

Stahl, Stefan

**Working Paper**

## Investitionsbewertung unter Berücksichtigung von Umweltschutz als eigenständigem Formalziel

Thünen-Series of Applied Economic Theory - Working Paper, No. 128

**Provided in Cooperation with:**

University of Rostock, Institute of Economics

*Suggested Citation:* Stahl, Stefan (2012) : Investitionsbewertung unter Berücksichtigung von Umweltschutz als eigenständigem Formalziel, Thünen-Series of Applied Economic Theory - Working Paper, No. 128, Universität Rostock, Institut für Volkswirtschaftslehre, Rostock

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/74666>

**Standard-Nutzungsbedingungen:**

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

**Terms of use:**

*Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.*

*You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.*

*If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.*

**Thünen-Series of Applied Economic Theory**  
**Thünen-Reihe Angewandter Volkswirtschaftstheorie**

Working Paper No. 128

**Investitionsbewertung unter Berücksichtigung von Umweltschutz  
als eigenständigem Formalziel**

von

Stefan Stahl

**Universität Rostock**

Wirtschafts- und Sozialwissenschaftliche Fakultät  
Institut für Volkswirtschaftslehre  
2012

# **Investitionsbewertung unter Berücksichtigung von Umweltschutz als eigenständigem Formalziel**

Stefan Stahl

Universität Rostock, September 2012

## **Zusammenfassung**

In Folge der steigenden Nachfrage nach ethischen Kapitalanlagen stehen die Unternehmen vor der Herausforderung, neben den typischen monetären Zielen auch Umweltschutzziele in die Investitionsbewertung einbeziehen zu müssen. Bestehende Ansätze der Investitionsbewertung unter Berücksichtigung von Umweltschutz kombinieren klassische Investitionsrechenverfahren für die monetären Größen mit Nutzwertanalysen für die nichtmonetären Größen oder beziehen die Monetarisierung von Umweltgrößen ein. Beide Ansätze weisen Schwächen auf. Alternativ zu den bestehenden Ansätzen wird in diesem Beitrag ein Investitionsbewertungsmodell entwickelt, das Umweltschutzziele und monetäre Ziele simultan berücksichtigt. Anforderungen an ein solches Modell sind aus Investorensicht Transparenz der Investitionsentscheidung und die Möglichkeit der Gewichtung von monetären und Umweltschutzzielen. Aus Sicht der Entscheidungsträger in den Unternehmen stehen als Anforderungen eine möglichst geringe Komplexität, Lösbarkeit und ein überschaubarer Informationsbedarf des Investitionsbewertungsmodells im Vordergrund. Die Erweiterung eines Investitionsbewertungsmodells um Elemente der unscharfen linearen Programmierung ermöglicht die Berücksichtigung der Anforderungen.

**Schlagwörter:** Investitionstheorie, Umweltschutz, ethisches Investment, Lineare Optimierung, unscharfe Lineare Optimierung

**JEL Classification:** G31, M14, C61, Q56

## **Investment appraisal taking into account environmental protection as a stand-alone goal**

### **Abstract**

As a consequence of rising demand for ethical investments, companies face the challenge to include environmental protection objectives in investment appraisal besides their monetary goals. Existing approaches of investment valuation that take into ac-

count environmental protection combine traditional investment appraisal methods for the monetary terms with utility value analysis for the non-monetary terms, or comprise the monetization of environmental variables. Both approaches have shortcomings. As an alternative to the existing approaches, this paper develops an investment evaluation model that simultaneously takes into account the environmental and monetary goals. From the perspective of investors, requirements for such a model are transparency of the investment decision and the possibility of weighting financial and environmental goals. From the perspective of company decision-makers, the main requirements are a low complexity, solvability and a manageable information demand. These requirements are fulfilled by extending an investment valuation model by elements of fuzzy linear programming.

**Keywords:** Investment theory, environmental protection, ethical investment, linear programming, fuzzy linear programming

## 1 Problemstellung

Laut einer Studie des European Sustainable Investment Forum (Eurosif) ist das Anlagevolumen öko-sozialer Anlageformen in Europa von 2007 bis 2009 um 87 Prozent gestiegen.<sup>1</sup> Die ethischen Investoren berücksichtigen bei der Anlagenwahl neben Rendite und Risiko weitere Kriterien, zu denen in erster Linie die Forderung nach Umweltschutz und sozialen Aspekten zählen. Folgt ein Unternehmen den Forderungen der ethischen Investoren, erhält es dafür eine Belohnung oder entgeht einer Bestrafung. Die Belohnung in Form sinkender Kapitalkosten resultiert aus der gestiegenen Nachfrage nach Aktien des Unternehmens durch die ethischen Investoren. Andererseits können Unternehmen von den ethischen Investoren durch negative Auswahlkriterien bestraft werden. Dabei werden umweltschädliche Unternehmen aus dem Portfolio ausgeschlossen, sodass die Nachfrage nach Aktien des Unternehmens sinkt. Infolgedessen steigen die Kapitalkosten.<sup>2</sup>

Aus Sicht der Unternehmen ergibt sich daher die Notwendigkeit die Forderungen der ethischen Investoren in der Investitionsrechnung zu berücksichtigen. Zu diesem Zweck widmet sich dieser Beitrag der Entwicklung eines Investitionsbewertungsmodells, das Umweltschutz als eigenständiges Formalziel berücksichtigt. Die Berücksichtigung sozialer Performance ist mit dem Modell ebenfalls möglich, wird aber aus Gründen der Komplexitätsreduktion unterlassen. In dem Modell werden Elemente der simultanen Investitions- und Finanzplanung nach Hax und Weingartner mit Elementen der unscharfen linearen Optimierung vereint.<sup>3</sup> Durch die Verwendung der unscharfen linearen Optimierung müssen Nebenbedingungen nicht mehr strikt eingehalten werden. Der Entscheidungsträger kann einen Toleranzbereich festlegen für den die Nebenbedingungen als erfüllt gelten. Dabei sinkt die Zufriedenheit des Entscheidungsträgers mit zunehmender Annäherung an die obere Toleranzgrenze. Darüber hinaus können die scharfen Zielfunktionen in unscharfe Nebenbedingungen umgewandelt werden, so dass als Ziel die Maximierung des Zufriedenheitsgrades verbleibt. Der Vorteil dieses Vorgehens liegt darin, dass mehrere konkurrierende Ziele ohne Monetarisierung der Umweltgrößen berücksichtigt werden können. Bei Schrö-

---

<sup>1</sup> Das Anlagevolumen öko-sozialer Anlageformen in Europa stieg von 3,8 Milliarden (2007) auf 5 Milliarden (2009). Das entspricht einer Wachstumsrate von 87 Prozent. Vgl. dazu European Sustainable Investment Forum (2010), S. 11.

<sup>2</sup> Vgl. Heinkel, R. et al (2001).

<sup>3</sup> Vgl. Hax, H. (1964) und Weingartner, H. M. (1963).

der (1996) und Vojdani (1995) findet sich ein Hinweis, dass Kenntnisse der unscharfen linearen Optimierung für Zwecke der Investitionsbewertung mit Berücksichtigung von Umweltschutz genutzt werden könnten. Die Entwicklung eines derartigen Ansatzes ist jedoch nicht bekannt.<sup>4</sup>

Anforderungen an ein solches Modell ergeben sich aus zwei Perspektiven: zum einen aus Sicht der ethischen Investoren und zum anderen aus Sicht der Entscheidungsträger in den Unternehmen. Die Ergebnisse des Modells müssen für die ethischen Investoren nachvollziehbar und transparent sein. Außerdem muss das Modell die Präferenzen der Investoren für monetäre Ziele und für Umweltschutzziele abbilden können. Aus Sicht der Entscheidungsträger in den Unternehmen ergeben sich Anforderungen bezüglich der Komplexität, der Lösbarkeit und der benötigten Informationen. Das im Folgenden dargestellte Modell ist geeignet die Anforderungen zu erfüllen. Insbesondere der Übergang vom Total- zum Partialmodell dient dabei der Verbesserung der Praktikabilität des Ansatzes.

Größtenteils werden Umweltparameter in der Investitionsbewertung als Nebenbedingung berücksichtigt oder es wird versucht die Auswirkungen von Umweltparametern auf die Zahlungsreihen von Investitionen zu ermitteln.<sup>5</sup> Die Berücksichtigung von Umweltschutz als eigenständigem Formalziel ist im Vergleich zu den eben genannten Herangehensweisen im Schrifttum kaum vertreten.<sup>6</sup> Grund dafür ist vor allem, dass immer noch das Oberziel der Gewinnmaximierung als unersetzlich angesehen wird.<sup>7</sup> Insoweit treten Umweltschutzziele in den Hintergrund.

Unter Umwelt wird in diesem Beitrag ausschließlich die ökologische Umwelt<sup>8</sup>, als Gesamtheit der natürlichen Lebensgrundlagen des Menschen, verstanden.<sup>9</sup> Umweltschutz wird im Allgemeinen als Schutz der natürlichen Umwelt vor schädigenden Veränderungen durch Menschen (Umweltschäden) definiert.<sup>10</sup> Schädigende Verän-

---

<sup>4</sup> Vgl. Schröder, A. (1996), S. 247 f und Vojdani, N. et al (1995), S. 298 f.

<sup>5</sup> Siehe exemplarisch Klingelhöfer, H. E. (2006).

<sup>6</sup> Bei Rieper, B. (1992), S. 180 findet sich eine Modellierung von Umweltschutz als eigenständige Zielfunktion, die gleichberechtigt neben das ökonomische Ziel tritt.

<sup>7</sup> Vgl. Tischler, K. (1996), S. 387. Im Gegensatz dazu zeigen Sieben, G./ Goetzke, W. (1976), S. 33 ff, dass es Alternativen zur Gewinnmaximierung als Zielfunktion gibt.

<sup>8</sup> Matschke, M. J. et al (1996), S. 3 weisen zu recht daraufhin, dass es eine rein natürliche bzw. ökologische Umwelt kaum noch gibt. Vielmehr bestehen große Teile der heutigen Landschaft aus von Menschen beeinflusster Kulturlandschaft.

<sup>9</sup> Vgl. Siebert, H. (1978), S. III. Zur Abgrenzung der verschiedenen Umweltbegriffe vgl. Kloepfer, M. (2004), S. 16-18.

<sup>10</sup> Vgl. Kloepfer, M. (2004), S. 16.

derungen resultieren vor allem aus dem Abbau von Ressourcen und aus schädlichen Emissionen. Ziel des Umweltschutzes ist es, die natürliche Lebensgrundlage von Menschen und Tieren zu erhalten.<sup>11</sup> Im Rahmen dieses Beitrags wird die allgemeine Definition von Umweltschutz auf die Übererfüllung von umweltrechtlichen Vorgaben eingeschränkt. Somit wird der von den Unternehmen freiwillig betriebene Umweltschutz untersucht.

Zwei weitere zu definierende Begriffe sind Investition und Formalziel. In der Finanzwirtschaft ist mit dem Begriff Investition die Verwendung von finanziellen Mitteln für den Erwerb von materiellem Vermögen, z.B. Maschinen und Anlagen und von immateriellem Vermögen, wie z.B. Patente und Wertpapiere verbunden.<sup>12</sup> Für die Zwecke dieses Beitrags wird der Begriff Investition als ein Strom von positiven und negativen Konsequenzen, die in verschiedenen Perioden anfallen, verstanden.<sup>13</sup> Dadurch findet bereits in der Begriffsdefinition der Faktor Umwelt Berücksichtigung, weil positive und negative Konsequenzen auch nicht monetäre Umweltparameter umfassen können.<sup>14</sup> Der Begriff Formalziel lässt sich als Oberziel oder Vorgabe eines Handlungsrahmens verstehen.<sup>15</sup>

Die Arbeit ist folgendermaßen aufgebaut: Im Kapitel 2 wird zunächst das Investitionsbewertungsmodell im Sinne eines Totalmodells entwickelt. Anschließend wird die Funktionsweise des Modells anhand eines Beispiels veranschaulicht (Kapitel 3). Kapitel 4 widmet sich der Fragestellung, wie von dem Totalmodell zu einem Partialmodell übergegangen werden kann. In einem weiteren Kapitel werden mögliche Erweiterungen des Modells diskutiert. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der gewonnenen Ergebnisse und mit einem Ausblick für weitere Forschungsmöglichkeiten.

---

<sup>11</sup> Vgl. Braun, F. (1974), S. 17.

<sup>12</sup> Vgl. Wöhe, G. (2010), S. 520 und Götze, U. (2008), S. 5 f.

<sup>13</sup> Vgl. Altrogge, G. (1996), S. 5.

<sup>14</sup> Vgl. Rückle, D. (1989), S. 374.

<sup>15</sup> Vgl. Jung, H. (2010), S. 29 ff und Hentze, J. et al (2001), S. 17 f.

## 2 Investitionsbewertung mittels Totalmodell

### 2.1 Annahmen

Die Ausführungen dieses Beitrags basieren auf der Annahme des unvollkommenen Kapitalmarktes.<sup>16</sup> Darüber hinaus wird unterstellt, dass der Entscheidungsträger unter Sicherheit agiert. Insofern sind die Konsequenzen der verschiedenen Handlungsalternativen dem Entscheidungsträger genau bekannt.<sup>17</sup> <sup>18</sup> Die Vereinfachung „Entscheidung unter Sicherheit“ ist erforderlich, weil bereits die Berücksichtigung von Umweltschutz als eigenständigem Formalziel die Komplexität des Entscheidungsproblems erheblich erhöht.<sup>19</sup> Um eine Überlagerung dieser Komplexitätserhöhung mit einer Komplexitätserhöhung durch die Berücksichtigung von Unsicherheiten, z. B. in Bezug auf die Höhe von Ein- und Auszahlungen einer Investition, zu vermeiden, soll in dieser Arbeit die zuerst genannte Art der Komplexitätserhöhung bewältigt werden.<sup>20</sup>

In der Modellwelt des unvollkommenen Kapitalmarktes unter Sicherheit kann eine theoretisch richtige Investitionsentscheidung aufgrund der Abhängigkeiten zwischen den Investitions- und Finanzierungsobjekten und der Berücksichtigung von Nebenbedingungen nur über Totalmodelle bzw. über simultane Planung erfolgen.<sup>21</sup> Ein solches Totalmodell wurde nahezu zeitgleich von Hax und Weingartner entwickelt.<sup>22</sup> Das im Folgenden dargestellte Modell basiert auf ähnlichen Annahmen wie das Modell von Hax. Diese lauten:

- Es wird unterstellt, dass bei mehrfacher Durchführung eines Investitions- oder Finanzierungsobjektes die Zahlungsreihe für jedes weitere Objekt iden-

<sup>16</sup> Ansätze zur Bewertung von Investitionsobjekten mit Berücksichtigung von Umweltschutz, die auf der Annahme des vollkommenen Kapitalmarkts basieren, finden sich bei Schröder, A. (1996), S. 254 ff.

