Durch Zertifikatskauf mit $\tilde{v} \le \frac{c_1\bar{r}}{a_1}$ erhält man als neue optimale Lösung $x^* = (\frac{\tilde{v}}{c_1};0)$.

Ein Zertifikatskauf lohnt sich, falls $\frac{\tilde{v} - \bar{v}}{c_1}(p - qa_1 - ec_1) > k(\tilde{v} - \bar{v})$, also $k < \frac{p - qa_1 - ec_1}{c_1}$.
Falls diese Bedingung nicht erfüllt ist, lohnt sich ein Zertifikatskauf nicht. Man sieht wiederum, daß diese Bedingung unabhängig von $\tilde{v}$ ist. Demzufolge wählt man beim Zertifikatskauf als Schadstoffmenge $\tilde{v} = \frac{c_1\bar{r}}{a_1}$ und erhält als optimale Lösung $x^* = (\frac{\bar{r}}{a_1};0)$.

Fazit:

Die obige Analyse zeigt, daß sich ein Kauf von Umweltzertifikaten nur dann lohnt, wenn erstens die Umweltbelastungsrestriktion Einfluß auf die optimale Lösung hat und zweitens die Zertifikatskosten pro Schadstoffmengeneinheit kleiner als eine gewisse zu berechnende Konstante sind. Wenn das der Fall ist, dann ist es optimal, ein Zertifikat, mit dem Recht die Umwelt mit $\tilde{v} = \frac{c_1\bar{r}}{a_1}$ Schadstoffmengeneinheiten zu belasten, zu kaufen. Die Produktion erfolgt dann nur mit dem Prozeß 1 in Höhe von $\frac{\bar{r}}{a_1}$ Einheiten.

5. Zusammenfassung und Ausblick

5.1. Zusammenfassung der Ergebnisse

In dieser Arbeit wurden die Wirkungen umweltpolitischer Instrumente auf die Lösungsstruktur eines Leontief-Produktionsmodells untersucht. Ausgangspunkt ist ein Modell, in dem ein Unternehmen ein Produkt mit Hilfe von zwei Prozessen herstellen kann. Das Ziel des Unternehmens besteht darin, den Gesamt-Deckungsbeitrag zu maximieren, wobei drei verschiedene Restriktionen erfüllt sein müssen. Das Unternehmen kann entweder genau einem der beiden Prozesse oder nach eine Kombination von ihnen anwenden. Zu untersuchen war, welchen Einfluß die durch die entsprechenden Modellparameter repräsentierten umweltpolitischen Instrumente des Staates auf die optimale Prozeßauswahl haben.

Nach der Auswahl der umweltpolitischer Instrumente, die sich durch die Parameter des Modells abbilden lassen, wurden systematisch die Auswirkungen dieser einzelnen Instrumente auf die Optimallösungen des Modells analysiert. Dabei haben sich die Verfasser ausschließlich auf die Änderungen in der Prozeßwahl (d.h. im Mengenverhältnis der beiden Prozesse) konzentriert. In dem betrachteten Regelfall wurde davon ausgegangen, daß einer der beiden Prozesse rohstoffintensiver und der andere Prozeß umweltintensiver als der jeweils andere Prozeß ist. Unter dieser Konstellation ist von Interesse, ob das zu untersuchende umweltpolitische Instrument den Übergang von einem zum anderen Prozeß bewirkt, und wenn das der Fall ist, auf welche Weise dieser Übergang erfolgt (z.B. sprunghaft, allmählich oder erst ab einem Schwellenwert).

Die sehr unterschiedliche Wirkung der umweltpolitischen Instrumente wurde in Form einer Klassifizierung der Instrumente aufgezeigt. Diese Klassifizierung erfolgte bezüglich der Art und Weise ihrer Wirkung auf die Lösungsstruktur. Es konnten 10 verschiedene Muster des Verhaltens der optimalen Prozeßauswahl identifiziert werden. Die Muster sind im Kapitel 1 dargestellt und es ist angegeben, unter welchen Bedingungen die Entscheidungen nach welchem Muster verlaufen. Unter anderem ergeben sich dabei auch Fälle, bei denen ein Prozeßwechsel hin zum umweltfreundlicheren Prozeß trotz Einfluß umweltpolitischer Instrumente nicht stattfinden muß.

