

Hannes Krieg
Ökologisch-ökonomische Systemanalyse

FORSCHUNGSERGEBNISSE AUS DER BAUPHYSIK

BAND 28

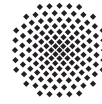
Herausgeber:
Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer
Prof. Dr. Philip Leistner
Prof. Dr. Schew-Ram Mehra



Universität Stuttgart
Lehrstuhl für Bauphysik



Technische Universität München
Lehrstuhl für Bauphysik



FORSCHUNGSERGEBNISSE AUS DER BAUPHYSIK

BAND 28

Herausgeber: Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

Prof. Dr. Philip Leistner

Prof. Dr. Schew-Ram Mehra

Hannes Krieg

Ökologisch-ökonomische Systemanalyse

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
Telefon 07 11 9 70-00
Telefax 07 11 9 70-33 95
E-Mail info@ibp.fraunhofer.de
URL www.ibp.fraunhofer.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISSN: 1869-5124

ISBN: 978-3-8396-1260-6

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2017

Druck: Mediendienstleistungen des
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2017

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 07 11 9 70-25 00
Telefax 07 11 9 70-25 08
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Ökologisch-ökonomische Systemanalyse

An der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Hannes Krieg
aus Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Schew-Ram Mehra
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Fritz Berner

Tag der mündlichen Prüfung: 10.07.2017

Institut für Akustik und Bauphysik
Universität Stuttgart
2017

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen meiner Tätigkeit in der Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung am Institut für Akustik und Bauphysik (ehemals Lehrstuhl für Bauphysik) der Universität Stuttgart erstellt.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Schew-Ram Mehra für die Betreuung der Arbeit und seine konstruktiven Anmerkungen und Fragen. Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Fritz Berner für die Übernahme des Mitberichts danken.

Meinen Kollegen aus der Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung möchte ich für viele intensive Diskussionen danken, die sehr zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Besonderer Dank geht dabei an Dr.-Ing. Stefan Albrecht, Dipl. oec. Michael Jäger, Dipl.-Ing. Matthias Fischer, Dipl.-Ing. (FH) M.Sc. Johannes Gantner sowie M.Sc. Rafael Horn.

Für viele Anmerkungen aus praktischer Sicht und die Unterstützung bei der Durchführung des Anwendungsbeispiels danke ich Herrn Ingo Woltmann von der Robinson Club GmbH sowie Herrn Dieter Semmelroth, vormals TUI AG.

Meinen Eltern Gabriele und Wolfgang Krieg möchte ich danken, dass sie mir die Möglichkeiten gegeben haben, diesen Weg zu gehen.

Für die Unterstützung während der Erstellung der Dissertation und viele aufmunternde Hinweise möchte ich Dr. rer. nat. Ralf Schweiggert und Raphael Joos danken.

Abschließend möchte ich mich noch besonders bei meiner Frau Danija bedanken, die mich bei der Erstellung der Arbeit immer unterstützt hat.

Hannes Krieg

Im Juli 2017

„Das wichtigste Mittel, um den richtigen Weg zu finden,
ist, die falschen zu vermeiden.“

[Manfred Rommel, ehemaliger Oberbürgermeister von Stuttgart]

Kurzfassung

Nachhaltige Konzepte zur Minimierung der ökologischen Auswirkungen betrieblicher Aktivitäten sind von zentraler Bedeutung für zahlreiche Unternehmen, insbesondere aufgrund verschärfter staatlicher Umweltauflagen sowie eines zunehmend stärker ausgeprägten Umwelt- und Nachhaltigkeitsbewusstseins vieler Verbraucher. Die Einbeziehung von ökologischen Aspekten in betriebliche Planungsprozesse erweist sich in der Praxis jedoch häufig als schwierig. Einer der Gründe hierfür ist die oft die mangelnde Verknüpfung von ökologischen und ökonomischen Aspekten.

Die im Rahmen dieser Dissertation entwickelte EcoPlex-Methode stellt durch die Verknüpfung produktbezogener ökologischer und ökonomischer Kennzahlen einen Bezug zu unternehmensbezogenen Umweltzielen her. Ziel der Methode ist die Analyse der von einem Unternehmen angebotenen Produkte oder Dienstleistungen im Hinblick auf ihre Ökoeffizienz. Abgeleitete ökologisch motivierte Verbesserungsmaßnahmen resultieren bei Umsetzung oftmals in ökonomischen Vorteilen für die entsprechenden Unternehmen.

Die vorgestellte EcoPlex-Methode baut methodisch auf bekannten Prinzipien der Ökobilanz auf und ist an diese anschlussfähig. Innovativ ist dabei die Berücksichtigung ökonomischer Aspekte, insbesondere des Deckungsbeitrags, sowie die Einbeziehung von Aspekten des betrieblichen Umweltmanagements. Aufgrund der ökonomisch und ökologisch ganzheitlichen Herangehensweise werden Sichtweisen und Anforderungen der Umweltabteilung, des Finanzcontrolling sowie der Unternehmensführung in der Methode zusammengeführt. Die im Rahmen der EcoPlex-Methode betrachteten Umweltwirkungskategorien der Produkte oder Dienstleistungen eines Unternehmens werden festgelegt und die Beiträge zu den Umweltwirkungen anhand einer Ökobilanz bestimmt. Parallel zur Berechnung der Umweltwirkungen werden die Deckungsbeiträge der entsprechenden Produkte oder Dienstleistungen zur ökonomischen Bewertung berechnet. Aus den Vorgaben des betrieblichen Umweltmanagements werden relevante Umweltziele abgeleitet und quantitative Obergrenzen festgelegt. Anschließend werden die ökologischen und ökonomischen Profile der Produkte oder Dienstleistungen in Gleichungen überführt, in Bezug zu den Umweltzielen

gesetzt und die Gleichungen mit Hilfe des Simplex-Algorithmus gelöst. Im Rahmen der Berechnung wird ein pareto-optimales Portfolio der Produkte oder Dienstleistungen des Unternehmens ermittelt. Dabei werden im Zuge einer Schwachstellenanalyse nicht ausreichend ökoeffiziente Produkte oder Dienstleistungen identifiziert, die Reduktionskosten für die Erreichung der Umweltziele berechnet und daraus ein Budget für die Umsetzung von Maßnahmen zur Reduzierung der Umweltwirkungen oder zur Steigerung der Deckungsbeiträge abgeleitet. Durch diese Maßnahmen soll das betriebliche Ergebnis unter Einhaltung der Umweltzielvorgaben verbessert werden. Ferner werden dabei die Schattenpreise knapper Umweltfaktoren berechnet, also die entgangenen Erlöse durch ungenutzte Absatzpotentiale. Diese monetäre Bewertung von Umweltfaktoren kann beispielsweise die Grundlage für interne Anreizprogramme sein. Basierend auf der Interpretation der Ergebnisse werden ausgewählte Maßnahmen im betrieblichen Gesamtkontext bewertet.

Die Anwendung der EcoPlex-Methode wird am Beispiel der Analyse von touristisch genutzten Resorts, also von Hotelanlagen mit erweitertem Freizeit-, Sport- und Gastronomieangebot, durchgeführt. Die durch die Deckung des Energiebedarfs verursachten Kosten und Umweltwirkungen von acht Resorts im tropischen und mediterranen Raum mit Ganzjahresbetrieb werden analysiert und in Bezug zum Deckungsbeitrag einer Übernachtung eines Gastes (Gastnacht) gestellt. Unter Anwendung der EcoPlex-Methode wurden diese Daten in einen ökonomischen Zusammenhang mit den Umweltzielen des Unternehmens gesetzt. Für die beiden Resorts mit zu geringer Ökoeffizienz sowie für das Resort mit den höchsten absoluten Umweltwirkungen werden anschließend technische Maßnahmen im Hinblick auf ihre Potentiale zur Reduzierung des Energieverbrauchs durch den Vergleich von erwartetem und aktuellem Energiebedarf beurteilt. Durch die Senkung des Energiebedarfs werden sowohl die Umweltwirkungen als auch die Energiekosten reduziert. Der ökonomische Effekt der Maßnahmen geht dabei über die reine Kostenreduktion hinaus. Durch die Reduzierung der Umweltwirkungen kann auch die Ausbringungsmenge unter Einhaltung der Restriktionen gesteigert werden, also ein höherer Absatz erzielt werden. Der kumulative Effekt der Maßnahmen resultiert daher in einem deutlich verbesserten betrieblichen Gesamtergebnis.

Durch die Betrachtung von Ökonomie und Ökologie leistet diese Arbeit einen Beitrag zur stärkeren Einbeziehung von ökologischen Aspekten in betriebliche Planungsprozesse. Die EcoPlex-Methode basiert auf einem Mischansatz und verbindet die bottom-up Betrachtung der Ökobilanz und der Deckungsbeitragsrechnung mit der top-down Sichtweise des betrieblichen Umweltmanagements. Die EcoPlex-Methode erlaubt die organisationsspezifische Monetarisierung von Umweltwirkungen, die Ermittlung von minimalen Reduktionskosten sowie die Identifikation von Produkten oder Dienstleistungen mit geringer Ökoeffizienz. Damit ist die EcoPlex-Methode eine innovative Weiterentwicklung bestehender Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung.

Abstract

As public concern for the environment has grown in recent years, industry has responded with increased emphasis on improved efficiency and environmental sustainability. For companies, sustainability is now widely considered a key strategic focus, fostered by ongoing public discussion and consumer awareness of environmental concerns. However, integrating sound environmental practices into organizational decision-making is challenging, in large part due to the present lack of standardized methods for balancing ecologic and economic variables.

The EcoPlex method developed in this thesis approaches this problem, establishing a link between product-specific environmental and economic factors with organizational and environmental targets. The main goal of this method is to allow for an analysis of a company's products or services, ultimately aiming at the optimization of their ecological and economic performance.