<sup>17</sup> Die Annahme bezüglich der Sicherheit bezieht sich hier auf die monetären und ökologischen Konsequenzen der Handlungsalternativen und die Kenntnis aller Entscheidungsvariablen und Restriktionen, aber nicht auf den Planungshorizont. Vgl. zu den drei Arten von Unsicherheit im weiteren Sinne Hering, T. (2008), S. 12.

<sup>18</sup> Eine Betrachtung der subjektiven Sicherheit, das heißt die Planung eines Entscheidungsträgers mit einwertigen Erwartungen, ist ebenfalls möglich; vgl. dazu Hering, T. (2008), S. 132. Dadurch wirkt die Vereinfachung auf den Fall der Sicherheit deutlich weniger unrealistisch, vgl. Hering, T. (2008), S. 131 ff.

<sup>19</sup> Zur Kritik der Annahme einer Modellwelt aus der Kombination von unvollkommenem Kapitalmarkt und Sicherheit vgl. Schmidt, R. H./ Terberger, E. (1997), S. 182 f.

<sup>20</sup> Mit der Berücksichtigung von Unsicherheit wurde sich in der Finanzwirtschaft bereits intensiv auseinandergesetzt. Der Unsicherheitsfall wird daher in fast jedem finanzwirtschaftlichem Lehrbuch behandelt. Siehe beispielhaft Hering, T. (2008), S. 253 ff.

<sup>21</sup> Vgl. Klingelhöfer, H. E. (2006), S. 31.

<sup>22</sup> Vgl. Hax, H. (1964), S. 435 ff und Weingartner, H. M. (1963), S. 16 ff. Ausgangspunkt für das Totalmodell von Hax und Weingartner war das Modell von Albach, H. (1962), S. 84 ff.

tisch ist. Die Abhängigkeit der Zahlungsreihe eines Objektes<sup>23</sup> vom Ausmaß seiner Realisierung bleibt daher unberücksichtigt. Insbesondere wird vernachlässigt, dass eine weitere Einheit ein und desselben Investitionsobjektes im Sinne einer positiven, aber abnehmenden Grenzproduktivität geringere Einzahlungsüberschüsse erwirtschaftet als die vorherige Einheit des Investitionsobjektes.<sup>24</sup>

- Die Anzahl der Investitions- und Finanzierungsobjekte ist endlich.<sup>25</sup>
- Die Investitions- und Finanzierungsobjekte sind beliebig teilbar. Um Ganzzahligkeitsprobleme zu vermeiden, soll vorerst unterstellt werden, dass die Investitions- und Finanzierungsobjekte jeweils unabhängig voneinander durchgeführt werden können und dass sich einzelne Investitions- und Finanzierungsobjekte nicht gegenseitig ausschließen (Wahlproblem).<sup>26</sup>
- Die Ein- und Auszahlungen fallen genau zu Beginn einer bestimmten Periode bzw. zum Ende der Vorperiode an.<sup>27</sup> Durch diese Annahmen wird auf eine Diskontierung von Zahlungen verzichtet, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten innerhalb einer Periode anfallen.
- Es wird von Steuerwirkungen abstrahiert.<sup>28</sup>

## **2.2 Formulierung der zweidimensionalen Zielfunktion**

### **2.2.1 Vermögensendwertmaximierung als monetäres Ziel**

Als oberstes monetäres Ziel von Unternehmen wird häufig die langfristige Sicherung der Unternehmensexistenz genannt.<sup>29</sup> Für Zwecke der Investitionsbewertung muss dieses monetäre Oberziel operationalisiert werden.<sup>30</sup> Als Möglichkeiten kommen dabei grundsätzlich zahlungsorientierte und gewinnorientierte Größen in Frage. Da in der Finanzwirtschaft häufig die Verwendung von Zahlungs- anstatt von Gewinngrößen vorgeschlagen wird,<sup>31</sup> sollen Zahlungsgrößen auch in dieser Arbeit im Mit-

---

<sup>23</sup> Der Begriff Objekte soll im Folgenden als Abkürzung für Investitions- und Finanzierungsobjekte dienen.

<sup>24</sup> Vgl. Götze, U. (2008), S. 311.

<sup>25</sup> Vgl. Götze, U. (2008), S. 294 in Verbindung mit S. 311. Die Kenntnis dieser Investitions- und Finanzierungsobjekte ergibt sich aus der Annahme der Sicherheit.

<sup>26</sup> Vgl. Götze, U. (2008), S. 295 in Verbindung mit S. 311.

<sup>27</sup> Vgl. Götze, U. (2008), S. 295 in Verbindung mit S. 311.

<sup>28</sup> Vgl. Götze, U. (2008), S. 295 in Verbindung mit S. 311.

<sup>29</sup> Vgl. Altrogge, G. (1998), S. 280 oder Hering, T. (2008), S. 9.

<sup>30</sup> Vgl. Götze, U. (2008), S. 19 f.

<sup>31</sup> Vgl. Hering, T. (2008), S. 19.

telpunkt stehen.<sup>32</sup> Neben der Unterscheidung in Zahlungs- und Gewinngrößen lassen sich monetäre Ziele in absolute und relative Ziele unterteilen.<sup>33</sup> Dabei wird bei den relativen Zielen die absolute Größe, z.B. der Gewinn ins Verhältnis zum Mitteleinsatz gesetzt.<sup>34</sup> Im Folgenden werden absolute Ziele zu Grunde gelegt.<sup>35</sup>

Bei der Beurteilung von Investitionen anhand von absoluten Zahlungsgrößen lassen sich zwei Ziele zu Grunde legen, die sich aus den Präferenzen der Anteilseigner bezüglich der möglichen Entnahmen ableiten. Zum einen kann es das Ziel der Anteilseigner sein, das Vermögen zu maximieren. Dieses Ziel wird als Vermögensmaximierung bezeichnet. Die Vermögensmaximierung kennt zwei Sonderfälle: Barwertmaximierung und Endwertmaximierung. Bei der Barwertmaximierung geht es um die Maximierung der Anfangsentnahme und bei der Endwertmaximierung um die Maximierung der Entnahme am Planungshorizont. Zum anderen kann als Ziel die Einkommensmaximierung gewählt werden. Dabei soll die Breite des Entnahmestromes maximiert werden.<sup>36</sup>

Die beiden Ziele sind in der Regel konkurrierend, das heißt eine Erhöhung des Vermögens geht zu Lasten des Einkommens und vice versa.<sup>37</sup> Eine Möglichkeit der Lösung dieses Zielkonfliktes, der bei gleichzeitiger Verfolgung beider Ziele auftritt, besteht in der Formulierung von Zielgewichten.<sup>38</sup> Im Allgemeinen wird dieser Zielkonflikt aber dadurch gelöst, dass ein Ziel maximiert und für das andere Ziel ein Mindestniveau in der Nebenbedingung festgelegt wird. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird das Ziel der Vermögensendwertmaximierung (max. EW) bei gegebenen Ausschüttungen zu Grunde gelegt. Diese Zielsetzung entspricht der in der Praxis häufig beobachtbaren konstanten Ausschüttungspolitik kombiniert mit der Thesaurierung der restlichen Beträge.<sup>39</sup> Im Gegensatz zu den im nächsten Kapitel diskutierten

---

<sup>32</sup> Es sei darauf verwiesen, dass unter bestimmten Annahmen Investitionsentscheidungen, die auf Gewinngrößen basieren zum gleichen Ergebnis wie Investitionsentscheidungen auf Basis von Zahlungsgrößen führen; vgl. dazu Lücke, W. (1955), S. 313 ff.

<sup>33</sup> Vgl. Adam, D. (2000), S. 41.

<sup>34</sup> Vgl. Hering, T. (2008), S. 16.

<sup>35</sup> Zur Vorteilhaftigkeit von absoluten Zielen gegenüber relativen Zielen siehe Hering, T. (2008), S. 17 f.

<sup>36</sup> Hering, T. (2008), S. 20-21.

<sup>37</sup> Da hier von einem unvollkommenen Kapitalmarkt ausgegangen werden soll, führen die beiden Zielsetzung im Allgemeinen zu unterschiedlichen Investitionsentscheidungen. Vgl. dazu Adam, D. (2000), S. 38.

<sup>38</sup> Vgl. Klingelhöfer, H. (2006), S. 25.

<sup>39</sup> Vgl. Klingelhöfer, H. (2006), S. 24.

Umweltschutzziele erfolgt somit im monetären Bereich die Beschränkung auf ein Ziel, das den monetären Bereich in der Zielfunktion repräsentiert:

$$\max. EW; EW := G_n$$

$G_n$  steht dabei für die Schlusssentnahme, das heißt für die Entnahme am Planungshorizont. Inwieweit  $G_n$  tatsächlich entnommen wird, ist fraglich, da davon ausgegangen werden muss, dass sich der Planungshorizont in die Zukunft verschieben wird, wenn das Unternehmen auch über den Planungshorizont hinaus fortbestehen soll.<sup>40</sup>

## 2.2.2 Umweltschutzziele

### 2.2.2.1 Operationalisierung

Eine Formulierung von Umweltschutz<sup>41</sup> als Formalziel allein ist nicht ausreichend, weil dadurch nur der übergeordnete Rahmen vorgegeben wird.<sup>42</sup> Für unternehmerisches Handeln müssen Ziele operational sein.<sup>43</sup> Daher bedarf es auch bei dem Treffen von Investitionsentscheidungen unter Berücksichtigung von Umweltschutz als eigenständigem Formalziel einer Operationalisierung.<sup>44</sup> Für die Operationalisierung des Umweltschutzziels bietet sich eine Unterteilung in die betroffenen Umweltbereiche an. Dabei werden im Schrifttum diverse Unterteilungen diskutiert. Einige Autoren beschränken sich auf wenige Umweltmedien wie etwa Abfall, Lärm, Boden/Wasser, Luft, während andere Autoren tiefer untergliedern in z.B. Natur und Landschaft, Abfallbeseitigung, Umweltchemikalien und Biozide, Wasser, Luft und Lärm.<sup>45</sup> Für diesen Beitrag ist die Diskussion zur optimalen Tiefe der Untergliederung von Umwelt in Umweltbereiche nicht erforderlich, sodass verschiedene Umweltbereiche abstrakt über den Index  $k = 1, \dots, K$  beschrieben werden.<sup>46</sup>

Zur quantitativen Erfassung der Einwirkungen von Unternehmen auf die Umwelt müssen in der Regel repräsentative Ersatzgrößen genutzt werden, weil noch kein

<sup>40</sup> Vgl. Hering, T. (2008), S. 158 und zur Fortschreibung des Planungshorizontes vgl. Hering, T. (2008), S. 20.

<sup>41</sup> Selbst der Begriff Umweltschutz für das Ziel ist kritisch. Tischler, K. (1996), S. 108 weist zu Recht daraufhin, dass der Begriff Umweltschonung angebrachter wäre, da unternehmerische Aktivitäten notwendiger Weise die Natur belasten. Es gilt diese Belastung zu minimieren, das heißt die Umwelt so weit wie möglich zu schonen; vgl. dazu auch Müller-Christ, G. (2001), S. 12.

<sup>42</sup> Vgl. Jung, H. (2010), S. 29 ff und Hentze, J. et al (2001), S. 17 f.

<sup>43</sup> Vgl. Altrogge, G. (1998), S. 280.

<sup>44</sup> Vgl. Raffee, H. et al (1992), S. 254.

<sup>45</sup> Vgl. Wicke, L. (1993), S. 121 f. Eine noch differenziertere Aufteilung findet sich bei Stahlmann, V./ Clausen, J. (2000), S. 37 ff.

<sup>46</sup> Vgl. zu diesem Vorgehen auch Rückle, D. (1989), S. 378, wobei dieser einen Index  $j = 1$  bis  $n$  für die verschiedenen Umweltarten nutzt.

ganzheitliches naturwissenschaftliches Erklärungsmodell existiert.<sup>47</sup> Als repräsentative Ersatzgrößen werden vor allem Emissionen, anstatt der für die Umweltqualität eigentlich entscheidenden Immissionen, genutzt.<sup>48 49</sup> Grund dafür ist, dass die Immissionen, die ein bestimmtes Unternehmen verursacht, schwer messbar sind.<sup>50</sup> Die Messprobleme erhöhen sich, wenn zusätzlich die Determinanten von Immissionen, wie z.B. Wind oder Strömungsgeschwindigkeit berücksichtigt werden. Außerdem können diese Determinanten im Laufe der Zeit stark variieren.<sup>51</sup> Da bereits die Erfassung von Umweltwirkungen nur mit Ersatzgrößen realisierbar ist, muss diese Beschränkung auch für die Zielformulierung gelten, damit eine Erfolgsmessung der Umweltschutzziele möglich ist.

Für das Einwirken von Unternehmen auf einen Umweltbereich  $k$  existieren mehrere solcher Ersatzgrößen. Nutzt man beispielsweise die Emissionen als Ersatzindikator für den Einfluss auf den Umweltbereich Luft, so wird bereits bei den Treibhausgasen, als einer Art von Emissionen, in verschiedenste Stoffe, z.B. Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>), Fluorkohlenwasserstoff (HFC) unterschieden. Würde die Formulierung der Ziele auf dieser Ebene ansetzen, müssten für jeden der 1 bis  $K$  Umweltbereiche eine Vielzahl an Zielen formuliert werden.<sup>52</sup> Diese Ziele ließen sich dann über die Ersatzindikatoren, wie z.B. hier die Emissionsmenge an CO<sub>2</sub>, operationalisieren.<sup>53</sup> Um die Komplexität der in den nächsten Kapiteln folgenden Ansätze beherrschbar zu halten, werden die verschiedenen Ersatzindikatoren auf einen aggregierten Ersatzindikator pro Umweltbereich verdichtet.<sup>54</sup> Somit gibt es für jeden Umweltbereich ein Umweltschutzziel, das heißt es gibt 1 bis  $K$  Umweltschutzziele.<sup>55</sup> In

<sup>47</sup> Vgl. Rückle, D. (1989), S. 373 und Müller-Christ, G. (2001), S. 12.

<sup>48</sup> Vgl. Hansmann, K.-W. (1998), S. 113 und Rückle, D. (1989), S. 381.