Daraus läßt sich ableiten, daß der Gesetzgeber mit einigen Instrumenten bestimmte politische und ökologische Ziele nicht erreichen kann. Beispielsweise erfolgt die Durchsetzung des umweltschonenderen Prozesses im genannten Modell nur bei Subventionen und unter Einschränkungen bei Emissionsauflagen. Durch Zertifikate und durch Emissionsabgaben geschieht das nicht.

Die quantitative Veränderung des Gesamt-Deckungsbeitrages (d.h. Optimalwertes) bei Einwirkung der umweltpolitischen Instrumente wurde in dieser Arbeit nicht betrachtet und kann Gegenstand weiterer Untersuchungen auf diesem Gebiet sein[1].

[1] dazu siehe z.B. [Steven 1994]

5.2. Ausblick

Die Vielfältigkeit der möglichen Wirkungsmuster läßt sich durch die Verwendung eines Modells vom Leontief-Typ erklären, da dieses Modell ein lineares Optimierungsproblem zur Grundlage hat. Leontief-Modelle eignen sich wegen ihrer Linearität relativ gut zur Beschreibung realer Produktionsentscheidungen, das hier verwendete Modell ist aber natürlich sehr stark vereinfacht worden. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes stand zunächst die Aufgabe, aus einem einfachen und explizit lösbaren Modell grundsätzliche Erkenntnisse über die Wirkungsweise umweltpolitischer Instrumente auf Managemententscheidungen abzuleiten.

Im weiteren ist jetzt also danach zu fragen, ob und wie sich die gefundenen Ergebnisse auf allgemeinere und realitätsnähere Modelle übertragen lassen. Damit stellt sich zuerst die Frage, welche Modellerweiterungen überhaupt sinnvoll sind. Wir möchten hier die folgende Einteilung denkbarer Modellerweiterungen vornehmen:

- "quantitative" Modellerweiterungen: mehr als ein Rohstoff, mehr als eine Emissionsart, mehr als zwei verfügbare Prozesse, technologische Untergrenzen für einzelne Prozesse, beschränktes Marktvolumen

- "qualitative" Modellerweiterungen: zwei oder mehr verschiedenartige Produkte, gleichzeitige Betrachtung mehrerer Instrumente

Während die "quantitativen" Modellveränderungen also vor allem darauf hinauslaufen, weitere Restriktionen hinzuzufügen, und damit die Struktur des zulässigen Bereiches komplizierter zu machen, bringen die "qualitativen" Modellerweiterungen Veränderungen grundsätzlicherer Art mit sich.

Zum Abschluß soll noch auf zwei der oben genannten Modellerweiterungen eingegangen werden.

(A) Mehr als zwei Prozesse

Hier ist der folgende (dem in dieser Studie untersuchten Regelfall analoge) Spezialfall interessant: Wenn es hier möglich ist, die Prozesse so zu ordnen, daß innerhalb dieser Rangfolge die Rohstoffintensität zunimmt und gleichzeitig die Umweltintensität abnimmt, so lassen sich alle Prozesse als Kombination der beiden extremalen Prozesse auffassen. Damit kann dieses Modell auf den Regelfall in dieser Studie zurückgeführt werden, und die hier gefundenen Ergebnisse gelten entsprechend.

(B) Mehr als ein Produkt

Der Fall mehrerer Produkte (mit unterschiedlichen Preisen, unterschiedlichem Rohstoffverbrauch und unterschiedlicher Umweltbelastung) läßt sich prinzipiell mittels Dekomposition über die Ressourcen beschreiben. Die Verfasser möchten an dieser Stelle jedoch die Vermutung äußern, daß unter gewissen Bedingungen die Rückführung auf den Fall mehrerer Prozesse möglich ist (jedes Produkt wird als eigenständiger Prozeß betrachtet) und unter gewissen Bedingungen ohnehin nur das deckungsbeitragsmaximale Produkt produziert wird und damit dieses Problem zu dem hier behandelten äquivalent wird.