The EcoPlex method shares key elements with the widely accepted method of Life Cycle Assessment thus ensuring that the two methods are mutually compatible. Furthermore, economic aspects – more specifically the contribution margin – as well as features of organizational environmental management are of pivotal importance to the EcoPlex method. As a result, the needs of the environmental department can be combined with finance and corporate management. Representing the initial procedure, relevant environmental impacts of the product or services under assessment are quantified by carrying out an LCA. Subsequently, the economic aspects are defined and their relative contribution margin is calculated. Based on input from the environmental department, relevant environmental targets are identified and maximum levels are quantified. The ecological and economic profiles of the products or services are then transformed into mathematical equations. These equations are related to the quantitative environmental targets and solved using the simplex algorithm, in order to deduce a pareto-optimal portfolio of the company's products or services. This includes a weak point analysis identifying products or services with insufficient ecological efficiency. Furthermore, reduction costs for fulfilling the environmental targets are identified and used as a basis for deriving a budget for measures. These

measures aim at either reducing environmental impacts or increasing the contribution margin to improve the overall performance of the company while simultaneously meeting environmental targets. Finally, shadow prices for scarce environmental aspects are calculated to refer to expected monetary benefits from currently underutilized optimization potentials, providing e.g. the basis for internal incentive plans. Based on an economically and ecologically holistic interpretation of results, the selected measures are evaluated in the overall context of the company.

The applicability of the EcoPlex method is demonstrated in a case study on tourist resorts. The conducted analysis targets the cost and environmental impact of energy consumption from eight resorts in tropical and Mediterranean settings with year round operation. After linking the environmental impacts and contribution margin per guest per night with the defined environmental targets, an analysis using the EcoPlex method is carried out to provide in-depth insights into the ecological and economic performance of the resorts. After identifying the two resorts with an insufficient ecological efficiency as well as the resort with the highest absolute environmental impact, specific measures to reduce the energy consumption are derived and evaluated. Ultimately, by reducing the energy consumption, both environmental impacts and operating costs are reduced and overall performance is improved. Beyond the direct effect of reducing operating costs, the minimization of the respective environmental impacts leads to an increased output quantity, and thus an increased overall performance.

By combining ecological and economic aspects, this work contributes to an improved implementation of environmental aspects in organizational decision-making processes. The EcoPlex method is based on a hybrid approach, combining the bottom-up approach of Life Cycle Assessment and contribution margin accounting with the top-down approach of environmental management.

The EcoPlex method allows an organization-specific monetization of environmental impacts, an identification of minimum costs for reaching environmental targets, and an identification of products or services with insufficient ecological efficiency. Thereby, the method represents an innovative advancement of existing approaches for sustainability assessment.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	2
Kurzfassung	4
Abstract.....	7
Inhaltsverzeichnis	9
Glossar	17
1. Einführung	21
1.1 Motivation und Zielsetzung	22
1.2 Aufbau und methodische Vorgehensweise	24
2 Stand des Wissens	26
2.1 Grundlagen	26
2.1.1 Ökobilanzierung	27
2.1.2 Ökonomische Entscheidungsprozesse	29
2.1.3 Umweltmanagement	31
2.1.4 Simplex-Methode.....	33
2.2 Stand der Forschung.....	42
2.2.1 Bewirtschaftung von Gemeingütern	43
2.2.2 Internalisierung externer Effekte	46
2.2.3 Monetarisierung von Umweltwirkungen	47
2.2.4 Ökologische und soziale Lebenszykluskostenrechnung	49
2.2.5 Ökoeffizienzanalyse	51
2.3 Analyse des Stands des Wissens	52

3	Anforderungen an die zu entwickelnde Methode	56
3.1	Methodische Anforderungen	56
3.2	Praktische Anforderungen	57
4	Methodenentwicklung	58
4.1	Methodischer Ansatz – EcoPlex.....	58
4.1.1	Konzept.....	58
4.1.2	Untersuchungsrahmen	59
4.1.3	Strukturrahmen.....	60
4.1.4	Aufbau	61
4.2	Betrachtungsrahmen	65
4.2.1	Untersuchungsziel	66
4.2.2	Untersuchungsrahmen	66
4.2.3	Auswahl der Umweltwirkungskategorien.....	67
4.2.4	Auswahl ökonomischer Kenngrößen.....	68
4.3	Berechnung	69
4.3.1	Quantifizierung der Umweltwirkungen	70
4.3.2	Quantifizierung der ökonomischen Kenngrößen.....	71
4.3.3	Aufstellen der Zielfunktion	72
4.3.4	Festlegen der Restriktionen	73
4.3.5	Anwendung des Simplex-Algorithmus.....	75
4.4	Interpretation der Ergebnisse	76
4.4.1	Schwachstellenanalyse.....	77
4.4.2	Identifikation des Maßnahmenbudgets	78

4.4.3	Bestimmung der Schattenpreise.....	79
4.4.4	Ableitung von Maßnahmen.....	81
4.5	Optimierung	82
4.6	Wesentliche Erkenntnisse	85
5	Anwendung der Methode	87
5.1	Betrachtungsrahmen	89
5.2	Berechnung	93
5.3	Interpretation der Ergebnisse	104
5.4	Ableitung von Maßnahmen und Optimierung	106
6	Evaluierung der Methode	126
6.1	Methodische Anforderungen	126
6.2	Praktische Anforderungen	128
6.3	Möglichkeiten und Grenzen	128
7	Zusammenfassung	131
8	Ausblick	136
	Literaturverzeichnis	137
	Lebenslauf	147

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Beispielhaftes Simplex-Basistableau.....	36
Tabelle 2-2:	Angenommener Zeitbedarf für die Fertigung der Produkte P1, P2 und P ₃	37
Tabelle 2-3:	Simplex-Basistableau für das Rechenbeispiel.....	39
Tabelle 2-4:	Simplex-Tableau, erste Iteration für das Rechenbeispiel.....	40
Tabelle 2-5:	Simplex-Tableau, zweite Iteration für das Rechenbeispiel.....	41
Tabelle 2-6:	Klassifizierung von Güterarten in Anlehnung an [29].....	43
Tabelle 2-7:	Beurteilung bestehender Ansätze im Hinblick auf ihre Anwendungspotentiale bezüglich der gestellten Anforderungen.....	55
Tabelle 5-1:	Eingangsdaten in die Ökobilanz, je Gastnacht und Resort [79], [81].	94
Tabelle 5-2:	Eingangsdaten für die EcoPlex Berechnung, je Gastnacht, auf Basis von [78], [79], [81], [83].....	98
Tabelle 5-3:	Darstellung der Emissionen für das Basisjahr sowie der Zielwerte nach der Anwendung der Restriktionen, auf Basis von [78], [79].....	100
Tabelle 5-4:	Simplex-Ergebnistableau nach Durchführung der EcoPlex-Methode für das Anwendungsbeispiel.....	103
Tabelle 5-5:	Relative Umweltwirkungen und Energieverbrauch von Resort R ₂ , auf Basis von [79].....	108
Tabelle 5-6:	Relative Umweltwirkungen und Energieverbrauch von Resort R ₅ , auf Basis von [79].	109
Tabelle 5-7:	Relative Umweltwirkungen und Energieverbrauch von Resort R ₃ , auf Basis von [79].	110

Tabelle 5-8:	Eingangswerte der Simplex-Berechnung nach Austausch der Kälteanlage in Resort R ₂ , auf Basis von [79], [81], [82]. .	113
Tabelle 5-9:	Eingangswerte der Simplex-Berechnung nach Austausch der Kälteanlage in Resort R ₅ , auf Basis von [79], [80], [81]. .	116
Tabelle 5-10:	Eingangswerte der Simplex-Berechnung nach Einsatz von LED-Beleuchtung, Installation einer solarthermischen Anlage sowie Austausch der bisherigen Generatoren durch ein BHKW mit Absorptionskälteanlage in Resort R ₃ , auf Basis von [79], [81].	122

Bildverzeichnis

Bild 1-1:	Schematische Darstellung des Aufbaus der Arbeit.	24
Bild 2-1:	Rahmen und Bestandteile der Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 [25].	27
Bild 4-1:	Schematische Einordnung des methodischen Ansatzes.	59
Bild 4-2:	Schematische Darstellung des Strukturrahmens der Methode.	60
Bild 4-3:	Schematische Darstellung des Ablaufplans der EcoPlex-Methode.	62
Bild 4-4:	Schematischer Ablauf und Neuerungen der EcoPlex-Methode.	63
Bild 4-5:	Darstellung der an der Anwendung der EcoPlex-Methode beteiligten Unternehmensbereiche.	64
Bild 4-6:	Schematische Darstellung des Betrachtungsrahmens der Methode.	65
Bild 4-7:	Schematische Darstellung des Datenbedarfs und der mit der EcoPlex-Methode erzeugten Ergebnisse.	70

Bild 4-8:	Schematische Darstellung des Vorgehens bei der Ergebnisinterpretation.....	76
Bild 4-9:	Schematische Darstellung des Optimierungsschrittes im Rahmen der EcoPlex-Methode.....	83
Bild 5-1:	An der Analyse beteiligte Unternehmensbereiche, sowie deren Motivation und Ziele.....	88
Bild 5-2:	Betrachtungsrahmen des Fallbeispiels und für die beteiligten Akteure relevante Kenngrößen.....	89
Bild 5-3:	Darstellung der erhobenen Daten zur Berechnung der Eingangsgrößen des Fallbeispiels für die EcoPlex-Methode.....	93
Bild 5-4:	Ökobilanzmodell des Endenergiebedarfs je Gastnacht von Resort R ₅	96
Bild 5-5:	Vorgehen und beteiligte Akteure im Rahmen des Optimierungsschrittes.....	107

Abkürzungen

DALY	Behinderungsangepasste Lebensjahre (engl. Disability Adjusted Life Years)
BHKW	Blockheizkraftwerk
DB	Deckungsbeitrag
DIN	Deutsches Institut für Normung
DB _e	Energiekostenbelasteter Deckungsbeitrag
RHS	Ergebnisspalte der Simplex-Tableaus (engl. Right Hand Side)
EMAS	EU-Öko-Audit (engl. Eco-Management and Audit Scheme)
EN	Europäische Norm
EP	Eutrophierungspotential (engl. Eutrophication Potential)