<sup>49</sup> Einen Ansatz zur Nutzung von Immissionen liefert z.B. Wicke, L. (1993), S. 123 ff, wobei er auch auf die zahlreichen Einschränkungen, die mit dem Ansatz verbunden sind, eingeht.

<sup>50</sup> Vgl. Strebel, H. (1980), S. 59.

<sup>51</sup> Vgl. Endres, A. (2007), S. 152.

<sup>52</sup> Vgl. Strebel, H. (1980), S. 58.

<sup>53</sup> Weitere Beispiele für Umweltindikatoren finden sich z.B. bei Jänicke, M./ Zieschank, R. (2004), S. 55. Eine ausführliche Darstellung der Anforderungen an Umweltindikatoren findet sich bei Wiggering, H./ Müller, F. (2004 a), S. 9 ff und Wiggering, H./ Müller, F. (2004 b), S. 123 ff.

<sup>54</sup> Für die unterschiedlichen Verfahren zur Aggregation von verschiedenartigen Stoff- und Energiearten vgl. Rückle, D. (1992), S. 462 f und Hansmann, K. (1998), S. 108 ff. Insbesondere die Aggregation über Äquivalenzkoeffizienten von Müller-Wenk, R. (1978), S. 35 ff und deren Erweiterungen sind dabei zu nennen. Einen Überblick zu den Erweiterungen des Ansatzes von Müller-Wenk findet sich bei Schaltegger, S./ Sturm, A. (1992), S. 80 ff.

<sup>55</sup> Wird im Folgenden von Umweltschutzzielen gesprochen, so sind damit die Sachziele für die einzelnen Umweltbereiche gemeint, die der Erreichung des Ober- bzw. Formalziels Umweltschutz dienen. Ungeachtet dessen ist eine Aufteilung des Formalziels Umweltschutz in bestimmte Formalziele

dem hier geschilderten Beispiel der Treibhausgase hat es sich in der Vergangenheit als vorteilhaft erwiesen, die Umweltwirkungen aller Treibhausgase in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten auszudrücken.<sup>56</sup>

### 2.2.2.2 Maximierung der Breite des Zustroms an Umweltschutz

Das monetäre Ziel lässt sich entweder in Form der Einkommensmaximierung oder in der Form der Gegenwartswertmaximierung formulieren. Eine ähnliche Unterscheidung ist bei den Umweltschutzziele möglich. Gemäß dem Minimax-Prinzip lässt sich zum einen fordern, dass die Breite des Stroms an Umweltschutzwirkungen maximiert bzw. die Breite des Stroms an Umweltschädigung minimiert werden soll. Zum anderen kann das Ziel in der Maximierung der Summe der Umweltschutzwirkungen (Gegenwartswertmaximierung) bzw. Minimierung der Summe der Umweltschäden bestehen. Zunächst soll die erste Variante mit dem am Minimax-Prinzip orientiertem Ziel beschrieben werden.

Die Zielfunktion

$$\max. US^B; US^B := \sum_{k=1}^K US_k$$

bringt zum Ausdruck, dass die Breite des Zustroms an Umweltschonung  $US^B$ <sup>57</sup> maximiert werden soll.  $US_k$  beschreibt die Breite des Zustroms an Umweltschonung in dem Umweltbereich  $k$ . Der Gesamtzustrom ergibt sich aus der Summe der Zuströme in den 1 bis  $K$  Umweltmedien. Bei  $US_k$  handelt es sich nicht um Geldgrößen, sondern um Mengengrößen, wie z.B. Tonnen an CO<sub>2</sub>. Außerdem weisen die einzelnen  $US_k$  unterschiedliche Dimensionen auf. Damit eine Aggregation zu  $US^B$  möglich wird, müssen die  $US_k$  gleichnamig gemacht werden.<sup>58</sup> Theoretisch werden dafür Wechselkurse zwischen den Umweltbereichen benötigt, die die unterschiedliche Bedeutung der einzelnen Bereiche für den Schutz der ökologischen Umwelt als Ganzes widerspiegeln.<sup>59</sup>

---

für jeden Umweltbereich möglich, wobei dann trotzdem eine Formulierung von Sachzielen für die einzelnen Umweltbereiche unabdingbar ist.

<sup>56</sup> So schildert Endres, A. (2007) die Vorzüge von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten als Wechselkurs im Rahmen des Kyoto-Protokolls.

<sup>57</sup> Im Folgenden wird Umweltschonung als Synonym für Umweltschutz genutzt.

<sup>58</sup> Einige Autoren nutzen dabei die Annahme, dass sich alle Schadstoffarten in der gleichen Einheit ausdrücken lassen; vgl. Seelbach, H./ Dethloff, J. (1998), S. 32.

<sup>59</sup> Als mögliche Verfahren sind die Aggregation über Äquivalenzkoeffizienten von Müller-Wenk, R. (1978), S. 35 ff und deren Erweiterungen zu nennen.

Bei der am Minimax-Prinzip orientierten Zielsetzung handelt es sich um eine Flaschenhalsoptimierung. Es kommt zu Schwierigkeiten, sobald der Wert für die gesetzlichen Höchstgrenzen zwischen den Perioden variiert. Da gemäß obiger Definition erst dann von Umweltschutz ausgegangen wird, wenn die gesetzlichen Höchstgrenzen unterschritten werden, sinkt der Umweltschutz proportional mit der Senkung der gesetzlich festgelegten Höchstgrenzen. Am besten lässt sich diese Aussage bei Betrachtung eines Extremfalles verdeutlichen. Würde die Regierung aufgrund neuer (vor allem naturwissenschaftlicher) Erkenntnisse über die Belastung eines Umweltbereichs die Höchstgrenze für diesen Bereich auf null herabsetzen, so wäre auch die Umweltschonung ab dieser Periode gleich null. Wenn aber  $US_k$  in einer Periode gleich null ist, so ist aufgrund der Maximierung des kleinsten Wertes auch der Wert der Umweltschonung in den früheren Perioden (vor Verschärfung der Umweltpolitik) gleich null. Nun ist das geschilderte Beispiel nicht sehr realistisch, aber eine Tendenz zur Verschärfung von Umweltvorschriften im Zeitablauf ist deutlich erkennbar.<sup>60</sup>

### 2.2.2.3 Maximierung des Gegenwartswertes an Umweltschutz

In der zweiten Variante der Maximierung der Umweltschutzziele wird die Zielfunktion wie folgt verändert:

$$\max. US; US := \sum_{t=1}^n \sum_{k=1}^K US_{tk} \cdot \beta_{tk}$$

Als Gegenwartswert ergibt sich  $US$  aus der Summe der Umweltschonungen über die 1 bis  $n$  Perioden und die 1 bis  $K$  Umweltbereiche. Dabei sind die beiden Sonderfälle Barwertmaximierung und Endwertmaximierung nicht geeignet. Es kann nämlich nicht im Sinne des Umweltschutzes sein, wenn nur in der ersten oder letzten Periode Umweltschonung stattfindet. Vielmehr erfordert der Umweltschutz einen kontinuierlichen Prozess der Umweltschonung. Über die Variable  $\beta_{tk}$  können die einzelnen Umweltbereiche und Perioden entsprechend den Präferenzen der Investoren gewichtet werden. Im Folgenden soll die Berücksichtigung der Präferenzen auf die verschiedenen Umweltbereiche beschränkt werden, indem unterstellt wird, dass der Umweltschutz in jeder Periode gleich bedeutsam ist. Diese Annahme dient erneut der Komplexitätsreduktion und ist kompatibel mit der Vorstellung von Umweltschutz als

<sup>60</sup> Als Beispiel für Verschärfungen der Umweltpolitik siehe die Ausführungen zum Kyoto-Protokoll bei Endres, A. (2007), S. 260 ff.

kontinuierlicher Prozess. Außerdem lässt sich die Annahme jederzeit aufheben. Der Gewichtungsfaktor für die Umweltschutzziele vereinfacht sich zu  $\beta_k$ .

Die Aggregation von  $US_{tk}$  zu  $US$  erfordert ebenfalls deren Gleichnamigkeit. Allerdings bietet diese Zielfunktion im Vergleich zur Maximierung der Breite des Zustroms (2.2.2.2) den Vorteil, dass im Zeitablauf sinkende Emissionshöchstgrenzen unproblematisch für die Abbildung von Umweltschutz sind. Selbst in dem oben geschilderten Extremfall der Reduktion der gesetzlichen Höchstgrenze auf den Wert null ab einer bestimmten Periode ergibt sich für die Umweltschonung in einem Umweltbereich ein positiver Wert, wenn in den Perioden vor Reduktion der Höchstgrenze auf null Umweltschonung betrieben wurde. Dieser Vorteil begründet die Auswahl der Gegenwartswertmaximierung für die Umweltschutzziele.

### 2.2.3 Zusammenführung des monetären Ziels mit den Umweltschutzzielen

Bei gleichzeitiger Verfolgung des Ziels der Vermögensendwertmaximierung und der Umweltschutzziele entsteht eine vektorielle Zielfunktion:

$$\max. \begin{pmatrix} EW \\ US \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_n \\ \sum_{t=1}^n \sum_{k=1}^K US_{tk} \cdot \beta_k \end{pmatrix}$$

Lineare Optimierungsprogramme mit einer vektoriellen Zielfunktion lassen sich ohne weitere Informationen über die Präferenzen des Entscheidungsträgers nur lösen, wenn es eine perfekte Lösung gibt.<sup>61</sup> Eine Lösung wird als perfekt bezeichnet, wenn alle in der Zielfunktion enthaltenen Teilziele ihr Maximum erreichen.<sup>62</sup> Da zwischen den Umweltschutzzielen untereinander und zwischen den Umweltschutzzielen und dem monetären Ziel in der Regel Zielkonkurrenz herrscht, ist keine perfekte Lösung möglich.<sup>63</sup> Daher werden Kompromissmodelle für die Lösung benötigt. Ein sehr verbreitetes Kompromissmodell ist die Zielgewichtung.<sup>64</sup>

Für die Zielgewichtung muss der Entscheidungsträger seine Präferenzen für das monetäre Ziel und das aggregierte Umweltschutzziel in Form von Gewichtungsfaktoren angeben. Dabei bietet sich eine Normierung der Gewichtungsfaktoren auf 1 bzw. 100

<sup>61</sup> Vgl. Dinkelbach, W./ Kleine, A. (1996), S. 34.

<sup>62</sup> Vgl. Dinkelbach, W./ Kleine, A. (1996), S. 36f.

<sup>63</sup> Vgl. Dinkelbach, W./ Kleine, A. (1996), S. 37.

<sup>64</sup> Vgl. Dinkelbach, W./ Kleine, A. (1996), S. 48.

Prozent an.<sup>65</sup> Als Gewichtungsfaktor dient  $\alpha$  für das monetäre Ziel und  $\beta_k$  für die Umweltschutzziele. Daraus ergibt sich folgende Zielfunktion:

$$\max. ZFW, \quad ZFW = \alpha \cdot G_n + \sum_{t=1}^n \sum_{k=1}^K US_{tk} \cdot \beta_k$$

Zu maximieren ist der Zielfunktionswert ZFW. Dieser ergibt sich aus dem mit  $\alpha$  gewichteten Vermögensendwert und den mit  $\beta_k$  gewichteten und über alle Perioden und alle Umweltbereiche aggregierten Umweltschutzziele. Mit Hilfe der zuletzt genannten Zielfunktion können die Umweltschutzziele und das monetäre Ziel gleichzeitig verfolgt werden. Das Problem der unterschiedlichen Dimensionen in denen die Ziele erfasst werden, bleibt jedoch bestehen. Eine Möglichkeit die verschiedenen Ziele in eine einheitliche Dimension zu überführen, ist das Konzept der Monetarisierung. Da der Vermögensendwert bereits in Geldeinheiten gemessen wird, müssen nur die Ersatzgrößen für die Erfassung der Umweltschutzziele in Geldeinheiten bewertet werden. In der Umweltökonomie existieren verschiedenste Konzepte der Monetarisierung von Umweltgrößen. Zu den bekanntesten zählen die Nutzung internalisierter Umweltkosten und das Zahlungsbereitschaftskonzept.<sup>66</sup> Beide Konzepte sind mit erheblichen konzeptionellen und praktischen Problemen verbunden und werden hier nicht weiter betrachtet.<sup>67</sup>

Anstelle dessen erfolgt die Überführung in eine einheitliche Dimension mit Hilfe von Zufriedenheitsgraden. Dafür wird jedem Umweltbereich für jede Periode ein Zufriedenheitsgrad  $\lambda_{tk}$  zugeordnet. Dem monetären Ziel der Vermögensendwertmaximierung wird der Zufriedenheitsgrad  $\lambda_{MZ}$  zugeordnet. Der Zufriedenheitsgrad eines Ziels beträgt 1, wenn der Entscheidungsträger mit der Erreichung dieses Ziels völlig zufrieden ist. Er beträgt hingegen 0, wenn der Entscheidungsträger mit der Erreichung des Ziels völlig unzufrieden ist. Als Zielfunktion lässt sich dann schreiben:

$$\max. \lambda; \lambda := \alpha \cdot \lambda_{MZ} + \sum_{t=1}^n \sum_{k=1}^K \lambda_{tk} \cdot \beta_k$$

Der Gesamtzufriedenheitsgrad  $\lambda$  ergibt sich aus der gewichteten Summe der Zufriedenheitsgrade für die Umweltschutzziele und dem monetären Ziel.

<sup>65</sup> Vgl. Dinkelbach, W./ Kleine, A. (1996), S. 49.

<sup>66</sup> Vgl. Endres, A. (2007), S. 29 und Schreiner, M. (1992), S. 474f.

<sup>67</sup> Vgl. Endres, A. (2007), S. 29 und Schreiner, M. (1992), S. 474f.