6. Literatur

Bogaschewsky, R. (1995) „Natürliche Umwelt und Produktion", Gabler-Verlag, Wiesbaden.

Dinkelbach, W., Piro, A. (1989) „Entsorgung und Recycling in der betriebswirtschaftlichen Produktions- und Kostentheorie: LEONTIEF-Technologien (I)", WISU 7/89, S. 399-405.

Dinkelbach, W., Piro, A. (1989) „Entsorgung und Recycling in der betriebswirtschaftlichen Produktions- und Kostentheorie: LEONTIEF-Technologien (II)", WISU 8-9/89, S. 399-405.

Dinkelbach, W., Rosenberg, O. (1994), „Erfolgs- und umweltorientierte Produktionstheorie" Springer-Verlag, Berlin.

Dobos, I. (1996) „Production-inventory control under environmental constraints", Proceedings of the Ninth International Working Seminar on Production Economics, Igls.

Dyckhoff, H. (1992) „Betriebliche Produktion", Springer-Verlag, Berlin.

Flapper, S. D. P. (1993) "On the logistics of recycling: An introduction", Working Paper BDK/LBS 93-16, TU Eindhoven.

Flapper, S. D. P. (1994) „Matching materials requirements and availabilities in the context of recycling: An MRP-I based heuristic", Proceedings of the 8th International Workshop on Production Economics, Igls.

Haasis, H. D. (1994) „OR and environmental management in industries", Vortrag zur Jahrestagung Operations Research 1994, Berlin.

Heyman, D. P. (1977) „Optimal disposal policies for a single-item inventory system with returns", Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 24, S. 385-405.

Hill, R. M. (1994) „Inventory policies for a product life cycle", Abstracts of the 8th International Symposium on Inventories, Budapest.

Hoadley, B., Heyman, D. P. (1977) „A two-echelon model with purchases, dispositions, shipments, returns and transshipments", Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 24, S. 1-19.

Huppes, G. (1993) „Macro-environmental policy: Principles and design", Elsevier, Amsterdam.

Kelle, P., Silver, E. A. (1989) „Purchasing policy of new containers considering the random returns of previuosly issued containers", IIE Transactions, Vol. 21, S. 349-354.

Kemper (1989) „Das Umweltproblem in der Marktwirtschaft", Duncker & Humblodt, Berlin.

Kistner, K.-P. (1994) „Produktions- und Kostentheorie", Physica-Verlag, Heidelberg.

van der Laan, E. A. (1993) „On inventory control models where items are remanufactured or disposed“, Master's Thesis, Erasmus University Rotterdam.

van der Laan, E. et al. (1994) „An (s, Q) inventory model with remanufacturing and disposal“, Research Report Nr. 9432/A, Erasmus University Rotterdam.

Lange, C. (1978) „Umweltschutz und Unternehmensplanung“, Gabler-Verlag, Wiesbaden.

Mabini, M. C. et al. (1992) „EOQ type formulations for controlling repairable inventories“, International Journal of Production Economics, Vol. 28, S. 21-33.

Muckstadt, J. A., Isaac, M. H. (1981) „An analysis of single item inventory systems with returns“, Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 28, S. 237-254.

Richter, K. (1982) „Dynamische Aufgaben der diskreten Optimierung“, Akademie-Verlag, Berlin.

Richter, K. et al. (1988) „Diskrete Optimierungsmodelle“, Verlag Technik, Berlin.

Richter, K. (1994) „A generalized EOQ repair and waste disposal model“, Vortrag zur Jahrestagung Operations Research 1994, Berlin.

Richter, K. (1995) „New results for the EOQ repair and waste disposal model“, Proceedings of the PROSEM Symposium on Production Planning and Control, Molde.

Richter, K. (1996) „The EOQ repair and waste disposal model with variable set-up numbers“, erscheint in: European Journal of Operational Research .