EcoPlex	Ökologisch-ökonomische Systemanalyse auf Basis des Simplex-Algorithmus (engl. E cological and e conomic system analysis using the s implex algorithm)
ISO	International Standardization Organization
LCC	Lebenszykluskostenrechnung (engl. Life Cycle Costing)
LED	Leuchtdiode (engl. Light Emitting Diode)
PR	Öffentlichkeitsarbeit (engl. Public Relations)
LCA	Ökobilanz (engl. Life Cycle Assessment)
POCP	Photooxidantienbildungspotential (engl. Photochemical Ozone Creation Potential)
PDCA	Planung – Ausführung – Kontrolle – Optimierung (engl. Plan – Do – Check – Act)
LCI	Sachbilanz (engl. Life Cycle Inventory)
SETAC	Society for Environmental Toxicology and Chemistry
GWP	Treibhauspotential (engl. Global Warming Potential)
UNEP	United Nations Environment Programme
CSR	Unternehmerische Sozialverantwortung (engl. Corporate Social Responsibility)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
AP	Versauerungspotential (engl. Acidification Potential)
LCIA	Wirkungsabschätzung (engl. Life Cycle Impact Assessment)

Formelzeichen und Indices

t	Amortisationsdauer [Jahre]
n	Anzahl der Produkte [-]
m	Anzahl der Restriktionen [-]

a_i	Ausbringungsmenge von Produkt i [-]
DB_i	Deckungsbeitrag von Produkt i [€]
$k_{E,GN}$	Energiekosten je Gastnacht [€/Gastnacht]
DB_e	Energiekostenbelasteter Deckungsbeitrag [€/Gastnacht]
R_i	Erlös (engl. Revenue) von Produkt i [€]
DB_R	Gesamtdeckungsbeitrag mit Restriktionen (vor Maßnahme) [€]
DB_M	Gesamtdeckungsbeitrag nach Durchführung einer Maßnahme [€]
i	Indices zur Produktnummerierung [-]
j	Indices zur Restriktionsnummerierung [-]
ΔK_B	Jährliche Änderung der Betriebskosten [€/Jahr]
E_i	Kennzahl zur Beurteilung der Effizienz von Maßnahmen in Resort i [-]
$x_{i,j}$	Koeffizient der Restriktion j von Produkt i [-]
y_i	Koeffizient der Zielfunktion von Produkt i [-]
K_M	Kosten einer Maßnahme [€]
B_M	Maßnahmenbudget [€]
L_j	Obergrenze der Restriktion j [-]
Res_j	Restriktion j [-]
s_j	Schlupfvariablen für Restriktion j [-]
DB_U	Ursprünglicher Gesamtdeckungsbeitrag (ohne Restriktionen) [€]
$k_{v,i}$	Variable Kosten von Produkt i [€]
z	Zielfunktionswert [-]

Glossar

Amortisationsdauer	Gibt den Zeitraum an, nach dem sich eine Investition durch reduzierte Folgekosten aus ökonomischer Sicht rechnet. Eine kürzere Amortisationsdauer ist dabei zu bevorzugen [105].
Ausbringungsmenge	Die während einer Periode erstellte Produktmenge. Sie ist das mengenmäßige Ergebnis von betrieblichen Herstellprozessen. Wird auch als Output bezeichnet [107].
Cap-and-trade	Ausgestaltungsform eines Emissionshandelsystems. Es wird eine Obergrenze festgelegt („cap“) und für diese wird eine entsprechende Menge an Emissionszertifikaten ausgegeben. Diese Zertifikate werden dann von teilnehmenden Unternehmen untereinander gehandelt („trade“) [105].
DALY	Behinderungsangepasste Lebensjahre (engl. Disability Adjusted Life Years). Gibt den Verlust von behinderungsfreien Lebensjahren als Abweichung von der statistischen Lebenserwartung an [43].
EcoPlex	Methode zur ökologisch-ökonomischen Systemanalyse auf Basis des Simplex-Algorithmus (engl. E cological and e conomic system analysis using the s implex algorithm)
Energiekostenbelasteter Deckungsbeitrag	Bezeichnet die Differenz aus Erlösen abzüglich der Energiekosten.

EPD	Umweltproduktdeklaration (engl. Environmental Product Declaration). Umweltsiegel, das quantifizierte Umweltinformationen in einer standardisierten Form darstellt [24].
Gesamtdeckungsbeitrag	Die Summe aller Stückdeckungsbeiträge.
Greenwashing	Darstellung von Unternehmen oder Produkten als ökologische Alternativen ohne ausreichende Begründung.
Homo Oeconomicus	In den Wirtschaftswissenschaften verbreitete, grundsätzliche Annahme, dass Akteure Entscheidungen auf Basis rationaler Präferenzen treffen. Die rationale Entscheidungsfindung ist Grundvoraussetzung für das Funktionieren einer Vielzahl ökonomischer Entscheidungsmodelle [59].
Knappe Ressource	Ein in einem Prozess genutztes Mittel. Die Ressource kann materiell oder immateriell sein. Knapp bezieht sich hierbei auf die eingeschränkte Verfügbarkeit der Ressource. Der in dieser Arbeit verwendete Ausdruck der knappen Ressourcen bezieht sich auf Umweltmedien wie beispielsweise Luft, Wasser oder Boden. Die Ressourcen werden dabei als Senken für Umweltwirkungen genutzt. Durch die Festlegung von Umweltzielen in Form von Emissionsobergrenzen wird die für Unternehmen zulässige Emissionsmenge eingeschränkt und somit knapp. Die somit beschränkte Aufnahmekapazität von durch das Unternehmen verursachten Emissionen macht eine systematische Nutzung der verfügbaren Emissionskapazitäten nötig [96].

Maßnahmenbudget	Geldmenge, die zur Umsetzung von technischen Maßnahmen bereitgestellt wird. Wird in dieser Arbeit aus den internen Reduktionskosten abgeleitet.
Monetarisierung	Das Ausdrücken von Werten in Geldeinheiten [105].
Ökoeffizienz	Die Gegenüberstellung eines mittels Produkten oder Dienstleistungen erzeugtem Nutzen mit den verursachten Umweltwirkungen. Der Nutzen kann dabei auch monetärer Art sein [27].
Pareto-Optimum	Ein Zustand, in dem die Wohlfahrt eines Individuums nicht erhöht werden kann, ohne gleichzeitig die Wohlfahrt eines anderen Individuums zu reduzieren [105].
Pivotelement	Das zuerst von einem Algorithmus ausgewählte Element zur Durchführung von Berechnungen [42].
Produktionsprogrammplanung	Festlegung, welche Art und Menge an Produkten oder Dienstleistungen von einem Unternehmen in einer Planperiode hergestellt werden soll [105].
Referenzeinheit	Bezugsgröße für ökologische und ökonomische Werte. Gibt analog zur funktionellen Einheit bei der Ökobilanz den quantifizierten Nutzen eines Produktes oder einer Dienstleistung an [25].
Restriktion	Angelehnt an den volkswirtschaftlichen Begriff der Budgetrestriktion. Knappe Ressourcen sind nur in begrenztem Umfang verfügbar und führen so zu einer Einschränkung des maximal möglichen Outputs von Produkten und Dienstleistungen [105].

Right Hand Side (RHS)	Bezeichnet die Ergebnisspalte des Simplex-Tableaus.
Schattenpreis	Interner Wert von knappen Ressourcen. Der Schattenpreis quantifiziert entgangene Deckungsbeiträge nicht gewählter Handlungsalternativen (z.B. im Falle von Produktionsengpässen) [105].
Schlupfvariable	Begriff aus der Linearen Optimierung. Variable mit Wert ungleich Null einer Gleichung die zur Umformung von Ungleichungen in Gleichungen verwendet wird [106].
Strommix	Bezeichnet die prozentuale Zusammenstellung der Energieträger, aus denen elektrischer Strom erzeugt wird.
Stückdeckungsbeitrag	Die Differenz aus den Nettoerlösen und den Stückkosten eines Produktes oder einer Dienstleistung. Zentrale Größe der Produktionsprogrammplanung [105].
Stückerlös	Der durch den Verkauf eines Produktes oder einer Dienstleistung erzielte Erlös.
Stückkosten	Die durch die Herstellung oder Bereitstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung entstehenden Kosten.
Zielerreichungsbeitrag	Bezeichnet den Beitrag eines Produktes zum ökonomischen Unternehmenserfolg im Verhältnis zu den verursachten Umweltwirkungen und in Abhängigkeit der angewandten Restriktionen.

1 Einführung

Das Prinzip der Nachhaltigkeit zielt auf die Erhaltung von Ressourcen für zukünftiges Wirtschaften ab. Die zu Grunde liegende Idee reicht zurück ins 18. Jahrhundert und geht auf Hans Carl von Carlowitz zurück. Das Ziel war die dauerhafte Erhaltung von Waldflächen zur anhaltenden Sicherstellung der Holzversorgung. Holz wurde nicht nur als Baumaterial benötigt, sondern war auch wichtiger Energieträger zum Heizen und Kochen. Außerdem wurde Holz zum Befeuern der Schmelzöfen bei der Produktion von Metall verwendet. Eine ausreichende und nachhaltige Versorgung mit dem Energieträger Holz war somit Grundvoraussetzung für eine anhaltende industrielle Produktion [15]. Diese Idee des nachhaltigen Bewirtschaftens von natürlichen Ressourcen wurde 1972 vom Club of Rome aufgegriffen [67] und von der World Commission on Environment and Development, der sogenannten Brundlandt-Kommission, weiterentwickelt. Dabei werden die drei Säulen der Nachhaltigkeit – ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit – betrachtet. Das Ziel ist die gemeinsame Betrachtung von ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekten in der Entscheidungsfindung, um die Umwelt zu schützen und eine Gerechtigkeit zwischen den Generationen zu erreichen. Die nachhaltige Entwicklung „berücksichtigt die Bedürfnisse der jetzigen Generation, ohne die Möglichkeiten der nächsten Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen“ [46]. Die Erhaltung der natürlichen Umwelt ist somit kein Selbstzweck, sondern Voraussetzung für zukünftige Entwicklungen.