Wie oben erwähnt, bewegen sich die Zufriedenheitsgrade zwischen null und eins. Über die Zugehörigkeitsfunktion wird jeder Ausprägung der Erfassungsgröße eines Ziels ein Zufriedenheitsgrad zugeordnet. Neben linearen Verläufen werden im Schrifttum konkave oder hyperbolische Verläufe für die Zugehörigkeitsfunktionen diskutiert. Die Wahl der verwendeten Zugehörigkeitsfunktion muss davon abhängig gemacht werden, wie genau der Entscheidungsträger die Zufriedenheit bezüglich der verschiedenen Zielerreichungsgrade angeben kann. Kann der Entscheidungsträger nur Ober- und Untergrenzen angeben, wovon im Folgenden ausgegangen wird, wird die Verwendung linearer Zugehörigkeitsfunktionen vorgeschlagen.<sup>68</sup> Für das monetäre Ziel lässt sich folgende Zugehörigkeitsfunktion definieren:

$$\lambda_{MZ}(G_n) = \begin{cases} 0 & \text{für } G_n \leq G_n^{UG} \\ \frac{G_n - G_n^{UG}}{G_n^{OG} - G_n^{UG}} & \text{für } G_n^{UG} < G_n < G_n^{OG} \\ 1 & \text{für } G_n \geq G_n^{OG} \end{cases}$$

Der Zufriedenheitsgrad für das monetäre Ziel  $\lambda_{MZ}$  ist eine lineare Funktion des Vermögensendwertes bzw. der Schlussentnahme  $G_n$ . Für Vermögensendwerte, die kleiner oder gleich der Untergrenze  $G_n^{UG}$  sind, ergibt sich ein Zufriedenheitsgrad von null. Im Intervall zwischen  $G_n^{UG}$  und der Obergrenze  $G_n^{OG}$  steigt der Zufriedenheitsgrad linear von null bis eins. Ab  $G_n^{OG}$  ist der Entscheidungsträger voll zufrieden, das heißt der Zufriedenheitsgrad beträgt eins.

Die Untergrenze  $G_n^{UG}$  steht für den Mindestvermögensendwert, der notwendig ist, damit das Unternehmen auch über den Planungshorizont hinaus bestehen kann. Die Obergrenze  $G_n^{OG}$  kann auf zwei Wegen bestimmt werden:

Erstens: Die Obergrenze kann berechnet werden. Dabei ist  $G_n^{OG}$  als maximal erzielbarer Vermögensendwert zu interpretieren, der erreicht werden kann, wenn lediglich die Einhaltung der gesetzlichen Umweltvorgaben gefordert wird. Die Zufriedenheitsgrade der Umweltschutzziele können in diesem Fall gegen null gehen. In diesem Fall gibt  $G_n^{OG}$  an, mit welcher Schlussentnahme der Entscheidungsträger vollständig zufrieden sein muss. Das scharfe lineare Optimierungsprogramm zur Bestimmung von  $G_n^{OG}$  findet sich im Anhang A1.

Zweitens: Als einfacheren Weg zur Bestimmung der Obergrenze bietet sich die Festlegung durch den Entscheidungsträger an. Die Obergrenze gibt dann an, mit welcher

<sup>68</sup> Vgl. Wolf, J. (1988), S. 42-46.

Schlussentnahme der Entscheidungsträger vollständig zufrieden ist. Aufgrund der enormen Komplexitätserhöhungen in Folge der Berechnung wird im Weiteren der einfachere zweite Weg für die Ermittlung von  $G_n^{OG}$  zu Grunde gelegt.

Da die Unter- und Obergrenzen für die Modellergebnisse von entscheidender Bedeutung sind, sollten diese den Investoren bekanntgemacht werden. Dadurch lässt sich die Nachvollziehbarkeit der Investitions- und Finanzierungsentscheidung aus Sicht der Investoren steigern.

Die linearen Zugehörigkeitsfunktionen für die Umweltschutzziele lauten:

$$\lambda_{tk} \left( \sum_{j=1}^J x_j \cdot e_{jtk} \right) = \begin{cases} 0 & \text{für } \sum_{j=1}^J x_j \cdot e_{jtk} \geq b_{tk} \\ 1 - \frac{\sum_{j=1}^J x_j \cdot e_{jtk} - b_{tk}^{UG}}{b_{tk} - b_{tk}^{UG}} & \text{für } b_{tk}^{UG} < \sum_{j=1}^J x_j \cdot e_{jtk} < b_{tk} \\ 1 & \text{für } \sum_{j=1}^J x_j \cdot e_{jtk} \leq b_{tk}^{UG} \end{cases}$$

Der Zufriedenheitsgrad für das Umweltschutzziel im Umweltbereich k und in der Periode t ergibt sich als lineare Funktion der Umweltbelastung. Dabei geben die Strukturvariablen  $x_j$  das Ausmaß der Realisation eines Investitionsobjektes an. Die Variable  $e_{jtk}$  steht für die Umweltbelastung des Investitionsobjektes j in der Periode t und im Umweltbereich k, wobei die Anzahl aller Investitionsobjekte J ist.<sup>69</sup> Ist die Variable  $e_{jtk}$  negativ, so reduziert das Investitionsobjekt die Umweltschädigung in dem betroffenen Umweltbereich.<sup>70</sup> Die Einheit von  $e_{jtk}$  besteht nicht in Geldeinheiten, sondern in Mengengrößen, wie z.B. Tonnen an CO<sub>2</sub>. Die Dimension von  $e_{jtk}$  kann zwischen den verschiedenen Umweltbereichen variieren. Es sei darauf hingewiesen, dass hier Umweltwirkungen durch Finanzierungsobjekte nicht modelliert wurden. Wenn Umweltwirkungen durch Finanzierungsobjekte bekannt sind, lassen sich diese in analoger Weise zu den Investitionsobjekten durch  $y_q \cdot e_{qtk}$  erfassen,

<sup>69</sup> Die Modellierung der Umweltschädigung beschränkt sich auf flüchtige Umweltbelastungen, das heißt auf Umweltbelastungen, die ausschließlich innerhalb einer Periode wirken, aber nicht darüber hinaus.

<sup>70</sup> Beispiele dafür sind Investitionen in Filteranlagen. Dabei wird im Umweltbereich Luft die Variable  $e_{jtk}$  einen negativen Wert annehmen, weil die Investition ansonsten ihren Zweck verfehlt hätte.

wobei  $y_q$  das Ausmaß der Realisation eines Finanzierungsobjektes angibt. Die für den Zufriedenheitsgrad  $\lambda_{tk}$  maßgebliche Umweltbelastung ergibt sich aus der Summe der Umweltbelastungen aller realisierter Investitionsobjekte in der Periode  $t$  und dem Umweltbereich  $k$ .

Aufgrund der natürlichen Grenze von null haben die Zugehörigkeitsfunktionen für die Umweltschutzziele ihre kleinstmögliche Untergrenze genau bei null. Bei Wahl dieses Grenzfalles ( $b_{tk}^{UG} = 0$ ) wird unterstellt, dass der Entscheidungsträger erst bei vollständiger Vermeidung von Umweltschäden bzw. maximaler Umweltschonung völlig zufrieden ist. Sollte dieses nicht den Vorstellungen des Entscheidungsträgers entsprechen, kann für die Untergrenze eine positive Zahl zwischen null und der Obergrenze gewählt werden.

Genau wie für die Obergrenze des monetären Ziels ( $G_n^{OG}$ ) ist es auch hier möglich die Untergrenze  $b_{tk}^{UG}$  über ein separates lineares Optimierungsprogramm zu berechnen. Dabei wird die Minimierung der Umweltschäden für jeweils einen Bereich gefordert. In den anderen Umweltbereichen werden lediglich die gesetzlichen Auflagen berücksichtigt. Die Liquiditätsrestriktionen und ein Mindestvermögensendwert müssen ebenfalls als Nebenbedingungen gefordert werden. Im Anhang A2 ist das entsprechende lineare Optimierungsmodell zur Ermittlung der Untergrenze für einen Umweltbereich  $k^*$  dargestellt. Aus den gleichen Gründen wie oben, wird im Weiteren die Festlegung der Untergrenzen  $b_{tk}^{UG}$  durch den Entscheidungsträger zu Grunde gelegt. Diese sind den Investoren ebenfalls bekannt zu machen.

Gemäß der hier erfolgten Definition von Umweltschutz beginnt dieser erst, wenn die gesetzliche Höchstgrenze unterschritten wird. Demnach entspricht die Obergrenze der Zugehörigkeitsfunktion der gesetzlichen Höchstgrenze  $b_{tk}$ .<sup>71</sup> Der Zufriedenheitsgrad wird null sobald die Umweltbelastungen im Umweltbereich  $k$  und in der Periode  $t$  größer oder gleich der gesetzlichen Höchstgrenze  $b_{tk}$  sind.

#### 2.2.4 Planungshorizont

Die Wahl des Planungshorizontes ist bei der Bestimmung der Zielsetzung ebenfalls von großer Bedeutung für die Investitionsbewertung. Bei unendlichem Planungszeit-

---

<sup>71</sup> Gleichfalls kann bei anderer Interpretation von Umweltschutz auch die Obergrenze  $b_{tk}$  frei vom Entscheidungsträger gewählt werden und muss nicht zwangsweise, wie für diese Arbeit unterstellt, der gesetzlich vorgeschriebenen Höchstgrenze entsprechen.

raum ( $n \rightarrow \infty$ ) sind die oben genannten Ziele nicht operational.<sup>72</sup> Es ist daher notwendig den Planungshorizont zu determinieren, wobei die Wahl des Planungshorizontes selbst eine Optimierungsentscheidung ist.<sup>73</sup> Denn: Je größer der Planungshorizont, desto genauer lassen sich die verschiedenen Investitionsmöglichkeiten erfassen, aber desto komplexer und somit schwieriger wird die Investitionsentscheidung auch.<sup>74</sup>

Das Hauptproblem bei der Wahl der Länge des Planungszeitraums besteht in der Interdependenz zwischen den Perioden. Enden die Zahlungsreihen einiger zu beurteilender Investitionen nicht am Ende der letzten Periode des Planungszeitraums, so sind optimale Investitionsentscheidungen nur für den (heuristisch) festgelegten Planungszeitraum möglich, aber nicht darüber hinaus.<sup>75</sup> Eine Möglichkeit dieses Problem zu lösen wird in Kapitel 5 aufgezeigt.

## 2.3 Formulierung der Nebenbedingungen

### 2.3.1 Liquiditätsrestriktionen

Bei der Maximierung der Zufriedenheitsgrade muss als Nebenbedingung das finanzielle Gleichgewicht gewahrt bleiben. Für jede Periode muss dafür eine nicht vorzeichenbeschränkte fixe Variable  $b_t$  bekannt sein. Im Sinne eines festen Zahlungsüberschusses können über  $b_t$  bereits feststehende Zahlungen, wie etwa die vorgegebenen Ausschüttungen oder Einlagen, Zahlungen aus dem bereits laufendem Betrieb und der zu Beginn der ersten Periode gegebene Zahlungsmittelbestand erfasst werden. Als Liquiditätsrestriktionen lassen sich somit formulieren:<sup>76</sup>

$$\begin{aligned}
 - \sum_{j=1}^J x_j \cdot g_{jt} - \sum_{q=1}^Q y_q \cdot g_{qt} &\leq b_t && \text{für } t = 1, \dots, n - 1 \\
 - \sum_{j=1}^J x_j \cdot g_{jn} - \sum_{q=1}^Q y_q \cdot g_{qn} + G_n &\leq b_n
 \end{aligned}$$

Die Liquiditätsrestriktionen für die Perioden 1 bis  $n - 1$  gewährleisten, dass die Summe aus den Ein- und Auszahlungsüberschüssen aller Objekte den für jede Periode gegebenen Zahlungsüberschuss  $b_t$  nicht übersteigen. Dabei gibt die Variable  $x_j / y_q$

<sup>72</sup> Vgl. Adam, D. (2000), S. 37.

<sup>73</sup> Bereits Hax, H. (1964), S. 437 f hat auf die Notwendigkeit eines begrenzten Zeitraums für praktische Planungen hingewiesen.

<sup>74</sup> Vgl. Hax, H. (1964), S. 438.

<sup>75</sup> Vgl. Adam, D. (2000), S. 40.

<sup>76</sup> Vgl. Hering, T. (2008), S. 143 f.

an, wie oft das Investitionsobjekt  $j$ / das Finanzierungsobjekt  $q$  durchgeführt wird. Die Variable  $g_{jt}/ g_{qt}$  steht für den Einzahlungsüberschuss, den das Investitionsobjekt  $j$ / Finanzierungsobjekt  $q$  in der Periode  $t$  verursacht. Es gibt 1 bis  $J$  Investitionsobjekte und 1 bis  $Q$  Finanzierungsobjekte, wobei die Mengen  $J$  und  $Q$  endlich sind.

Bei der Liquiditätsrestriktion in der letzten Periode ( $t = n$ ) wird zusätzlich gefordert, dass der gegebene Kassenbestand auch für die Deckung der Schlussentnahme  $G_n$  ausreicht.

Da in der Zielfunktion nicht die Maximierung der Schlussentnahme gefordert wird, sondern die Maximierung des Zufriedenheitsgrades bezüglich der Schlussentnahme ergibt sich eine weitere Nebenbedingung:

$$(G_n^{OG} - G_n^{UG}) \cdot \lambda_{MZ} - G_n \leq -G_n^{UG}$$

Wird durch das Investitions- und Finanzierungsprogramm eine Schlussentnahme erzielt, die größer oder gleich der Obergrenze  $G_n^{OG}$  ist, so nimmt der Zufriedenheitsgrad  $\lambda_{MZ}$  seinen maximalen Wert von eins an. Sinkt die Schlussentnahme bis zur Untergrenze  $G_n^{UG}$ , so ergibt sich für  $\lambda_{MZ}$  ein Wert von null.

### 2.3.2 Umweltrestriktionen

Über die Umweltrestriktionen wird zum einen sichergestellt, dass die gesetzlichen Höchstgrenzen für Umweltbelastungen eingehalten werden, zum anderen bestimmen sie welches Ausmaß die Zufriedenheitsgrade bei einem bestimmten Investitions- und Finanzierungsprogramm maximal annehmen können. Die Umweltrestriktionen lauten:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^J x_j \cdot e_{jtk} + (b_{tk} - b_{tk}^{UG}) \cdot \lambda_{tk} &\leq b_{tk} && \text{für } t = 1, \dots, n \\ \cdot &&& \\ \cdot \quad \text{für } k = 1, \dots, K - 1 &&& \\ \cdot &&& \\ \sum_{j=1}^J x_j \cdot e_{jtk} + (b_{tk} - b_{tk}^{UG}) \cdot \lambda_{tk} &\leq b_{tk} && \text{für } t = 1, \dots, n \end{aligned}$$

Sobald die Summe der Umweltbelastungen der Investitionsobjekte die Obergrenze  $b_{tk}$  erreicht, muss der Zufriedenheitsgrad  $\lambda_{tk}$  null sein, damit die Umweltrestriktion nicht verletzt wird. Sinken die Umweltbelastungen auf einen Wert, der kleiner oder

gleich der Untergrenze  $b_{tk}^{UG}$  ist, so nimmt der Zufriedenheitsgrad seinen maximalen Wert von eins an. Insgesamt werden  $n \cdot K$  Umweltrestriktionen benötigt.