Salomon, M. et al. (1994) „Product remanufacturing and its effects on production and inventory control“, Management Report Nr. 172, Erasmus University Rotterdam.

Steven, M. (1995) „Produktion und Umweltschutz“, Gabler, Wiesbaden.

Thierry, M. C. et al. (1993) „Strategic production and operations management issues in product recovery management“, Management Report Nr. 145, Erasmus University Rotterdam.

Weimann (1990) „Umweltökonomik“, Springer-Verlag, Berlin.

Ventzke, R. (1993) „Umweltorientierte Produktionsplanung“, Peter Lang-Verlag, Frankfurt am Main.

Wicke, L. (1991) „Umweltökonomie“, Verlag Franz Vahlen, München.

Diskussionspapiere der Europa-Universität Viadrina Frankfurt (Oder)

Fakultät Wirtschaftswissenschaften

1. **Eberhard Stickel:** Operations Research Verfahren für Abfragen in Deduktiven Datenbanksystemen, 1/1993.
2. **Eberhard Stickel** und **Otto Rauh:** Objektorientierte Anwendungsentwicklung und relationale Datenbanktechnologie: Eine Überbrückung zwischen Schichten von Informationsarchitekturen, 2/1993.
3. **Otto Rauh und Eberhard Stickel:** How to treat compositions in ER-schemes, 3/1993.
4. **Eberhard Stickel:** Konzeption eines wissensbasierten Systems zur Unterstützung der Produktentwicklung in Kreditinstituten, 4/1993.
5. **Eric Berger** und **Eberhard Stickel:** A Relational Front-End for Object-Oriented Application Development, 5/1993.
6. **Ralf Teepe:** Die diskurstheoretische Konzeption von Jürgen Habermas aus der Sicht der ökonomischen Theorie, 6/1993.
7. **Eberhard Stickel:** CASE tool support for the design of an information system for product design in financial institutions: an experience report, 7/1993.
8. **Friedel Bolle:** No Revenue-Equivalence in Multiple-Bid-Options, 8/1993.
9. **Alexander Kritikos** und **Friedel Bolle:** Tearing Bank Notes as a Credible signal for Forward Induction, 8/1993.
10. **Klaus Neusser** und **Maurice Kugler:** Manufacturing Growth and Financial Sector Development in OECD Countries, 1/1994.
11. **Otto Rauh** und **Eberhard Stickel:** Methods and Tools for Data Integration, 2/1994.
12. **Otto Rauh** und **Eberhard Stickel:** Entity-Relationship Modelling of Information Systems with Deductive Capabilities, 3/1994.
13. **Friedel Bolle:** Markt statt Regulierung - Entwicklungen der Elektrizitätsversorgungsunternehmen in den USA und Europa.
14. **Friedel Bolle** und **Dirk Schmelzer:** Preisbildung in Netzen.
15. **Eberhard Stickel:** Information und Risiko, 5/1994.
16. **Anke Ortmann, Jan Ortmann** und **Eberhard Stickel:** Implementierung von ETC, 6/1994.
17. **Eberhard Stickel:** A Business Process Oriented Approach to Data Integration, 7/1994.
18. **Eberhard Stickel:** Optimierung der Fördergebietsabschreibung, 8/1994.
19. **Jens Hunstock** und **Eberhard Stickel:** Ansätze zur Schemaintegration, 9/1994.
20. **Sabine Behrens, Luis Rocha** und **Eberhard Stickel:** Neural Networks for Consumer Loan Analysis - Some Empirical Evidence, 10/1994.
21. **Eberhard Stickel, Jens Hunstock, Anke Ortmann** und **Jan Ortmann:** Verfahren zur werkzeuggestützten Integration von Datenbankschemata, 11/1994.
22. **Wilhelm Althammer:** Verhandlungen und das Coase-Theorem, 12/1994.
23. **Wilhelm Althammer** und **Wolfgang Buchholz:** Die Bereitstellung eines öffentlichen Gutes aus spieltheoretischer Sicht: Die Grundsachverhalte, 14/1994.