Im Rahmen der Analyse der ökologischen Nachhaltigkeit wurde die in Ziffer 2.1.1 dargestellte Methode der Ökobilanz (engl. Life Cycle Assessment, LCA) verwendet. Diese erlaubt die Quantifizierung der Umweltwirkungen von Produkten und Prozessen und ist in Wissenschaft und Praxis als ein Instrument zur Entscheidungsunterstützung etabliert. Analog wurden zur Beurteilung ökonomischer und sozialer Aspekte von Produkten und Prozessen entsprechende Ansätze entwickelt. Diese sind in Ziffer 2.2 beschrieben. Eine Herausforderung ist dabei die Zusammenführung der verschiedenen Dimensionen der Nachhaltigkeit. Durch die Betrachtung und Beachtung aller drei Nachhaltigkeitsdimensionen kann eine insgesamt nachhaltige Entwicklung erreicht werden. Die gemeinsame Analyse der verschiedenen Dimensionen ist jedoch methodisch herausfor-

dernd. Nach [98] wird die Systemanalyse als qualitative und quantitative Modellierung von komplexen Systemen, also von „Wirkungsketten, Rückkopplungen, Verzögerungen und Ambivalenzen von Aktivitäten und Maßnahmen sowie der Rollen verschiedener Akteure“, begriffen. Die vorliegende Arbeit kombiniert in hohem Detailgrad erstmals die ökologische mit einer ökonomischen Systemanalyse. Es werden ökologische und ökonomische Ziele und Kennzahlen von Umweltabteilung, Controlling und Unternehmensführung zusammengeführt.

1.1 Motivation und Zielsetzung

Nachhaltigkeit ist in vielen Unternehmen mittlerweile zu einem Aspekt von zentraler Bedeutung geworden. Dies zeigt sich in der stetig zunehmenden öffentlichen Diskussion von Umwelt- und Nachhaltigkeitsaspekten, in politischen Diskussionen und Maßnahmen zur nachhaltigen Entwicklung sowie Umweltschutzbemühungen von Betrieben. Der Grundgedanke ist dabei oftmals auch ökonomisch geprägt: Wenn Entwicklung und Wachstum nicht nachhaltig sind, kann dies negative Auswirkungen auf die zukünftige Leistungsfähigkeit von Betrieben, Regionen oder Ländern haben. Nachhaltigkeit ist ein Faktor für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit und wirtschaftlichen Wohlstand. Dennoch ist zu beobachten, dass häufig Diskussionen über die Sinnhaftigkeit von ökologisch nachhaltiger Entwicklung geführt werden, wenn diese in – kurzfristigen – wirtschaftlichen Einbußen resultiert. Ein Grund hierfür ist vielfach die mangelnde Verknüpfung von ökonomischen und ökologischen Nachhaltigkeitsaspekten. Um langfristig wirtschaftlich erfolgreich zu sein, muss die „Leistungsfähigkeit“ der Umwelt gegeben sein; andernfalls sind Einbußen bei Produktivität, Ressourcenverfügbarkeit, Gesundheit und Lebensqualität zu erwarten.

Die Ökobilanz ist die methodische Grundlage für die Quantifizierung der Umweltwirkungen von Produkten und Dienstleistungen. Auf Grund des Produkt- und Prozessbezugs der Ökobilanz wird die Methode hauptsächlich im operativen Bereich eingesetzt, vorrangig bei der Produktbewertung sowie der Produktentwicklung. Durch die aus Ökobilanzen gewonnenen Erkenntnisse können ökologische Treiber sowie Reduktionspotentiale identifiziert werden. Diese Möglichkeit wird von vielen Unternehmen genutzt [74]. Unternehmen, die Ökobilanzen verwenden, arbeiten oftmals innovativ oder sind in ihrem Bereich führend und stellen

sich der ökologischen und gesellschaftlichen Verantwortung des Unternehmens. Dies ist unter anderem ein Beleg dafür, dass die Ökobilanz Unternehmen strategische Vorteile verschaffen kann. Auch auf Seiten der Nachfrager besteht ein wachsendes Interesse an den ökologischen Auswirkungen von Produkten und Dienstleistungen, da potentielle Kunden zunehmend Informationen zu den Umweltwirkungen der Produkte von Unternehmen fordern. Dies zeigt sich unter anderem im Bausektor, wo Nachhaltigkeitszertifikate stetig auf dem Vormarsch sind, sowie im Automobilbereich, wo viele Hersteller detaillierte Informationen zu Umweltwirkungen von Herstellung, Nutzung und Lebensende ihrer Produkte anbieten. Hieraus resultiert eine steigende Nachfrage nach Ökobilanzen [53], [84]. Die Bereitstellung von produktbezogenen ökologischen Informationen kann zur Differenzierung und Schärfung des eigenen Unternehmensprofils in gesättigten Märkten dienen [68]. Analog zur Quantifizierung der Umweltwirkungen werden auch die ökonomischen Aspekte von Produkten und Dienstleistungen beurteilt. Dies kann beispielsweise durch die Berechnung des Deckungsbeitrags erfolgen. Dieser stellt Erlöse und Kosten gegenüber [109]. In der Praxis ist zu beobachten, dass Umweltmanagement und Nachhaltigkeit oft als Leitbild formuliert werden, die praktische Umsetzung von Maßnahmen jedoch diesem Anspruch nicht gerecht wird. Umweltziele werden oft nicht direkt in Planungsprozesse der operativen Tätigkeit eingebunden.

Die vorliegende Arbeit verknüpft ökonomische und ökologische Fragestellungen: Wie können Unternehmen vorgegebene Umweltziele optimiert erreichen, mit welchen Produkten, Prozessen oder Maßnahmen, und zu welchen Kosten?

Zur Beantwortung dieser Fragen wird eine Methode entwickelt, die die Analyse ökonomischer und ökologischer Faktoren in einem einheitlichen Betrachtungsrahmen ermöglicht. Das Ziel der Methode ist eine ökologisch-ökonomische Systemanalyse auf Basis des Simplex-Algorithmus (engl. **E**cological and **e**conomic system analysis using the **s**implex algorithm; EcoPlex).

Angewandt wird die Methode im Rahmen dieser Arbeit exemplarisch anhand von touristisch genutzten Resorts. Der Betrieb solcher Resorts stellt einen großen Kostenfaktor für Tourismusunternehmen dar, ist gleichzeitig aber auch Haupteinnahmequelle. Der laufende Betrieb von bestehenden Gebäuden hat großen Anteil an den Umweltwirkungen im Gebäudelebenszyklus. Im Tourismusbereich

kommt erschwerend hinzu, dass von den Kunden ein nachhaltiger Urlaub gewünscht wird, gleichzeitig jedoch eine große Preissensibilität vorliegt [89].

1.2 Aufbau und methodische Vorgehensweise

Der Aufbau der Arbeit ist in Bild 1-1 schematisch dargestellt.

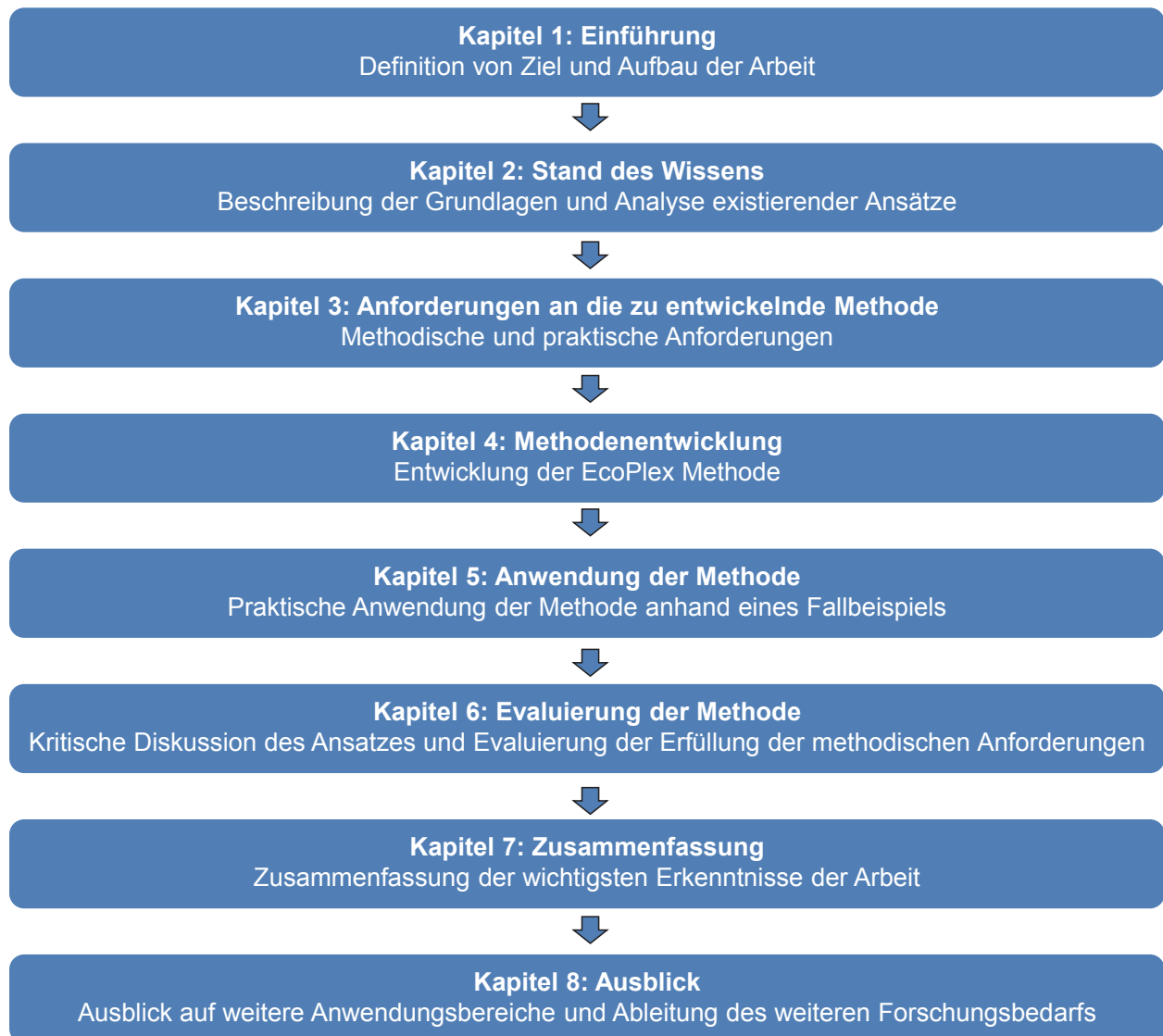


Bild 1-1: Schematische Darstellung des Aufbaus der Arbeit.