### 2.3.3 weitere Nebenbedingung

Es bietet sich an, die Summe aller Gewichtungsfaktoren auf eins bzw. 100 Prozent zu begrenzen. Der Entscheidungsträger muss eins bzw. 100 Prozent auf die  $K + 1$  Gewichtungsfaktoren aufteilen. Es bleibt jedem Entscheidungsträger überlassen, ob er die Umweltschutzziele und das monetäre Ziel gleich gewichtet oder ein Ziel bevorzugt verfolgen möchte. Als Nebenbedingung ergibt sich:

$$\alpha + \sum_{k=1}^K \beta_k = 1$$

Damit auch bei extremen Präferenzen des Entscheidungsträgers zumindest der Fortbestand des Unternehmens über den Planungshorizont hinaus und die Einhaltung der gesetzlichen Höchstgrenzen für Umweltbelastung sichergestellt sind, müssen für die Zufriedenheitsgrade Nichtnegativitätsbedingungen eingeführt werden.<sup>77</sup>

$$0 \leq \lambda_{MZ} \leq 1$$

$$0 \leq \lambda_{tk} \leq 1 \quad \text{für } t = 1, \dots, n$$

.

$$\cdot \quad \text{für } k = 1, \dots, K - 1$$

.

$$0 \leq \lambda_{tK} \leq 1 \quad \text{für } t = 1, \dots, n$$

Für die Investitions- und Finanzierungsobjekte sind weitere Nebenbedingungen erforderlich, um abzubilden, dass das Ausmaß in dem einzelne Objekte getätigt werden können, beschränkt sein kann. Außerdem dürfen die Variablen nur nichtnegative Werte annehmen, um ökonomisch unsinnige Lösungen zu verhindern. Diese Forderungen können in jeweils einer Nebenbedingung für jedes Objekt zusammengefasst werden.<sup>78</sup>

$$0 \leq x_j \leq X_j \quad \text{für } j = 1, \dots, J$$

<sup>77</sup> So ist beispielsweise bei einem  $\alpha$  von eins die Einhaltung der gesetzlichen Höchstgrenzen für Umweltschäden nicht sichergestellt. Natürlich würde ein Entscheidungsträger mit einer solchen Präferenz überhaupt gar nicht auf die Idee kommen den entwickelten Ansatz anzuwenden. Da aber auch bei weniger extremen Präferenzen Fälle auftreten können in denen einer der Zufriedenheitsgrade im Optimum negativ wird, ist eine Formulierung von Nichtnegativitätsbedingungen notwendig.

<sup>78</sup> Vgl. Hax, H. (1964), S. 439.

$$0 \leq y_q \leq Y_q \quad \text{für } q = 1, \dots, Q$$

## 2.4 Kritische Würdigung

Ein wesentlicher Vorteil des Modells (Gesamtdarstellung in Anhang 3) ist, dass das Konzept der Monetarisierung vermieden wird. Die Monetarisierung von Umweltgrößen hat konzeptionelle und praktische Schwächen. Außerdem würde sich dadurch die Nachvollziehbarkeit der Investitions- und Finanzierungsentscheidung für die Investoren verschlechtern, weil die monetäre Bewertung erhebliche Ermessensspielräume für die Entscheidungsträger in den Unternehmen eröffnet. Allein die Entscheidung darüber, ob die Monetarisierung über das Zahlungsbereitschaftskonzept oder über die Internalisierung von Umweltkosten erfolgen soll, wird in der Regel zu unterschiedlichen Werten für die Umweltgrößen führen.

Des Weiteren ist die Verwendung von Wechselkursen zwischen den verschiedenen Umweltbereichen nicht erforderlich. Auch hier können konzeptionelle und praktische Probleme des Ansatzes, sowie der damit einhergehende Verlust an Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Investitions- und Finanzierungsentscheidung vermieden werden.

Ein weiterer Vorzug des Ansatzes ist, dass die gleichberechtigte Verfolgung des monetären Ziels und der Umweltschutzziele abgebildet werden kann. Darüber hinaus kann der Entscheidungsträger bei Verwendung von Gewichtungsfaktoren seine Präferenzen bezüglich der Verfolgung einzelner Ziele differenziert formulieren. Dadurch können die Forderungen der ethischen Investoren nach mehr Umweltschutz abgebildet werden. Außerdem kann der Entscheidungsträger je nach Machtstellung der ethischen Investoren im Vergleich zu anderen Interessengruppen die Gewichtungsfaktoren für die Umweltschutzziele unterschiedlich wählen.

Solange die Gewichtungsfaktoren sowie alle Ober- und Untergrenzen angegeben werden, ist das optimale Investitions- und Finanzierungsprogramm für die Investoren transparent und nachvollziehbar. Dies ist unbedingt erforderlich, weil die genannten Größen einen erheblichen Einfluss auf die Modellergebnisse haben. Ohne die Bekanntmachung der Größen könnten die Entscheidungsträger das optimale Investitions- und Finanzierungsprogramm unbemerkt nach ihren Interessen gestalten.

Im Gegensatz zur Nutzung von Minimum-Operatoren (Kapitel 2.2.2.2) besteht bei Gewichtungsfaktoren die Möglichkeit der Kompensation. Durch die Verwendung

von Gewichtungsfaktoren wird es möglich, dass der zu maximierende Gesamtzufriedenheitsgrad  $\lambda$  gesteigert werden kann, indem der Zufriedenheitsgrad bei einem Ziel geringfügig reduziert wird, dafür aber bei einem anderen Ziel der Zufriedenheitsgrad stärker steigt. Dies ist besonders für Erweiterungsinvestitionen von großer Bedeutung, weil damit regelmäßig ein Anstieg der Umweltbelastung verbunden ist. Liegt der Engpass der Flaschenhalsoptimierung im Bereich der Umweltschutzziele, werden Erweiterungsinvestitionen nicht in das optimale Investitionsprogramm aufgenommen, obwohl sie beim monetären Ziel zu erheblichen Verbesserungen des Zufriedenheitsgrades beitragen können. Bei Nutzung von Gewichtungsfaktoren hingegen werden Erweiterungsinvestitionen in das optimale Investitionsprogramm aufgenommen, falls der Verlust bei den Zufriedenheitsgraden im Umweltbereich durch den Anstieg des Zufriedenheitsgrades beim monetären Ziel überkompensiert wird, so dass der Gesamtzufriedenheitsgrad steigt.

In seiner Anwendung ist das Investitionsbewertungsmodell begrenzt, sofern für einen oder mehrere Umweltbereiche keine gesetzlichen Emissionshöchstgrenzen definiert sind. Da Umweltschonung erst bei Überschreiten dieser Höchstgrenzen positive Werte annimmt, ist die Wahl der Höchstgrenze für die Modellergebnisse von großer Bedeutung. Als Lösungsmöglichkeit bietet sich die heuristische Festlegung von  $b_{tk}$  durch den Entscheidungsträger an. Alternativ kann für Umweltbereiche, die nicht durch Auflagen bzw. gesetzliche Emissionshöchstgrenzen reguliert werden, sondern durch andere Instrumente der Umweltpolitik, wie zum Beispiel Umweltzertifikate oder Umweltsteuern, ein anderes Vorgehen genutzt werden: So kann die mit den zugewiesenen Umweltzertifikaten verbundene Menge an Emissionsrechten als Obergrenze  $b_{tk}$  dienen. Für Umweltsteuern kann der eingeräumte Freibetrag als alternative Obergrenze genutzt werden.

Der Hauptkritikpunkt des Investitionsbewertungsmodells besteht in der hohen Komplexität. Gerade bei Berücksichtigung vieler Perioden und vieler Umweltbereiche können sich Probleme mit der Praktikabilität des Modells ergeben.<sup>79</sup> Auch der mit

---

<sup>79</sup> Lineare Optimierungsprobleme werden mit dem Simplexalgorithmus gelöst. Zu den Problemen der Lösung von linearen Optimierungsaufgaben mit vielen Variablen und Nebenbedingungen vgl. Schröder, A. (1996), S. 242.

der Komplexität des Ansatzes einhergehende Informationsbedarf ist für die praktische Umsetzung des Modells kritisch zu sehen.<sup>80</sup>

Außerdem ist es für eine umweltschutzorientierte Investitionsbewertung nicht ausreichend, Umweltschutzziele ausschließlich im Bereich der Finanzwirtschaft zu formulieren. So ist die Investitionsbewertung unter Berücksichtigung von Umweltschutz nur möglich, wenn im Bereich Rechnungswesen die benötigten Informationen bereitgestellt werden, das heißt jedem Investitions- und Finanzierungsobjekt die von ihm verursachten Umweltbelastungen oder –entlastungen zugeordnet werden können. Dies erfordert ein umweltschutzorientiertes Rechnungswesen.<sup>81</sup> Zur Erfassung und Abbildung von Umweltwirkungen im betrieblichen Rechnungswesen gibt es in der Literatur etliche Vorschläge. Zu nennen sind hier in erster Linie die ökologische Buchhaltung und die Ökobilanz, sowie Erweiterungen der traditionellen Kosten- und Leistungsrechnung.<sup>82</sup>

Damit eine Investitionsbewertung unter Berücksichtigung von Umweltschutz als eigenständigem Ziel überhaupt sinnvoll ist, müssen Umweltschutzziele in weiteren Unternehmensbereichen wie etwa Beschaffung, Produktion und Absatz implementiert und umgesetzt werden. Es nützt nämlich nichts, wenn ausschließlich umweltfreundliche Investitionen getätigt werden, aber dann mit diesen Investitionen höchst umweltschädliche Einsatzmaterialien (Beschaffung) auf eine höchst umweltschädliche Art und Weise (Produktion) zu stark umweltschädigenden Produkten (Absatz) verarbeitet und verkauft werden. Diese Erkenntnis ist seit langem bekannt, sodass es eine Vielzahl von Autoren gibt, die beim betrieblichen Umweltschutz ein umfassendes und koordiniertes Vorgehen fordern.<sup>83</sup>

### 3 Beispiel

Im folgenden Kapitel soll die Funktionsweise des Modells anhand eines Beispiels verdeutlicht werden. Tabelle 1 zeigt die verschiedenen Investitions- und Finanzie-

---

<sup>80</sup> Soweit eine praktische Anwendung eines Modells unter (subjektiver) Sicherheit überhaupt vorstellbar ist. Vgl. zu diesem Thema auch Hax, H. (1964), S. 431 oder Hering, T. (2008), S. 133 f. Beide Autoren weisen auf die Bedeutung eines Modells unter der Annahme (subjektiver) Sicherheit als "Vorreiter" für realitätsnähere Modelle hin.

<sup>81</sup> Vgl. Schreiner, M. (1992), S. 470.

<sup>82</sup> Für eine ausführliche Beschreibung des Konzepts der Öko-Bilanz siehe Hallay, H. (1989), S. 30 ff. Zur ökologischen Buchhaltung siehe Müller-Wenk, R. (1978), S. 35 ff. Zur Erweiterung der traditionellen Kosten- und Leistungsrechnung siehe Schreiner, M. (1992), S. 479 f.

<sup>83</sup> Vgl. Rohe, E. (1990), S. 63 und Wagner, G. R. (1997), S. 20.

rungsobjekte mit ihren Zahlungsreihen in Geldeinheiten (GE) und Umweltauswirkungen in Emissionseinheiten (EE). Außerdem ist angegeben, in welchem Ausmaß die Objekte durchgeführt werden können. Die Objekte mit den runden Klammern sind die fünf Investitionsobjekte, die Objekte mit den eckigen Klammern stellen die sechs Finanzierungsobjekte dar.

Objekt	Zahlung in t=1	Zahlung in t=2	Zahlung in t=n=3	Umwelt-schaden	Aktivitäts-obergrenze
(1)	-896	1040	75	10	1
(2)	-1000	40	1125	20	1
(3)	0	-960	1100	10	1
(4)	0	-40	45	20	1
(5)	0	-1000	1100	10	1
[6]	1000	-1040	0	0	1
[7]	1000	-1080	0	0	1
[8]	1000	-1140	0	0	1,5
[9]	0	1000	-1040	0	1
[10]	0	1000	-1080	0	1
[11]	0	1000	-1140	0	1,5

Tabelle 1: Übersicht der Investitions- und Finanzierungsobjekte im Beispiel.<sup>84</sup>

Mit den Werten aus Tabelle 1 kann das Investitionsbewertungsmodell im Simplex-tableau wie folgt dargestellt werden:

Zielfunktion															Eingabe:	
C <sub>j</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>		
Max	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	
	≥ 0	≥ 0	≥ 0	≥ 0	≥ 0	≥ 0	≥ 0	≥ 0	≥ 0	≥ 0	≥ 0	≥ 0	≥ 0	≥ 0	≥ 0	
Nebenbedingungen															Eingabe:	
A <sub>ij</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>	< = >	B <sub>i</sub>
1.	896	1000	0	0	0	-1000	-1000	-1000	0	0	0	0	0	0	≤	0
2.	-1040	-40	960	40	1000	1040	1080	1140	-1000	-1000	-1000	0	0	0	≤	0
3.	-75	-1125	-1100	-45	-1100	0	0	0	1040	1080	1140	1	0	0	≤	0
4.	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	≤	1
5.	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	≤	1
6.	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	≤	1
7.	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	≤	1
8.	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	≤	1
9.	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	≤	1
10.	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	≤	1
11.	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	≤	1,5
12.	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	≤	1
13.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	≤	1
14.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	≤	1,5
15.	10	20	10	20	10	0	0	0	0	0	0	0	80	0	≤	80
16.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	400	≤	-100

Tabelle 2: Zielfunktion und Nebenbedingungen im Simplextableau

<sup>84</sup> In Anlehnung an das Beispiel in Bitz, M. et al (2009), S.93.

Für die Gewichtungsfaktoren  $\alpha$  und  $\beta$  wurden jeweils Werte von 0,5 bzw. 50 Prozent gewählt. Die gesetzliche Emissionshöchstgrenze beträgt im Beispiel 80 EE. Der erforderliche Vermögensendwert, der benötigt wird damit das Unternehmen über den Planungshorizont hinaus fortbestehen kann, ist mit 100 GE angegeben. Die Untergrenze für die Zugehörigkeitsfunktion des Umweltschutzziels beträgt null EE. Die Obergrenze für die Zugehörigkeitsfunktion des monetären Ziels beträgt 500 GE. Der Wert von 400 GE in der letzten Zeile des Tableaus ergibt sich aus der Differenz der Ober- und der Untergrenze.

Die Lösung dieser Optimierungsaufgabe wird mit Hilfe des Simplexalgorithmus entwickelt. Sie ist in Tabelle 3 wiedergegeben.