Auf die Beschreibung von Hintergrund, Ziel und Motivation in Ziffer 1 folgt in Ziffer 2 die Darstellung der zu Grunde liegenden Methoden sowie die Beurteilung des aktuellen Standes der Forschung in Bezug auf die Monetarisierung von

Umweltwirkungen und die ökologisch-ökonomische Systemanalyse. In Ziffer 3 werden die Anforderungen an die zu entwickelnde EcoPlex-Methode beschrieben. In Ziffer 4 wird die konsekutive Entwicklung der Methode unter Berücksichtigung der einzelnen Schritte im Detail dargestellt. In Ziffer 5 wird die Anwendung der entwickelten Methode am Beispiel von Touristenresorts durchgeführt und die erzielten Verbesserungen des betrieblichen Gesamtergebnisses quantifiziert. Im Rahmen von Ziffer 6 wird die Methode im Hinblick auf die methodischen und praktischen Anforderungen aus Ziffer 3 evaluiert. Durch die gewonnenen Erfahrungen aus der Anwendung werden Möglichkeiten und Grenzen der Methode aufgezeigt. Die Arbeit wird in Ziffer 7 zusammengefasst, in Ziffer 8 wird ein Ausblick über zukünftige Anwendungsfelder der Methode gegeben sowie der weitere Forschungsbedarf aufgezeigt.

2 Stand des Wissens

In diesem Kapitel werden die methodischen Grundlagen für die ökologisch-ökonomische Systemanalyse erarbeitet. Unter einem System werden im Rahmen dieser Arbeit Objekte, die durch ihre gegenseitigen Wechselbeziehungen von ihrer Umgebung abzugrenzen sind, verstanden. Insbesondere wird das Geflecht aus Organisation beziehungsweise Unternehmen, Wertschöpfungsketten, angebotenen Produkten, der Umwelt sowie des Marktes betrachtet. Dazu werden Methoden zur Quantifizierung von produktbezogenen ökonomischen und ökologischen Werten und Zielvorgaben sowie der Simplex-Algorithmus herangezogen. Weiterhin wird ein Überblick über bestehende Ansätze zur Beurteilung von Umweltwirkungen im betrieblichen Kontext gegeben und eine kritische Betrachtung durchgeführt.

Das Kapitel unterteilt sich in drei Abschnitte, die Beschreibung der Grundlagen, die Aufarbeitung des Stands der Forschung in Bezug auf die Beurteilung von Umweltwirkungen in betrieblichen Planungs- und Entscheidungsprozessen sowie die Analyse des Stands des Wissens.

2.1 Grundlagen

Die ökologisch-ökonomische Systemanalyse basiert auf verschiedenen methodischen Grundlagen, die hier in vier Abschnitte unterteilt werden:

- Methode der Ökobilanz zur Quantifizierung von Umweltwirkungen,
- Grundlagen ökonomischer Entscheidungsprozesse,
- Umweltmanagement und betriebliche Umweltziele, sowie
- Anwendung und Funktionsweise des Simplex-Algorithmus.

Diese vier Elemente stellen die maßgebliche methodische Basis der EcoPlex-Methode dar und werden im Folgenden beschrieben.

2.1.1 Ökobilanzierung

Die Ökobilanz (engl. Life Cycle Assessment, LCA) ist eine Methode zur Darstellung der Auswirkungen von Produkten, Prozessen oder Dienstleistungen auf die Umwelt. Sie basiert auf dem Lebenszyklusgedanken und betrachtet typischerweise den gesamten Lebensweg des Untersuchungsgegenstandes. Die Quantifizierung von Umweltwirkungen ist eine der grundlegenden Eingangsgrößen für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode und somit von zentraler Bedeutung.

Die Anforderungen an Ökobilanzen sind standardisiert und in den Normen DIN EN ISO 14040 [25] sowie DIN EN ISO 14044 [26] definiert. Grundsätzlich ist die Erstellung von Ökobilanzen in vier iterative Phasen unterteilt, wie in Bild 2-1 dargestellt.

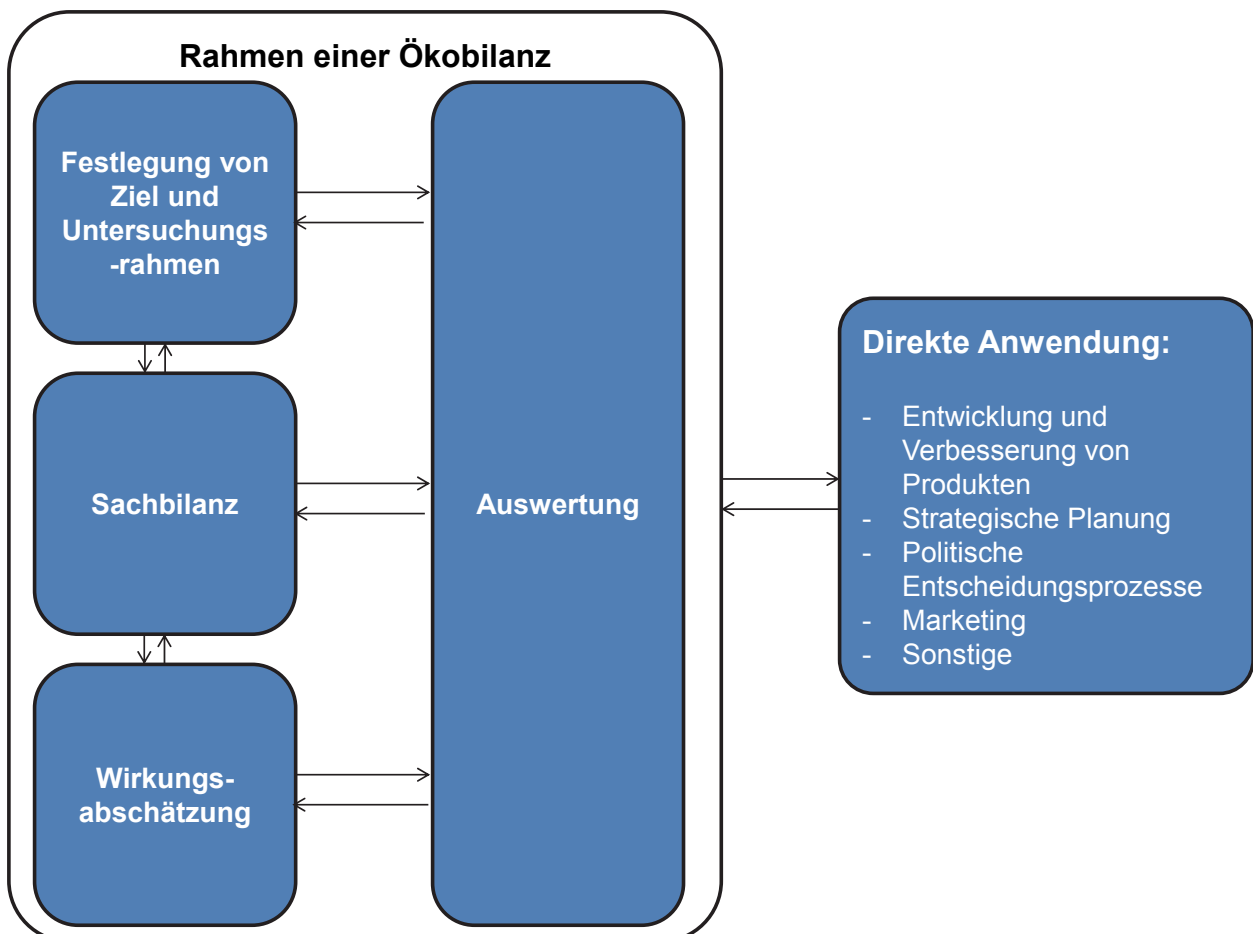


Bild 2-1: Rahmen und Bestandteile der Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 [25].

Zunächst erfolgt die Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen für die durchzuführende Ökobilanz. Dies beinhaltet die Definition der funktionellen Einheit, der Systemgrenzen sowie die Auswahl von Methoden zur Wirkungsabschätzung und Wirkungskategorien. Die Festlegung der funktionellen Einheit ist von zentraler Bedeutung, da sie Auswirkungen auf die gesamte Betrachtung hat. Sie stellt den quantifizierten Nutzen eines Produktes oder einer Dienstleistung dar. Es werden also nicht Produkte analysiert und bewertet, sondern der aus den Produkten gewonnene Nutzen [25]. Dazu werden zunächst Daten zu Material- und Energieflüssen gesammelt und auf dieser Basis ein Modell erstellt. Basierend auf diesem Modell wird die Sachbilanz berechnet, im vorliegenden Fall mit der Software GaBi und der dazugehörigen Datenbank [41].

Im Rahmen der Wirkungsabschätzung werden auf Basis der Sachbilanz die potentiellen Umweltwirkungen quantifiziert. Dazu werden einzelne Emissionen klassifiziert und charakterisiert. Die Klassifizierung beschreibt die Zuordnung von Emissionen zu definierten Wirkungskategorien, wie beispielsweise Treibhauspotential, Versauerungspotential, Photochemisches Oxidantien Bildungspotential oder Eutrophierungspotential.

Mittels Charakterisierungsfaktoren wird die Wirkung einzelner Emissionen in die jeweilige Referenzeinheit einzelner Wirkungskategorien übertragen. Meist wird zudem der Primärenergiebedarf ausgewiesen. Bei Letzterem handelt es sich im engeren Sinne nicht um eine Wirkungskategorie, sondern um einen Indikator, der den Verbrauch an fossilen und erneuerbaren Energieträgern abbildet. Die Auswertung der Wirkungsabschätzung umfasst die Identifikation von relevanten Einflussfaktoren wie technischen Parametern oder Lebenszyklusphasen, die Beurteilung von Vollständigkeit der erfassten Massen- und Energieströme sowie der verursachten Umweltwirkungen, Konsistenz und Sensitivität, die Beschreibung von Einschränkungen der Verwendung der Ergebnisse sowie die Ableitung von Handlungsempfehlungen. Weiterführende Informationen zum Vorgehen bei der Erstellung von Ökobilanzen sowie zu optionalen Aspekten wie der Durchführung einer unabhängigen kritischen Überprüfung der Studie sind in DIN EN ISO 14040 [25] und DIN EN ISO 14044 [26] sowie einer Vielzahl von Veröffentlichungen aufgeführt, auf die hier hingewiesen wird [1], [36], [37], [44], [47], [49], [50], [60], [62], [66], [86], [87], [88], 0 und [108].

Der Einsatz von Ökobilanzen in Unternehmen hat in den letzten Jahren stetig zugenommen. Ökologische Informationen werden verstärkt in der Kommunikation und zur Differenzierung von Produkten genutzt, beispielsweise mit Hilfe von Umweltproduktdeklarationen nach DIN EN ISO 14025 [24].

2.1.2 Ökonomische Entscheidungsprozesse

In den Wirtschaftswissenschaften wird davon ausgegangen, dass Entscheidungen auf Grund rationaler Überlegungen getroffen werden. Das Ziel einzelner Akteure ist dabei die Maximierung ihres individuellen Nutzens, basierend auf individuellen Präferenzordnungen. Dieses grundsätzliche Konzept wird als homo oeconomicus bezeichnet. Durch die zu Grunde liegenden Annahmen können Aussagen über das Verhalten der an einem Entscheidungsprozess beteiligten Akteure getroffen werden. Die angenommene Rationalität von Entscheidungen ist Grundvoraussetzung für das Funktionieren mathematischer Optimierungsmodelle [59].

Privatwirtschaftliche Unternehmen streben dementsprechend annahmegemäß eine Maximierung ihres Unternehmenserfolges an und sind somit als rational handelnde Akteure zu betrachten. Ziele werden identifiziert und priorisiert. In der Folge werden Entscheidungen getroffen und Maßnahmen umgesetzt, um diese zu erreichen. Ziele privatwirtschaftlicher Unternehmen können beispielsweise

- die Sicherung oder Ausbau des Marktanteils,
- die Sicherstellung oder Ausbau der Beschäftigung,
- die Steigerung von Gewinn oder Rentabilität

umfassen.

Ziele können dabei komplementär, indifferent oder konkurrierend sein. Sie werden als komplementär bezeichnet, wenn die Erfüllung eines Zieles zur Erreichung von mindestens einem weiteren beiträgt. Zum Beispiel führt die Verbesserung von Sozialleistungen auf komplementäre Art zur Steigerung der Mitarbeitermotivation. Indifferente beziehungsweise neutrale Ziele beeinflussen einander nicht, wie etwa die Verbesserung von Sozialleistungen und die Senkung des Energieverbrauchs. Bei konkurrierenden Zielen hat die Erfüllung einen negati-

ven Einfluss auf andere Ziele, wie beispielsweise die Steigerung der Ausbringungsmenge einer Maschine bei gleichzeitiger Senkung des Ressourcenbedarfs. Insbesondere im letzteren Fall muss eine Priorisierung sowie die Bestimmung eines übergeordneten Unternehmensziels erfolgen [102]. Maßnahmen und Entscheidungen in Unternehmen sind unter der Annahme der rationalen Entscheidungsfindung auf die Erfüllung der Unternehmensziele ausgerichtet. Bei Unternehmen in Privateigentum ist in aller Regel davon auszugehen, dass Gewinn- und Rentabilitätsziele am bedeutsamsten sind [105].

Zur Erreichung der Ziele werden Maßnahmen ausgewählt, welche anschließend operativ umgesetzt werden. Bei produzierenden Betrieben wird dies als Produktionsprogrammplanung bezeichnet. Im Rahmen der Produktionsprogrammplanung wird analysiert, welche Mengen von Gütern gefertigt werden. Hierzu werden sowohl die Kosten als auch die Erlöse der Produkte betrachtet. Der Stückdeckungsbeitrag hat sich im Rahmen der operativen Produktionsprogrammplanung als Schlüsselgröße etabliert. Er berechnet sich aus dem Absatzpreis eines Produktes abzüglich der Kosten. Im Rahmen der Vollkostenrechnung wird zwischen einstufiger und mehrstufiger Deckungsbeitragsrechnung unterschieden. Bei der einstufigen Deckungsbeitragsrechnung werden lediglich dem Produkt direkt zuordenbare Kosten berücksichtigt, die auch als variable Kosten bezeichnet werden. Im Rahmen der mehrstufigen Deckungsbeitragsrechnung werden zusätzlich zu den variablen Kosten noch Gemeinkosten nach einem Umlageschlüssel einzelnen Produkten zugewiesen. Grundsätzlich stellt der Stückdeckungsbeitrag den Betrag dar, den ein Produkt nach Abzug der Kosten zur Deckung der Fixkosten beiträgt. Aus der Summe aller Stückdeckungsbeiträge ergibt sich nach Deckung aller Fixkosten der Gewinn für die betrachtete Planungsperiode in Abhängigkeit der ausgebrachten Menge von Produkten oder Dienstleistungen. Durch den Produktbezug der Deckungsbeitragsrechnung ist ein analoger Betrachtungsrahmen wie bei der Produktökobilanz gegeben [109]. Treten Kapazitätsengpässe auf, muss die Produktionsprogrammplanung mit Hilfe des Deckungsbeitrags angepasst werden. Im Falle eines einzelnen Kapazitätsengpasses, wie dem Durchlaufen einer Fertigungsstation, wird der engpassbezogene, relative Deckungsbeitrag berechnet und die Produkte mit dem höchsten relativen Deckungsbeitrag werden priorisiert hergestellt. Der relative Deckungsbeitrag bei einer Fertigungsmaschine wäre etwa der Deckungsbeitrag je

Stunde Maschinenlaufzeit und Produkt. Liegen mehrere Kapazitätsengpässe vor, wie das Durchlaufen mehrerer Maschinen oder auch die Festlegung von Obergrenzen für mehrere Umweltwirkungen, muss auf Optimierungsmodelle wie beispielsweise den Simplex-Algorithmus zurückgegriffen werden [102]. Ein Überblick über bestehende Ansätze sowie eine detaillierte Erläuterung des Simplex-Algorithmus wird in Ziffer 2.1.4 gegeben.

Im Falle von Engpässen kann nicht das gesamte Marktpotential ausgeschöpft werden, da der Input oder Output begrenzt ist. Um das bestmögliche betriebliche Ergebnis zu erzielen, werden die Produkte mit dem höchsten relativen Deckungsbeitrag an den Markt gebracht. Jedoch entgehen dem Unternehmen Erlöse dadurch, dass Marktpotentiale nicht ausgeschöpft werden. Durch die Berechnung daraus resultierender, sogenannter Schattenpreise oder Opportunitätskosten werden diese nicht genutzten Alternativen quantifiziert. Schattenpreise stellen den internen Wert der Nutzung oder Nicht-Nutzung von Alternativen dar. Schattenpreise dienen der internen Entscheidungsfindung bei Engpässen [105].

2.1.3 Umweltmanagement

Um ihrer Verantwortung für die Umwelt gerecht zu werden, haben Unternehmen in den letzten Jahren verstärkt Umweltmanagementsysteme eingeführt und Umweltabteilungen geschaffen. Ziel dieser Bemühungen ist eine Reduzierung der Umweltbelastungen durch die Aktivitäten des Unternehmens. Um die Aktivitäten im Bereich des betrieblichen Umweltmanagements zu strukturieren, wurde DIN EN ISO 14001 [23] eingeführt, in der die Anforderungen an betriebliche Umweltmanagementsysteme genormt und festgelegt sind. Die Norm basiert auf dem Prozess der kontinuierlichen Verbesserung. Es werden keine absoluten Zielwerte festgelegt, sondern ein ständiger Verbesserungsprozess vorgeschrieben. Grundlage hierfür ist der Ablauf von Planung-Ausführung-Kontrolle-Optimierung (engl. Plan-Do-Check-Act; PDCA). In der Planung werden Ziele und Prozesse in Übereinstimmung mit der Umweltpolitik von Unternehmen festgelegt. Im Rahmen der Ausführung werden die Prozesse umgesetzt. Bei der Kontrolle werden Prozesse überwacht und ihr Beitrag zur Zielerreichung identifiziert. Bei der Optimierung werden Maßnahmen zur Verbesserung des Umweltmanagementsystems ergriffen. Durch die iterative Vorgehensweise wird eine kontinu-

ierliche Verbesserung des Umweltmanagementsystems erreicht [23]. Eine Erweiterung über die Vorgaben aus DIN EN ISO 14001 [23] stellt das EU-Öko-Audit dar (engl. Eco-Management and Audit Scheme, EMAS). Im Kern des Systems steht ebenfalls ein Umweltmanagementsystem. Nach einer Auditierung erfolgt eine Zertifizierung, was zu verschärften Anforderungen und somit zu einer weiteren Verbesserung des Umweltmanagementsystems führen kann. Durch die Auditierung und ausführlichere Dokumentation kann auch die Außendarstellung von Unternehmen verbessert werden [100]. Jedoch gibt es auch Kritik an betrieblichen Umweltmanagementsystemen nach DIN EN ISO 14001. Die Norm zielt auf eine Verbesserung des Umweltmanagementsystems ab, jedoch nicht direkt auf eine Verbesserung der Umwelleistung [23]. Das Vorhandensein eines betrieblichen Umweltmanagementsystems führt daher nicht automatisch zu einer Reduzierung der Umweltbelastungen [39].

Viele Unternehmen gehen deshalb noch einen Schritt weiter und stellen sich ihrer gesellschaftlichen Verantwortung (engl. Corporate Social Responsibility, CSR). Dabei handelt es sich um freiwillige Aktivitäten von Unternehmen zur Verbesserung ihrer sozialen und ökologischen Leistung, die meist über die Maßnahmen eines Umweltmanagementsystems hinausgehen [13]. Während jedoch Nachhaltigkeit grundsätzlich eine gesellschaftliche Perspektive einnimmt, steht im Rahmen von CSR das Unternehmen als verantwortungsvoller Akteur im Mittelpunkt [56]. Im Rahmen einer freiwilligen Selbstverpflichtung übernehmen Unternehmen somit über die gesetzlichen Anforderungen hinaus direkte Verantwortung für die Auswirkungen ihrer Aktivitäten. Einigen Unternehmen werden im Rahmen von CSR und betrieblichem Umweltmanagement lediglich PR-Maßnahmen oder sogenanntes „Greenwashing“, vorgeworfen. Die Verankerung von sozialer und ökologischer Verantwortung in der Unternehmensphilosophie, die quantitative Angabe von Umweltwirkungen und Umweltzielvorgaben sowie eine transparente Berichterstattung sind jedoch Anzeichen dafür, dass diese Unternehmen über die Mindestanforderungen hinausgehen und teilweise aktiv neue Standards setzen [13].