Variable	Ergebnis
$X_1$	1
$X_2$	0
$X_3$	1
$X_4$	0
$X_5$	0.14816
$X_6$	0.896
$X_7$	0
$X_8$	0
$X_9$	1
$X_{10}$	0
$X_{11}$	0
$X_{12}$	297.976
$X_{13}$	0.73148
$X_{14}$	0.49494

Tabelle 3: Lösung der Optimierungsaufgabe des Beispiels

Das optimale Investitions- und Finanzierungsprogramm beinhaltet die Investitionsobjekte 1 und 3 und das Finanzierungsobjekt 9 im maximalen Umfang. Das Investitionsobjekt 5 und das Finanzierungsobjekt 6 werden anteilig durchgeführt. Solche Objekte werden als Grenzobjekte bezeichnet. Der Zufriedenheitsgrad beträgt 73,148 Prozent bezüglich des Umweltschutzziels und 49,494 Prozent bezüglich des monetären Ziels. Der Gesamtzufriedenheitsgrad ergibt sich als gewichtetes Mittel aus den beiden vorherigen und beträgt 61,321 Prozent. Die Schlussentnahme beträgt 297,976 GE. Die Höhe des Umweltschutzes lässt sich aus der Umweltrestriktion und dem Zufriedenheitsgrad für das Umweltschutzziel errechnen. Es wird Umweltschutz in

Höhe von 58,5184 EE erzielt. Als Preis für die Kompromisslösung, das heißt für die gleichzeitige Verfolgung des Umweltschutzziels und des monetären Ziels, entsteht beim Umweltschutzziel ein Verlust von 21,4816 EE (= 80-58,518) Umwelteinheiten und beim monetären Ziel ein Verlust von 202,024 GE (= 500-297,976) Geldeinheiten.

#### **4 Entwicklung eines Partialmodells**

Als größtes Problem wurde in Kapitel 2.4 die Komplexität des Modells ermittelt. Um die Komplexität auf ein beherrschbares Maß zu reduzieren, wird in der Praxis für Investitions- und Finanzierungsentscheidungen auf Partialmodelle zurückgegriffen. Dieser Schritt soll im Folgenden für das oben beschriebene Modell durchgeführt werden.

Wie im Modell von Hax zur simultanen Investitions- und Finanzplanung (ohne Berücksichtigung von Umweltschutz) ergeben sich aus dem Totalmodell Lenkpreise, die erst die Lösung mittels Partialmodell ermöglichen. Die Lenkpreise resultieren aus der Lösung des Dualproblems. Das Dualproblem ist im Anhang A4 angegeben. Dabei wird jeder Nebenbedingung des primalen Problems eine Dualvariable zugeordnet. Das in Kapitel 3 dargestellte lineare Optimierungsprogramm hat  $n$  Liquiditätsrestriktionen,  $n \cdot K$  Umweltrestriktionen,  $J$  Restriktionen für die Aktivitätsbegrenzungen der Investitionsobjekte und  $Q$  Restriktionen für die Aktivitätsbegrenzungen der Finanzierungsobjekte sowie eine Nebenbedingung für den Mindestvermögensendwert. Den Liquiditätsrestriktionen sollen die Dualvariablen  $q_t$ , den Umweltrestriktionen die Dualvariablen  $q_{tk}$ , den Aktivitätsbegrenzungen für die Investitionsobjekte die Dualvariablen  $q_j$ , den Aktivitätsbegrenzungen für die Finanzierungsobjekte die Dualvariablen  $q_q$  und der Nebenbedingung für den Mindestvermögensendwert die Dualvariable  $q_{MZ}$  zugeordnet werden.

Die Optimalwerte der Dualvariablen sind als Lenkpreise zu interpretieren, mit denen über Einzelentscheidungen auf Basis eines Partialmodelles das gleiche Investitions- und Finanzierungsprogramm bestimmt werden kann, wie mit dem Totalmodell. Dafür wird zunächst für jedes der Investitions- und Finanzierungsobjekte die Zahlungsreihe mit den Lenkpreisen für die jeweilige Periode multipliziert und über alle Perioden aufaddiert. Anschließend wird für die Investitionsobjekte die Reihe der Umwelt-

größen mit den Lenkpreisen für die jeweilige Periode und den jeweiligen Umweltbereich multipliziert und über alle Perioden und Umweltbereiche aufaddiert. Diese beiden Werte werden zu einem Entscheidungswert addiert. Folgende Gleichung stellt die Ermittlung des Entscheidungswertes für Investitionsobjekte dar:

$$EW_j = \sum_{t=1}^n g_{jt} \cdot q_t + \sum_{t=1}^n \sum_{k=1}^K e_{jtk} \cdot q_{tk}$$

Die Gleichung für die Ermittlung des Entscheidungswertes der Finanzierungsobjekte ergibt sich wie folgt:

$$EW_q = \sum_{t=1}^n g_{qt} \cdot q_t$$

Auf der Basis dieses Entscheidungswertes kann für jedes der Investitions- und Finanzierungsobjekte entschieden werden, ob es durchgeführt werden soll oder nicht. Objekte mit einem positiven Entscheidungswert werden im maximal möglichen Umfang durchgeführt. Objekte mit einem negativen Entscheidungswert werden nicht getätigt. Hat ein Investitions- oder Finanzierungsobjekt einen Entscheidungswert von null wird es im Allgemeinen anteilig durchgeführt, das heißt die Aktivitätsobergrenze des Objektes wird nicht ausgeschöpft.<sup>85</sup> Der genaue Umfang dieser Grenzobjekte kann nicht auf Basis des Entscheidungswertes ermittelt werden. Daher muss der Umfang aller Grenzobjekte über ein simultanes Optimierungsprogramm bestimmt werden. Dabei ist der Umfang der Grenzobjekte so zu wählen, dass alle Liquiditäts- und Umweltrestriktionen erfüllt sind.

Insgesamt kann mit diesem Vorgehen für die meisten Investitions- und Finanzierungsobjekte eine projektindividuelle Entscheidung getroffen werden. Nur für die Ermittlung des optimalen Umfangs der Grenzobjekte wird das Lösen eines simultanen Programmes erforderlich. Die Komplexität dieses Programmes ist im Vergleich zum Totalmodell deutlich geringer, weil die Anzahl der Grenzobjekte höchstens so groß ist wie die Anzahl der Liquiditäts- und Umweltrestriktionen.<sup>86</sup>

Die Optimalwerte der Dualvariablen für das Beispiel aus Kapitel 3 lassen sich der untersten Zeile der Tabelle 4 entnehmen:

<sup>85</sup> Nur im Spezialfall der degenerierten Lösung kann ein Objekt mit einem Entscheidungswert von null nicht durchgeführt werden.

<sup>86</sup> Vgl. Franke, G./ Laux, H. (1968), S.746 f.

Basis	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	Y <sub>6</sub>	Y <sub>7</sub>	Y <sub>8</sub>	Y <sub>9</sub>	Y <sub>10</sub>	Y <sub>11</sub>	Y <sub>12</sub>	Y <sub>13</sub>	Y <sub>14</sub>	Y <sub>15</sub>	Y <sub>16</sub>
Y <sub>9</sub>	0,001	0	0	-0,896	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
X <sub>6</sub>	-0,001	0	0	0,896	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X <sub>12</sub>	1,144	1,1	1	193,976	0	44,00000	0	0	0	0	0	60	0	0	0	0
X <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y <sub>5</sub>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X <sub>5</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Y <sub>7</sub>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y <sub>8</sub>	-0,00104	-0,001	0	-0,10816	0	0,96	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	0
X <sub>14</sub>	0,00286	0,00275	0,0025	0,48494	0	0,11	0	0	0	0	0	0,15	0	0	0	0,0025
Y <sub>10</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Y <sub>11</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
X <sub>5</sub>	0,00104	0,001	0	0,10816	0	-0,96	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Y <sub>13</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Y <sub>14</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
X <sub>13</sub>	-0,00013	-0,00012	0	-0,13852	0	-0,005	0	0	0	0	0	-0,125	0	0	0,0125	0
X <sub>1</sub>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	0,001365	0,0013125	0,00125	0,17321	0	0,0525	0	0	0	0	0	0,0125	0	0	0,00625	0,00125

Tabelle 4: Optimalwerte der Dualvariablen im Beispiel

Die Optimalwerte für die Dualvariablen vom Typ  $q_t$  betragen 0,001365; 0,0013125 und 0,00125. Da es im Beispiel nur einen Umweltbereich gibt, der für eine Periode betrachtet wird, gibt es lediglich eine Dualvariable vom Typ  $q_{tk}$ . Der Optimalwert der Dualvariablen  $q_{11}$  beträgt 0,00625. Auf Basis dieser Lenkpreise lassen sich die Entscheidungswerte für die fünf Investitions- und die sechs Finanzierungsobjekte berechnen. Tabelle 5 gibt die Entscheidungswerte wieder:

Objekt	Entscheidungswerte
1	0,17321
2	-0,03125
3	0,05250
4	-0,12125
5	0,00000
6	0,00000
7	-0,05250
8	-0,13125
9	0,01250
10	-0,03750
11	-0,11250

Tabelle 5: Entscheidungswerte der Objekte im Beispiel

Die Entscheidungswerte der Investitionsobjekte 1 und 3 sowie des Finanzierungsobjektes 9 sind positiv. Sie werden daher im maximal möglichen Umfang durchgeführt. Die Entscheidungswerte der Investitionsobjekte 2 und 4 sowie der Finanzierungsobjekte 7,8,10 und 11 sind negativ. Diese Objekte sind nicht im optimalen Investitions- und Finanzierungsprogramm enthalten. Bis hierher stimmen die projektindividuellen Entscheidungen mittels Entscheidungswert mit der in Tabelle 3 dargestellten Lösung des Totalmodells überein.

Das Investitionsobjekt 5 und das Finanzierungsobjekt 6 haben einen Entscheidungswert von null. Der optimale Umfang dieser Grenzobjekte muss über einen simultanen Ansatz bestimmt werden, sodass die drei Liquiditätsrestriktionen und die Umweltrestriktion eingehalten werden.

$$896 \cdot 1 - 1000 \cdot x_6 = 0$$

$$-1040 \cdot 1 + 960 \cdot 1 + 1000 \cdot x_5 + 1040 \cdot x_6 - 1000 \cdot 1 = 0$$

$$-75 \cdot 1 - 1100 \cdot 1 - 1100 \cdot x_5 + 1040 \cdot 1 + x_{12} = 0$$

$$10 \cdot 1 + 10 \cdot 1 + 10 \cdot x_5 + 80 \cdot x_{13} = 80$$

Bereits die erste Liquiditätsrestriktion ergibt, dass  $x_6$  0,896 ergeben muss. Nach Einsetzen des Wertes von  $x_6$  in die zweite Liquiditätsrestriktion, ergibt sich ein Wert von 0,14816 für  $x_5$ . Aus der dritten Liquiditätsrestriktion lässt sich leicht der Wert für die Schlussentnahme  $x_{12}$  mit 297,976 GE ermitteln. Mittels der vierten Gleichung kann der Zufriedenheitsgrad für das Umweltschutzziel  $x_{13}$  bestimmt werden. Dieser beträgt 0,73148.

Wie an dem Beispiel deutlich wurde, kann die Lösung des Totalmodells auch mit einem Partialmodell auf Basis von Einzelentscheidungen generiert werden. Dafür werden allerdings Lenkpreise benötigt, die erst nach Lösung des Totalmodells bekannt sind. Die Lenkpreise stehen also erst dann zur Verfügung wenn sie nicht mehr benötigt werden. Dieser Sachverhalt ist als Dilemma der Lenkpreistheorie bekannt.<sup>87</sup>

Aus praktischer Sicht ist damit noch nicht viel gewonnen, wenn es zwar Lenkpreise gibt mit deren Hilfe das optimale Investitions- und Finanzierungsprogramm leicht bestimmt werden kann, diese aber im Voraus unbekannt sind. Eine Möglichkeit dieses Problem zu mildern, besteht in der Ableitung der Lenkpreise aus den Grenzobjekten. Es ist bekannt, dass sich die Lenkpreise aus den Grenzobjekten ergeben.<sup>88</sup> Gelingt es die Grenzobjekte im Vorfeld abzuschätzen, so werden dadurch auch die Lenkpreise bekannt.<sup>89</sup> Als Grenzobjekt kommen dabei häufig Geldanlagen und Geldaufnahmen in Betracht, die in sehr großem Umfang getätigt werden können.<sup>90</sup>

<sup>87</sup> Vgl. Hax, H. (1964), S. 441.

<sup>88</sup> Vgl. Franke, G./ Laux, H. (1968), S. 748.

<sup>89</sup> Vgl. Franke, G./ Laux, H. (1968), S. 748. Laut Franke, G./ Laux, H. (1968), S. 740 lassen sich die anzusetzenden Kalkulationszinssätze auch ohne Kenntnis des Totalmodells gut schätzen.

<sup>90</sup> Vgl. Hering, T. (2008); S. 228.

Die Ableitung der Lenkpreise aus Kenntnis der Grenzobjekte soll anhand des Beispiels verdeutlicht werden. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass der Entscheidungsträger die Grenzobjekte  $x_5$  und  $x_6$  kennt. Als erstes wird gezeigt, wie sich die Lenkpreise für die Umweltrestriktionen ermitteln lassen. Dazu dient folgende Nebenbedingung des dualen Tableaus (siehe Anhang A4):

$$(b_{tk} - b_{tk}^{UG}) \cdot q_{tk} \geq \beta_k$$

Gemäß Preistheorem muss eine Nebenbedingung des dualen Problems streng erfüllt sein, falls die zugehörige Variable des primalen Problems größer als null ist. Die zugehörige Variable des primalen Problems ist in diesem Fall  $\lambda_{tk}$ . Es kann regelmäßig davon ausgegangen werden, dass  $\lambda_{tk}$ , der Zufriedenheitsgrad bezüglich des Umweltschutzziels, einen Wert von größer null annimmt. Demnach muss die duale Restriktion streng erfüllt sein. Stellt man die duale Restriktion nach  $q_{tk}$  um und setzt die bekannten Werte für  $\beta$ ,  $b_{tk}^{UG}$  und  $b_{tk}$  ein, so ergibt sich folgende Gleichung:

$$q_{tk} = \frac{0,5}{(80 - 0)}$$

Der Lenkpreis  $q_{tk}$  beträgt somit 0,00625.

Die gleiche Vorgehensweise ist für die Ermittlung der Lenkpreise  $q_t$  erforderlich. Dabei ist für die Bestimmung des Lenkpreises  $q_n$  folgende Restriktion des dualen Programmes maßgeblich:

$$q_n - q_{MZ} \geq 0$$

Die korrespondierende primale Variable ist  $G_n$ . Diese muss zwangsweise einen positiven Wert annehmen, weil sonst die Forderung nach einem positiven Mindestvermögensendwert nicht erfüllt werden kann. Demnach muss die duale Nebenbedingung streng erfüllt sein. Der gesuchte Lenkpreis  $q_n$  entspricht dem Lenkpreis  $q_{MZ}$ . Der Lenkpreis  $q_{MZ}$  kann mit folgender Restriktion des dualen Problems ermittelt werden:

$$(G_n^{OG} - G_n^{UG}) \cdot q_{MZ} \geq \alpha$$

Wenn die korrespondierende primale Variable  $\lambda_{MZ}$  positiv ist, muss auch diese duale Restriktion streng erfüllt sein. Nach Einsetzen der bekannten Werte für  $\alpha$ ,  $G_n^{OG}$  und  $G_n^{UG}$  ergibt sich für den Lenkpreis  $q_{MZ}$  folgende Gleichung:

$$q_{MZ} = \frac{0,5}{(500 - 100)}$$

Damit ergibt sich für den Lenkpreis  $q_{MZ}$  ein Wert von 0,00125. Demnach ist auch  $q_n$  gleich 0,00125.

Für die Berechnung der Entscheidungswerte sind die Lenkpreise für die Liquiditätsrestriktionen  $q_t$  und die Lenkpreise für die Umweltrestriktionen  $q_{tk}$  erforderlich. Bisher wurden  $q_{tk}$  (im Beispiel  $q_{11}$ ) und  $q_n$  (im Beispiel  $q_3$ ) bestimmt. Somit fehlen lediglich  $q_1$  und  $q_2$  für die Berechnung der Entscheidungswerte. Diese lassen sich bei Kenntnis der Grenzobjekte leicht bestimmen. Da die Grenzobjekte einen Entscheidungswert von null haben, muss für das Investitionsobjekt  $x_5$  gelten:

$$-1000 \cdot q_2 + 1100 \cdot q_3 - 10 \cdot q_{11} = 0$$

Daraus ergibt sich, aufgrund der Kenntnis von  $q_3$  und  $q_{11}$ , für  $q_2$  ein Wert von 0,0013125

Für das Finanzierungsobjekt  $x_6$  muss gelten:

$$1000 \cdot q_1 - 1040 \cdot q_2 = 0$$

Nach Einsetzen von  $q_2$  und Umstellen, ergibt sich für den Lenkpreis  $q_1$  ein Wert von 0,001365.

Mit den so ermittelten Lenkpreisen lassen sich wieder die in Tabelle 5 angegebenen Entscheidungswerte berechnen. Daraus ergibt sich das gleiche optimale Investitions- und Finanzierungsprogramm wie oben. Gelingt es im Vorfeld die Grenzobjekte richtig zu schätzen, so kann die optimale Investitions- und Finanzierungsentscheidung mittels Partialmodell gelöst werden, so dass sich die Komplexität des Ansatzes erheblich verringert.

Des Weiteren ist festzuhalten, dass sich durch die Berücksichtigung von Umweltschutz als eigenständigem Ziel die Ermittlung der Lenkpreise nicht erschwert. Wie gezeigt, ergeben sich die Lenkpreise für die Umweltrestriktion aus den Variablen  $b_{tk}$ ,  $b_{tk}^{UG}$  und  $\beta_k$ . Diese Variablen sind modellexogen, das heißt sie stehen im Vorfeld der Investitions- und Finanzierungsentscheidung fest. Somit beschränkt sich die Herausforderung für die Nutzung des Partialmodelles auf das Ermitteln der Lenkpreise für die Liquiditätsrestriktionen. Diese Herausforderung ergibt sich aber auch für die

Bestimmung eines optimalen Investitions- und Finanzierungsprogrammes ohne Berücksichtigung von Umweltschutz als eigenständigem Ziel.

## 5 Erweiterungen des Modells

### 5.1 Ganzzahligkeitsprobleme

In Kapitel 2.1 wurden die Annahmen der beliebigen Teilbarkeit und der Abstraktion von Wahlproblemen und Abhängigkeiten zwischen den Objekten formuliert. Im Folgenden soll gezeigt werden, welche Veränderungen der Wegfall dieser Annahmen im Modell bewirkt. Die Erweiterung um Ganzzahligkeitsprobleme findet sich bereits bei Hax mit der Begründung, dass betriebliche Anlagen in der Regel unteilbar sind. Außerdem wird erwähnt, dass Wahlprobleme und Abhängigkeiten zwischen den Objekten in der Praxis häufig auftreten.<sup>91</sup>

Für sich gegenseitig ausschließende Investitionsobjekte mit den Variablen  $x_a, x_{a+1}, \dots, x_b$  lassen sich folgende Nebenbedingungen einführen:<sup>92</sup>

$$\sum_{j=a}^{j=b} x_j \leq 1$$

$$x_j \text{ ganzzahlig} \quad \text{für } j = a, a + 1, \dots, b$$

Hängt die Zahlungsreihe eines Investitionsobjektes davon ab, ob ein oder mehrere andere Investitionsobjekte durchgeführt werden, dann entspricht die Zahlungsreihe der gemeinsamen Durchführung der Investitionsobjekte nicht der Summe der einzelnen Zahlungsreihen. Für den Fall von zwei abhängigen Investitionsobjekten formulierte Hax folgende Nebenbedingungen:<sup>93</sup>

$$x_c + x_d + x_{cd} \leq 1$$

$$x_c, x_d, x_{cd} \text{ ganzzahlig}$$

Dabei werden die Variablen  $x_c$  und  $x_d$  mit der Zahlungsreihe verbunden, die entsteht wenn Investitionsobjekt c bzw. d allein durchgeführt wird. Der Variable  $x_{cd}$  wird die Zahlungsreihe zugeordnet, die bei gemeinsamer Durchführung der beiden Investitionsobjekte entsteht. Da in den Nebenbedingungen gefordert wird, dass die Summe

<sup>91</sup> Vgl. Hax, H. (1964), S. 442.

<sup>92</sup> Vgl. Hax, H. (1964), S. 442.

<sup>93</sup> Vgl. Hax, H. (1964), S. 442 f.

aller drei sich ausschließender Investitionsobjekte kleiner gleich eins sein muss und dass die Investitionsobjekte ganzzahlig sein müssen, kann nur eines der drei Projekte realisiert werden.<sup>94</sup>

Durch die Berücksichtigung von Umweltschutz als eigenständigem Ziel ergibt sich lediglich eine geringfügige Veränderung. Der von Hax beschriebene Fall der Abhängigkeit zwischen zwei Investitionsobjekten bezieht sich auf die Interdependenz der Zahlungsreihen der beiden Objekte. Bei Berücksichtigung von Umweltschutz muss die Betrachtung der Abhängigkeit zwischen den Investitionsobjekten auf die Interdependenz der mit den Investitionen verbundenen Umweltwirkungen erweitert werden. Die formale Darstellung ist dadurch nicht betroffen. Es kommt lediglich zu einer veränderten Interpretation der Variable  $x_{cd}$ . Die Variable  $x_{cd}$  stellt dann die Zahlungsreihe und die Reihe der Umweltgrößen dar, die sich ergeben wenn die Objekte  $x_c$  und  $x_d$  gemeinsam durchgeführt werden.

## 5.2 Zeitlich nicht abgeschlossene Modelle

Tritt der Fall ein, dass das Ende der Zahlungsreihe von Investitions- oder Finanzierungsobjekten nicht mit dem Planungshorizont übereinstimmt, stellt sich die Frage, wie mit den Zahlungen, die nach dem Planungshorizont anfallen, umgegangen werden soll. Auch diesem Problem hat sich Hax bereits angenommen. Er empfiehlt die Verwendung von Kapitalwerten für die Berücksichtigung von Zahlungen, die über den Planungshorizont hinaus anfallen.<sup>95</sup> Die Liquiditätsrestriktion in der letzten Periode stellt sich dadurch wie folgt dar:

$$-\sum_{j=1}^J x_j \cdot g_{jn} - \sum_{q=1}^Q y_q \cdot g_{qn} - \sum_{j=1}^J c_{jn} - \sum_{q=1}^Q v_{qn} + G_n \leq b_n$$

Wie der Index erkennen lässt, sind die Kapitalwerte  $c_{jn}$  bzw.  $v_{qn}$  auf den Planungshorizont  $n$  bezogen. Bei ihrer Berechnung werden die Ein- und Auszahlungen der Objekte, die in den Perioden nach Ende des Planungszeitraumes anfallen mit einem geschätzten Zinssatz diskontiert.<sup>96</sup> Das theoretisch kritische Schätzen des Kalkulationszinssatzes ist dabei eine Folge der Notwendigkeit einerseits den Planungszeitraum zu

<sup>94</sup> Vgl. Hax, H. (1964), S. 442 f.

<sup>95</sup> Vgl. Hax, H. (1964), S. 437.

<sup>96</sup> Hax, H. (1964), S. 438 schlägt dabei die Verwendung des internen Zinssatzes des günstigsten nicht mehr getätigten Investitionsobjektes vor.

begrenzen und andererseits auch Zahlungen von Objekten zu erfassen, die nach Ende des Planungszeitraumes erfolgen.<sup>97</sup>

Genau wie die Zahlungsreihen von Investitionsobjekten können auch Umweltwirkungen von Investitionsobjekten nach Ende des Planungszeitraumes anfallen. Werden diese Umweltwirkungen genau wie die Zahlungsreihen über Kapitalwerte berücksichtigt, ergeben sich folgende Umweltrestriktionen für die letzte Periode des Planungszeitraumes:

$$\sum_{j=1}^J x_j \cdot e_{jnk} + \sum_{j=1}^J c_{jnk} + (b_{nk} - b_{nk}^{UG}) \cdot \lambda_{nk} \leq b_{nk} \quad \text{für } k = 1, \dots, K$$

Die Variable  $c_{jnk}$  steht für den Kapitalwert der auf das Ende des Planungszeitraumes abgezinsten Umweltwirkungen (im Umweltbereich  $k$ ) von Investitionsobjekt  $j$ . Diese Bedingung muss für jeden der  $K$  Umweltbereiche erfüllt sein. Die Diskontierung von Umweltgrößen wird im Schrifttum zwar diskutiert, ist jedoch mit Problemen verbunden.<sup>98</sup> Diese Probleme müssen als Kompromiss für die Berücksichtigung von Umweltwirkungen, die nach dem Ende des Planungszeitraumes anfallen, in Kauf genommen werden.

## 6 Fazit

Der dargestellte Ansatz stellt eine Möglichkeit dar, mit der die Entscheidungsträger in den Unternehmen auf die zunehmenden Forderungen der Investoren nach der Berücksichtigung von Umweltschutz reagieren können. Dabei wird die Berücksichtigung von eigenständigen Umweltschutzziele möglich, ohne auf die Verfolgung monetärer Ziele verzichten zu müssen. Durch den Übergang von dem Totalmodell zu einem Partialmodell kann die Komplexität des Ansatzes auf ein beherrschbares Maß reduziert werden.

Aus Sicht der Investoren sind Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Investitions- und Finanzierungsentscheidung gewahrt, wenn die Gewichtungsfaktoren und die Ober- und Untergrenzen der Ziele bekannt gemacht werden. So wird über die Ge-

<sup>97</sup> Vgl. Hax, H. (1964), S. 438.

<sup>98</sup> Zur Problematik der Diskontierung von Umweltgrößen vgl. Rückle, D. (1989), S. 378 f. Zur Nutzung von sozialen Diskontraten bei der Diskontierung von Umweltschäden siehe Endres, A./ Holm-Müller, K. (1998), S. 134 ff

wichtungsfaktoren direkt ersichtlich, welche Bedeutung die Entscheidungsträger in den Unternehmen den Umweltschutzziele im Vergleich zu dem monetären Ziel beimessen.

Dennoch sind für die praktische Nutzung des Ansatzes weitere Überlegungen notwendig. Im Bereich Rechnungswesen müssen die Konzepte zur Erfassung von Umweltwirkungen so weiterentwickelt werden, dass eine Zuordnung der Umweltwirkungen auf die Investitionsobjekte möglich wird. Desweiteren sind Überlegungen nötig, die zeigen wie der Ansatz von dem Fall der Sicherheit bzw. dem Fall der Unsicherheit mit eindimensionalen Erwartungen auf den Fall der Unsicherheit mit mehrdimensionalen Erwartungen übertragen werden kann.

Der Nutzen dieser Arbeit kann in der Vorbereitung für praxistauglichere Modelle gesehen werden. Dabei diene folgender Gedanke von Hax als Leitsatz: „Untersuchungen, die die Investitionsentscheidung bei sicheren Erwartungen zum Gegenstand haben, sind [...] nicht völlig nutzlos und überflüssig. Die Lösung der theoretischen Probleme, die bei der Investitionsentscheidung bei sicheren Erwartungen auftauchen, ist Voraussetzung für die Entwicklung einer wirklichkeitsnäheren Theorie. Die Ergebnisse derartiger Untersuchungen sind daher in erster Linie von theoretischem Interesse; praktisch verwendbar sind sie nur mit erheblichen Einschränkungen.“<sup>99</sup>

---

<sup>99</sup> Hax, H. (1964), S. 432.

## Anhang

### A1 Berechnung der Obergrenze für das monetäre Ziel

$$\max. G_n$$

unter den Nebenbedingungen:

$$- \sum_{j=1}^J x_j \cdot g_{jt} - \sum_{q=1}^Q y_q \cdot g_{qt} \leq b_t \quad \text{für } t = 1, \dots, n-1$$

$$- \sum_{j=1}^J x_j \cdot g_{jn} - \sum_{q=1}^Q y_q \cdot g_{qn} + G_n \leq b_n$$

$$\sum_{j=1}^J x_j \cdot e_{jtk} \leq b_{tk} \quad \text{für } t = 1, \dots, n$$

.

$$\cdot \quad \text{für } k = 1, \dots, K-1$$

.

$$\sum_{j=1}^J x_j \cdot e_{jtK} \leq b_{tK} \quad \text{für } t = 1, \dots, n$$

$$0 \leq x_j \leq X_j \quad \text{für } j = 1, \dots, J$$

$$0 \leq y_q \leq Y_q \quad \text{für } q = 1, \dots, Q$$

Als Lösung dieses Optimierungsproblems ergibt sich die maximal mögliche Schlussentnahme. Diese dient als Obergrenze  $G_n^{\text{OG}}$  für das monetäre Ziel.