Nachhaltiges Wirtschaften ist für Unternehmen jedoch nicht nur aus Überzeugung oder zu Kommunikationszwecken lohnend. Untersuchungen zeigen, dass Firmen, die sich „ernsthaft“ zu Nachhaltigkeit bekennen, am Finanzmarkt erfolg-

reicher als ihre Konkurrenten sind [65]. Da durch die Umsetzung von Umweltmaßnahmen die Ressourcen geschont, der Energiebedarf gesenkt und die Prozesse optimiert werden, wird neben einer Verbesserung der öffentlichen Wahrnehmung oftmals auch eine Reduzierung von Kosten erreicht. Dadurch wird letztlich eine Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit ermöglicht. Während der Wirtschaftskrise 2009 erzielten nachhaltige Unternehmen zwischen Mai und November einen um 15 % höheren Aktienkurs als nicht nachhaltig operierende [65]. Nachhaltigkeit als Teil der Unternehmensstrategie trägt somit langfristig zu einer Verbesserung der Wettbewerbssituation bei. Dies führt in der Folge zu verstärkten Investitionen in nachhaltige Unternehmen [71].

Nachhaltigkeit und ökologisches Bewusstsein sind zentraler Bestandteil zur Sicherung des langfristigen wirtschaftlichen Erfolges. Ein zentraler Aspekt der Nachhaltigkeitsbemühungen auf Produktebene kann die in Ziffer 2.1.1 vorgestellte Ökobilanz sein.

2.1.4 Simplex-Methode

Im Rahmen der Produktionsprogrammplanung wird festgelegt, welche Art und Mengen von Produkten oder Dienstleistungen von Unternehmen in einer Planperiode angeboten werden sollen, um vorhandene Ressourcen optimal zu nutzen [105]. Dazu werden häufig Verfahren der linearen Optimierung eingesetzt, bei denen Zielfunktionen unter Berücksichtigung von linearen Restriktionen optimiert werden. Insbesondere die Simplex-Methode hat sich in der Praxis bewährt, da sie entweder zeigt, dass ein Optimierungsproblem keine Lösung besitzt oder eben die Lösung nach endlich vielen Schritten liefert [14], [111]. Andere Verfahren, wie das Ellipsoid-Verfahren, können in speziellen Problemstellungen schneller zur Lösung kommen, unter Umständen aber, falls keine Lösung existiert, endlos iterieren [92]. Vor dem Hintergrund der Fragestellung dieser Arbeit kann das zu optimierende Zielsystem äußerst vielfältig sein. In die Betrachtung können eine Vielzahl von Produkten oder Dienstleistungen mit ihren jeweiligen ökologischen und ökonomischen, oftmals auch regional oder zeitlich beeinflussten Charakteristika einfließen. Die betrachteten Restriktionen können lokal, regional und global sein und neben ökologischen Zielen auch organisatorische Vorgaben wie minimale oder maximale Ausbringungsmengen oder Ab-

satzverbände enthalten. Während grundsätzlich also auch andere Verfahren zur Lösung der auftretenden Optimierungsprobleme geeignet sind, wird im Rahmen dieser Arbeit der Simplex-Algorithmus verwendet, zumal er in der Praxis als das beste Verfahren zur Lösung linearer Optimierungsprobleme akzeptiert ist [42]. Der Algorithmus wurde von George Dantzig erstmals vorgestellt und erlaubt das Identifizieren einer pareto-optimalen Lösung mehrdimensionaler Optimierungsprobleme [21]. Erste Anwendungen des Verfahrens waren unter anderem die Optimierung der Lebensmittel- und Nährstoffversorgung von Soldaten in den 1930er und 1940er Jahren. Ziel der Optimierung war die Gewährleistung einer ausreichenden Versorgung zu minimalen Kosten [9].

Durch die Verwendung des Simplex-Algorithmus kann beispielsweise eine optimale Auslastung der verfügbaren Kapazitäten geplant und Engstellen in der Produktion identifiziert werden. Zur Aufstellung des Algorithmus wird zunächst eine zu optimierende Größe gewählt. Hierzu wird meist auf den Deckungsbeitrag (DB) zurückgegriffen. Der Deckungsbeitrag bezeichnet die Differenz zwischen Verkaufspreis und variablen Kosten (sowie gegebenenfalls zugeordneten Gemeinkosten) eines Produktes. Durch die Kombination von Kosten und Erlösen stellt der DB somit die am besten geeignete Zielgröße zur operativen Produktionsprogrammplanung dar [109]. Neben der zu optimierenden Größe sind dabei auch Restriktionen zu beachten, wie maximal verfügbare Maschinen- und Rohstoffkapazitäten oder ökologische Grenzwerte. Für jedes Produkt und jede Dienstleistung des Unternehmens sind die relevanten Produkteigenschaften zu quantifizieren. Dazu gehören beispielsweise der Stückdeckungsbeitrag, der Maschinen- und Rohstoffbedarf oder die Umweltwirkungen je produzierter Einheit. Diese Produkteigenschaften werden anschließend in Gleichungen überführt. Es wird eine Zielfunktion mit dem Stückdeckungsbeitrag jedes Produktes aufgestellt. Unter der in Ziffer 2.1.2 aufgestellten Annahme eines Gewinnstrebens soll diese Funktion maximiert werden, da eine Maximierung der Stückdeckungsbeiträge zu einer Maximierung des Unternehmensergebnisses und somit zur Erfüllung der Unternehmensziele führt. Auch die Restriktionen werden in Nebenbedingungen überführt. Hier wird für jede knappe Ressource eine eigene Ungleichung aufgestellt. Diese legt fest, welcher Wert für den Ressourcenverbrauch nicht über- oder unterschritten werden darf. Mathematisch lässt sich der Simplex-Algorithmus als Maximierung einer linearen Funktion

$$\max! \quad z = \sum_{i=1}^n a_i \cdot y_i \quad [-] \quad \text{für } i=1, \dots, n \quad (1)$$

Unter den Nebenbedingungen

$$\text{Res}_j: \quad \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_{i,j} \leq L_j \quad [-] \quad \text{für } j=1, \dots, m \quad (2)$$

Sowie der Nicht-Negativitätsbedingungen beschreiben,

$$a_i \geq 0 \quad [-] \quad \text{für } i=1, \dots, n \quad (3)$$

mit

a_i : Ausbringungsmenge von Produkt P_i [-]

$x_{i,j}$: Koeffizient der Restriktion j für Produkt P_i [-]

y_i : Koeffizient der Zielfunktion von Produkt P_i , typischerweise der Deckungsbeitrag [-]

z : Zielfunktionswert [-]

Res_j : Restriktion j [-]

L_j : Obergrenze der Restriktion j [-].

Die Bedingung der Nicht-Negativität in (3) verhindert in den Gleichungen (1) und (2) die Berechnung von nicht plausiblen Lösungen mit negativen Ausbringungsmengen. Zur Überführung der Ungleichungen in (2) in Gleichungen wird eine Schlupfvariable s_j eingeführt, wie in Gleichung (4) dargestellt:

$$\text{Res}_j: \quad \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_{i,j} + s_j = L_j \quad [-] \quad \text{für } j=1, \dots, m \quad (4)$$

mit

s_j : Schlupfvariable von Restriktion Res_j .

Sowohl die Zielfunktion (1) als auch die umformulierten Nebenbedingungen aus (4) werden zur Berechnung in das Simplex-Basistableau übertragen wie in Tabelle 2-1 dargestellt.

Tabelle 2-1: Beispielhaftes Simplex-Basistableau.

Beispielhaftes Simplex-Basistableau							
Zeile	Koeffizienten			Schlupfvariablen			Ergebnis
	P_1	...	P_n	s_1	...	S_m	RHS
Z_1	$x_{1,1}$	...	$x_{n,1}$	1	...	0	L_1
...
Z_m	$x_{1,m}$	...	$x_{n,m}$	0	...	1	L_m
Z_{m+1}	y_1	...	y_n	0	...	0	z

Die Zeile Z_{m+1} stellt die Zielfunktionszeile dar. Die Koeffizienten der Produkte zu den Restriktionen sind in Spalte P_1 bis P_n dargestellt und mit $x_{1,1}$ bis $x_{n,m}$ bezeichnet, die Koeffizienten der Zielfunktion sind in der Zielfunktionszeile aufgeführt und mit y_1 bis y_n bezeichnet. Zu jeder Restriktion wird eine Schlupfvariable s_j eingeführt. In der rechten Spalte der Matrix werden die Werte der jeweiligen Restriktionen L_j angegeben. Rechts unten in der Zielfunktionszeile wird der Zielfunktionswert z dargestellt.

Zunächst wird eine zulässige Basislösung identifiziert. Typischerweise wird hier eine Ausbringungsmenge von Null festgelegt, die Bedingung der Nicht-Negativität aus (3) ist somit erfüllt. In dieser Situation werden keine Ressourcen benötigt, aber auch kein Deckungsbeitrag erzielt. Ausgehend von dieser Basislösung werden iterative Berechnungsschritte durchgeführt. Dabei werden die knappen Ressourcen so lange für die Erzeugung von Produkten eingeplant, bis eine optimale Allokation der verfügbaren Ressourcen erreicht ist und in der gegebenen Situation kein höherer Deckungsbeitrag mehr erzielt werden kann. Dies ist der Fall, wenn in der Zielfunktionszeile keine negativen Werte mehr vorhan-

den sind. In diesem Fall sind die verfügbaren Ressourcen pareto-optimal alloziert, das heißt unter Einhaltung der Restriktionen ist kein höherer Gesamtdeckungsbeitrag erzielbar [42].

Die Anwendung des Simplex-Algorithmus wird im Folgenden anhand eines Beispiels dargestellt. Gegeben sei ein Unternehmen, das drei Produkte P_1 , P_2 und P_3 herstellt. Alle Produkte durchlaufen dabei die drei Fertigungsstufen F_1 , F_2 und F_3 . Der angenommene Zeitbedarf für die Herstellung der Produkte auf den Fertigungsstufen in Minuten ist in Tabelle 2-2 dargestellt.