## A2 Berechnung der Untergrenzen für die Umweltschutzziele

$$\min. \sum_{t=1}^n USch_{tk^*}$$

unter den Nebenbedingungen:

$$- \sum_{j=1}^J x_j \cdot g_{jt} - \sum_{q=1}^Q y_q \cdot g_{qt} \leq b_t \quad \text{für } t = 1, \dots, n-1$$

$$- \sum_{j=1}^J x_j \cdot g_{jn} - \sum_{q=1}^Q y_q \cdot g_{qn} + G_n \leq b_n$$

$$G_n \geq G_n^{UG}$$

$$\sum_{j=1}^J x_j \cdot e_{jtk^*} - USch_{tk^*} \leq 0 \quad \text{für } t = 1, \dots, n$$

$$\sum_{j=1}^J x_j \cdot e_{jtk} \leq b_{tk} \quad \text{für } t = 1, \dots, n$$

·

$$\cdot \quad \text{für } k = 1, \dots, k^* - 1, k^* + 1, \dots, K - 1$$

·

$$\sum_{j=1}^J x_j \cdot e_{jtK} \leq b_{tK} \quad \text{für } t = 1, \dots, n$$

$$0 \leq x_j \leq X_j \quad \text{für } j = 1, \dots, J$$

$$0 \leq y_q \leq Y_q \quad \text{für } q = 1, \dots, Q$$

Die Variable  $USch_{tk^*}$  repräsentiert den Umweltschaden im Umweltbereich  $k^*$  und in der Periode  $t$ . In der Zielfunktion wird die Minimierung der über alle Perioden addierten Umweltschäden im Umweltbereich  $k^*$  gefordert. Als Ergebnis dieser Optimierungsaufgabe erhält man neben dem Zielfunktionswert die minimalen Umweltschäden in den einzelnen Perioden. Diese dienen dann als Untergrenzen der entsprechenden Zugehörigkeitsfunktionen  $b_{tk}^{UG}$ . Um für alle Umweltbereiche eine Untergrenze zu berechnen, muss für jeden der 1 bis  $K$  Umweltbereich ein solches lineares Optimierungsprogramm aufgestellt werden.

### A3 Gesamtdarstellung des Ansatzes

$$\max. \lambda; \lambda := \alpha \cdot \lambda_{MZ} + \sum_{t=1}^n \sum_{k=1}^K \lambda_{tk} \cdot \beta_k$$

unter den Nebenbedingungen:

$$- \sum_{j=1}^J x_j \cdot g_{jt} - \sum_{q=1}^Q y_q \cdot g_{qt} \leq b_t \quad \text{für } t = 1, \dots, n-1$$

$$- \sum_{j=1}^J x_j \cdot g_{jn} - \sum_{q=1}^Q y_q \cdot g_{qn} + G_n \leq b_n$$

$$(G_n^{OG} - G_n^{UG}) \cdot \lambda_{MZ} - G_n \leq -G_n^{UG}$$

$$\sum_{j=1}^J x_j \cdot e_{jtk} + (b_{tk} - b_{tk}^{UG}) \cdot \lambda_{tk} \leq b_{tk} \quad \text{für } t = 1, \dots, n$$

$$\cdot$$

$$\cdot \quad \text{für } k = 1, \dots, K-1$$

$$\cdot$$

$$\sum_{j=1}^J x_j \cdot e_{jtK} + (b_{tK} - b_{tK}^{UG}) \cdot \lambda_{tK} \leq b_{tK} \quad \text{für } t = 1, \dots, n$$

$$\alpha + \sum_{t=1}^n \sum_{k=1}^K \beta_{tk} = 1$$

$$0 \leq \lambda_{MZ} \leq 1$$

$$0 \leq \lambda_{tk} \leq 1 \quad \text{für } t = 1, \dots, n$$

$$\cdot$$

$$\cdot \quad \text{für } k = 1, \dots, K-1$$

$$\cdot$$

$$0 \leq \lambda_{tK} \leq 1 \quad \text{für } t = 1, \dots, n$$

$$0 \leq x_j \leq X_j \quad \text{für } j = 1, \dots, J$$

$$0 \leq y_q \leq Y_q \quad \text{für } q = 1, \dots, Q$$

#### A4 Dualproblem des Ansatzes

Das Dualproblem des in Kapitel 3 dargestellten Ansatzes lautet:

$$\begin{aligned} \min. \quad & \sum_{t=1}^n b_t \cdot q_t - G_n^{UG} \cdot q_{ZF} \\ & + \sum_{t=1}^n \sum_{k=1}^K b_{tk} \cdot q_{tk} + \sum_{j=1}^J X_j \cdot q_j + \sum_{q=1}^Q Y_q \cdot q_q \end{aligned}$$

unter den Nebenbedingungen:

$$- \sum_{j=1}^J g_{jt} \cdot q_t + \sum_{t=1}^n \sum_{k=1}^K e_{jtk} \cdot q_{tk} + q_j \geq 0 \quad \text{für } j = 1, \dots, J$$

$$- \sum_{t=1}^n g_{qt} \cdot q_t + q_q \geq 0 \quad \text{für } q = 1, \dots, Q$$

$$q_n - q_{MZ} \geq 0$$

$$(G_n^{OG} - G_n^{UG}) \cdot q_{MZ} \geq \alpha$$

$$(b_{tk} - b_{tk}^{UG}) \cdot q_{tk} \geq \beta_k \quad \text{für } t = 1, \dots, n$$

.

$$\cdot \quad \text{für } k = 1, \dots, K - 1$$

.

$$(b_{tK} - b_{tK}^{UG}) \cdot q_{tK} \geq \beta_K \quad \text{für } t = 1, \dots, n$$

$$0 \leq q_{MZ}$$

$$0 \leq q_t \quad \text{für } t = 1, \dots, n$$

$$0 \leq q_j \quad \text{für } j = 1, \dots, J$$

$$0 \leq q_q \quad \text{für } q = 1, \dots, Q$$

$$0 \leq q_{tk} \quad \text{für } t = 1, \dots, n$$

.

$$\cdot \quad \text{für } k = 1, \dots, K - 1$$

.

$$0 \leq q_{tK} \quad \text{für } t = 1, \dots, n$$

## **Literaturverzeichnis**

Adam, D. (2000), Investitionscontrolling, 3. Auflage, München.

Albach, H. (1962), Investition und Liquidität: Die Planung des optimalen Investitionsbudgets, Wiesbaden.

Altrogge, G. (1996), Investition, 4. Auflage, München.

Altrogge, G. (1998), Investition und Umwelt, in: Hansmann, K.-W. (Hrsg.): Umweltorientierte Betriebswirtschaftslehre: Eine Einführung, Wiesbaden, S. 271-311.

Bitz, M./ Ewert, J./ Terstege, U. (2009), Finanz- und bankwirtschaftliche Modelle; Kurseinheit 3: Investitionstheoretische Modelle, Fernuniversität in Hagen.

Braun, F. (1974): Rechenschaftslegung zur Umweltbelastung und zum Umweltschutz von Industrieunternehmen: Grundriß für Manager, Berater und Wirtschaftswissenschaftler, Berlin.

Dinkelbach, W./ Kleine, A. (1996), Elemente einer betriebswirtschaftlichen Entscheidungslehre, Berlin.

Endres, A./ Holm-Müller, K. (1998), Die Bewertung von Umweltschäden: Theorie und Praxis sozioökonomischer Verfahren, Stuttgart.

Endres, A. (2007), Umweltökonomie, 3. Auflage, Stuttgart.

European Sustainable Investment Forum (2010), European SRI Study 2010, [http://www.eurosif.org/images/stories/pdf/Research/Eurosif\\_2010\\_SRI\\_Study.pdf](http://www.eurosif.org/images/stories/pdf/Research/Eurosif_2010_SRI_Study.pdf), 20.7.2012.

Franke, G./ Laux, H. (1968), Die Ermittlung der Kalkulationszinsfüße für investitionstheoretische Partialmodelle, in: Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 20. Jg., S. 740-759.

Götze, U. (2008), Investitionsrechnung, 6. Auflage, Berlin.

Hallay, H. (1989), Die Ökobilanz: Ein betriebliches Informationssystem, in: Schriftenreihe des IÖW 27/89, Berlin.

- Hansmann, K.-W. (1998), Umweltorientierte Produktionsplanung und –steuerung, in: Hansmann, K.-W. (Hrsg.): Umweltorientierte Betriebswirtschaftslehre: Eine Einführung, Wiesbaden, S. 81-139.
- Hax, H. (1964), Investitions- und Finanzplanung mit Hilfe der linearen Programmierung, in: Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 16. Jg., S. 430-446.
- Heinkel, R./ Kraus, A./ Zechner, J. (2001), The Effect of Green Investment on Corporate Behavior, in: Journal of Financial and Quantitative Analysis, 36. Jg., S. 431-449.
- Hentze, J./ Heinecke, A./Kammel, A. (2001), Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Bern.
- Hering, T. (2008), Investitionstheorie, 3. Auflage, München.
- Jänicke, M./ Zieschank, R. (2004), Zielbildung und Indikatoren der Umweltpolitik, in: Wiggering, H./ Müller, F. (Hrsg.): Umweltziele und Indikatoren: Wissenschaftliche Anforderungen an ihre Festlegung und Fallbeispiele, Berlin, S. 39-62.
- Jung, H. (2010), Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, 12. Auflage, München.
- Klingelhöfer, H. E. (2006), Finanzwirtschaftliche Bewertung von Umweltschutzinvestitionen, Wiesbaden.
- Kloepfer, M. (2004), Umweltrecht, 3. Auflage, München.
- Lücke, W. (1955), Investitionsrechnung auf der Grundlage von Ausgaben oder Kosten?, in: Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 7. Jg., S. 310-324.
- Matschke, M. J./ Jaeckel, U. D./ Lemser, B. (1996), Betriebliche Umweltwirtschaft, Herne/Berlin.
- Müller-Christ, G. (2001), Umweltmanagement, München.
- Müller-Wenk, R. (1978), Die ökologische Buchhaltung: Ein Informations- und Steuerungsinstrument für umweltkonforme Unternehmenspolitik, Frankfurt.
- Raffee, H./ Förster, F./ Fritz, W. (1992), Umweltschutz im Zielsystem von Unternehmen, in: Steger, U. (Hrsg.): Handbuch des Umweltmanagements, München, S. 241-256.
- Rieper, B. (1992), Betriebswirtschaftliche Entscheidungsmodelle: Grundlagen, Berlin.

- Rohe, E. (1990), Unternehmensziel Umweltschutz vor dem Hintergrund internationaler Umweltpolitik, in: Seidel, E./ Strebel, H. (Hrsg.): Betriebliche Umweltökonomie: Reader zur ökologieorientierten Betriebswirtschaftslehre (1988-1991), Wiesbaden, S. 47-66.
- Rückle, D. (1989), Investitionskalküle für Umweltschutzinvestitionen, in: Seidel, E./ Strebel, H. (Hrsg.): Betriebliche Umweltökonomie: Reader zur ökologieorientierten Betriebswirtschaftslehre (1988-1991), Wiesbaden, S. 373-388.
- Rückle, D. (1992), Investition und Finanzierung, in: Steger, U. (Hrsg.): Handbuch des Umweltmanagements, München, S. 451-467.
- Schaltegger, S./ Sturm, A. (1992), Ökologieorientierte Entscheidungen in Unternehmen: Ökologisches Rechnungswesen statt Ökobilanzierung: Notwendigkeit, Kriterien, Konzepte, Bern.
- Schmidt, R. H./Terberger, E. (1997), Grundzüge der Investitions- und Finanzierungstheorie, 4. Auflage, Wiesbaden.
- Schreiner, M. (1992), Betriebliches Rechnungswesen bei umweltorientierter Unternehmensführung, in: Steger, U. (Hrsg.): Handbuch des Umweltmanagements, München, S. 469-485.
- Schröder, A. (1996), Investition und Finanzierung bei Umweltschutzprojekten: Entwicklung eines fünfstufigen erweiterten Wirtschaftlichkeitsanalysemodells (FEWA) zur Bewertung von Umweltschutzinvestitionen, Frankfurt am Main.
- Seelbach, H./ Dethloff, J. (1998), Theoretische Grundlagen umweltorientierter Produktion, in: Hansmann, K.-W. (Hrsg.): Umweltorientierte Betriebswirtschaftslehre: Eine Einführung, Wiesbaden, S. 23-76.
- Sieben, G./ Goetzke, W. (1976), Investitionskalküle unter Berücksichtigung pluralistischer Interessen, in: Betriebswirtschaftliche Forschung und Praxis, 28. Jg., Heft 1, S. 27-52.
- Siebert, H. (1978), Ökonomische Theorie der Umwelt, Tübingen.
- Stahlmann, V./ Clausen, J. (2000), Umweltleistung von Unternehmen, Wiesbaden.
- Strebel, H. (1980), Umwelt und Betriebswirtschaft: Die natürliche Umwelt als Gegenstand der Unternehmenspolitik, Berlin

- Thielemann, U. (1990), Die Unternehmung als ökologischer Akteur?, in: Freimann, J. (Hrsg.): Ökologische Herausforderung der Betriebswirtschaftslehre, Wiesbaden, S. 43-72.
- Tischler, K. (1996), Ökologische Betriebswirtschaftslehre, München.
- Vojdani, N./ Jehle, E./ Schröder, A. (1993), Fuzzy-Logik zur Entscheidungsunterstützung im Logistik- und Umweltmanagement, in: Betriebswirtschaftliche Forschung und Praxis, 45. Jg., Heft 3, S.287-305.
- Wagner, G. R. (1997), Betriebswirtschaftliche Umweltökonomie, Stuttgart.
- Weingartner, H. M. (1963), Mathematical Programming and the Analysis of Capital Budgeting Problems, Englewood Cliffs.
- Wicke, L. (1993), Umweltökonomie, 4. Auflage, München.
- Wiggering, H./ Müller, F. (2004 a), Umweltziele und Indikatoren: Begriffe, Methoden, Aufgaben und Probleme, in: Wiggering, H./ Müller, F. (Hrsg.): Umweltziele und Indikatoren: Wissenschaftliche Anforderungen an ihre Festlegung und Fallbeispiele, Berlin, S. 3-16.
- Wiggering, H./ Müller, F. (2004 b), Umweltindikatoren als Maßstäbe zur Bewertung von Umweltzuständen und -entwicklungen, in: Wiggering, H./ Müller, F. (Hrsg.): Umweltziele und Indikatoren: Wissenschaftliche Anforderungen an ihre Festlegung und Fallbeispiele, Berlin, S. 121-128.
- Wöhe, G. (2010), Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, 24. Auflage, München.
- Wolf, J. (1988), Lineare Fuzzy-Modelle zur Unterstützung der Investitionsentscheidung, Frankfurt am Main.