Tabelle 2-2: Angenommener Zeitbedarf für die Fertigung der Produkte P_1 , P_2 und P_3 .

Zeitbedarf Fertigung [min.]			
Fertigungsstufe	Produkt		
	P_1	P_2	P_3
F_1	1/2	1	1/2
F_2	1/4	1/2	1/2
F_3	1	1	1/3

Auf den Fertigungsstufen stehen die folgenden Kapazitäten zur Verfügung:

- F_1 : 2.000 Minuten
- F_2 : 1.500 Minuten
- F_3 : 3.000 Minuten

Die Stückdeckungsbeiträge der Produkte betragen:

- P_1 : 20 €
- P_2 : 15 €
- P_3 : 25 €

Die Zielfunktion des linearen Optimierungsproblems wird in Gleichung (5) formuliert mit

$$\max! \quad z = 20 \cdot a_1 + 15 \cdot a_2 + 25 \cdot a_3 \quad [\text{€}] \quad (5)$$

mit

a_i : Ausbringungsmenge von Produkt P_i [-]

z : Zielfunktionswert [€].

Aus den Kapazitäten der Fertigungsstufen sowie dem in Tabelle 2-1 dargestellten Zeitbedarf ergeben sich die in den Gleichungen (6), (7) und (8) dargestellten Restriktionen $\text{Res}_{1,2,3}$:

$$\text{Res}_1: \quad \frac{1}{2} \cdot a_1 + 1 \cdot a_2 + \frac{1}{2} \cdot a_3 \leq 2.000 \quad [\text{min}] \quad (6)$$

$$\text{Res}_2: \quad \frac{1}{4} \cdot a_1 + \frac{1}{2} \cdot a_2 + \frac{1}{2} \cdot a_3 \leq 1.500 \quad [\text{min}] \quad (7)$$

$$\text{Res}_3: \quad 1 \cdot a_1 + 1 \cdot a_1 + \frac{1}{3} \cdot a_1 \leq 3.000 \quad [\text{min}] \quad (8)$$

mit

a_i : Ausbringungsmenge von Produkt P_i [-].

Das Optimierungsproblem wird anschließend in ein Simplex-Basistableau übertragen. Dabei werden die Nebenbedingungen durch die Einführung der Schlupfvariablen s_j von Ungleichungen in Gleichungen überführt. Daraus ergibt sich das in Tabelle 2-3 dargestellte Simplex-Basistableau.

Tabelle 2-3: Simplex-Basistableau für das Rechenbeispiel.

Simplex-Tableau, Basislösung							
Zeile	Produktionsparameter			Schlupfvariablen			Ergebnis
	P ₁	P ₂	P ₃	s ₁	s ₂	s ₃	RHS
Z1	1/2	1	1/2	1	0	0	2.000
Z2	1/4	1/2	1/2	0	1	0	1.500
Z3	1	1	1/3	0	0	1	3.000
Z4	-20	-15	-25	0	0	0	0

Die Produktionsparameter, in den Spalten P₁, P₂ und P₃ dargestellt, sind die Fertigungszeiten auf den jeweiligen Fertigungsstufen (Zeilen Z1 bis Z3) sowie der Stückdeckungsbeitrag in der Zielfunktionszeile (Zeile Z4). Die Zeilen Z1 bis Z3 geben die zeitliche Belastung der einzelnen Fertigungsstufen sowie die zur Verfügung stehende Gesamtkapazität auf der Fertigungsstufe an. Die Zielfunktionszeile ist in Z4 dargestellt. Der Zahlenwert rechts unten in der Tabelle gibt den Wert der Zielfunktionszeile an und beläuft sich im aktuellen Fall auf null, da noch keine Fertigung stattfindet. Die Schlupfvariablen sind in den Spalten s₁, s₂ und s₃ dargestellt. Dabei handelt es sich im Basistableau um Einheitsspalten. Die Ergebnisse sind auf der rechten Seite in der Spalte RHS (englisch Right Hand Side) dargestellt. Die Einheiten der Produktionsparameter, Schlupfvariablen sowie der Ergebnisspalte sind dabei kontextabhängig und müssen interpretiert werden.

Im Rahmen der Berechnung des Simplex-Algorithmus wird zunächst das Pivotelement aus der Tabelle ausgewählt. Hierzu gibt es eine Vielzahl verschiedener Vorgehensweisen. Die Auswahl des Pivotelements kann dabei Einfluss auf die Anzahl der Iterationen der Simplex-Berechnung und damit auf die Rechendauer des Algorithmus haben, das Endergebnis ändert sich dadurch aber nicht. Für die Darstellung der Funktionsweise des Algorithmus wird auf den ursprünglichen Ansatz von Dantzig zurückgegriffen, bei dem der betragsmäßig größte negative

Wert der Zielfunktionszeile ausgewählt wird, da hier die stärkste Erhöhung des Gesamtergebnisses zu erwarten ist [21]. Für den vorliegenden Fall handelt es sich dabei um Spalte P_3 . Aus den Elementen der Spalte muss das Pivotelement ausgewählt werden. Hierzu wird der Quotient aus den Werten der RHS und den entsprechenden Elementen der Pivotspalte gebildet. Dies dient zur Feststellung, welche Restriktion zuerst ausgeschöpft wird. Der kleinste Wert ergibt sich dabei für das Element in Zeile Z2 (in Tabelle 2-3 fett markiert), dieses ist somit das Pivotelement. Im Zuge der Berechnung wird zunächst das Pivotelement auf den Wert 1 normiert, im vorliegenden Fall also durch Multiplikation aller Werte der Zeile Z2 mit 2. Die Neuberechnete Zeile Z2 wird anschließend jeweils mit einem Faktor multipliziert und von den Zeilen Z1, Z3 und Z4 abgezogen. Der Faktor wird dabei für jede Zeile so gewählt, dass nach Subtraktion der Zeilen alle Werte der Spalte außer dem Pivotelement 0 sind. Von Z1 wird also beispielsweise $0,5 \cdot Z2$ abgezogen, von Z3 $1/3 \cdot Z2$ und so weiter. Das Ergebnis ist in Tabelle 2-4 dargestellt.

Tabelle 2-4: Simplex-Tableau, erste Iteration für das Rechenbeispiel.

Simplex-Tableau, erste Iteration							
Zeile	Produktionsparameter			Schlupfvariablen			Ergebnis
	P_1	P_2	P_3	s_1	s_2	s_3	RHS
Z1	1/4	1/2	0	1	-1	0	500
Z2	1/2	1	1	0	2	0	3.000
Z3	5/6	2/3	0	0	-2/3	1	2.000
Z4	-15/2	10	0	0	50	0	75.000

Der Zielwert in der Ergebnisspalte in Zeile Z4 beläuft sich auf 75.000, mit dem aktuellen Produktionsprogramm würde also ein Gesamtdeckungsbeitrag von 75.000 € erzielt. Dies wird erreicht durch die Produktion von 3.000 Einheiten von Produkt P_3 . In Tabelle 2-4 ist dies durch die Einheitsspalte in Spalte P_3 zu er-

kennen. Die „1“ in Zeile Z2 gibt dabei den zugehörigen Wert von 3.000 in der RHS an. Jedoch gibt es noch einen negativen Wert in der Zielfunktionszeile, das Gesamtergebnis kann noch verbessert werden. Bei der zweiten Iteration des Verfahrens ist P_1 die Pivotspalte, da nur dort noch ein negativer Wert in der Zielfunktionszeile auftritt. Durch Division der Werte der RHS mit den Spaltenelementen wird der Wert in Zeile Z1 als Pivotelement identifiziert. Dieser ist wieder fett in Tabelle 2-4 markiert. Analog zum vorherigen Vorgehen wird zunächst das Pivotelement auf den Wert 1 normiert, in diesem Fall durch Multiplikation der gesamten Zeile mit dem Wert 4. Anschließend werden Vielfache der Werte der modifizierten Zeile Z1 von den Zeilen Z2 bis Z4 abgezogen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2-5 dargestellt.

Tabelle 2-5: Simplex-Tableau, zweite Iteration für das Rechenbeispiel.

Simplex-Tableau, zweite Iteration							
Zeile	Produktionsparameter			Schlupfvariablen			Ergebnis
	P_1	P_2	P_3	s_1	s_2	s_3	RHS
Z1	1	2	0	4	-4	0	2.000
Z2	0	0	1	-2	4	0	2.000
Z3	0	-1	0	-10/3	8/3	1	333,33
Z4	0	25	0	30	20	0	90.000

Es wird ersichtlich, dass in der Zielfunktionszeile Z4 keine negativen Werte mehr vorhanden sind. Eine Erhöhung des Gesamtergebnisses über einen Gesamtdeckungsbeitrag von 90.000 € hinaus ist also nicht möglich. Dieser Wert wird erreicht durch die Herstellung von 2.000 Einheiten von P_1 und 2.000 Einheiten von P_3 . Die jeweiligen Werte lassen sich dabei aus den Einheitsspalten in der Tabelle ablesen. Für Spalte P_1 ist der zugehörige Wert in Zeile Z1; für P_3 in Zeile Z2. Weiterhin gibt es nicht ausgenutzte Kapazitäten von 333,33 Minuten auf Fertigungsstufe F_3 , was durch die der Einheitsspalte s_3 zugewiesenen Zeile

Z3 dargestellt ist. Die Spalten P_2 , s_1 und s_2 sind keine Einheitsspalten. Für diese Spalten sind die Opportunitätskosten in der Zeile Z4 dargestellt. Die Herstellung einer Einheit von Produkt P_2 würde in der vorliegenden Situation zu einer Reduzierung des Gesamtdeckungsbeitrags um 25 € führen. Für die Werte in Spalte s_1 und s_2 ist die Interpretation ähnlich. Durch den Wegfall einer Minute Bearbeitungszeit auf den jeweiligen Maschinen sinkt der Gesamtdeckungsbeitrag um 30 € (für s_1) beziehungsweise um 20 € (für s_2). Analog würde der Gesamtdeckungsbeitrag je zusätzlicher verfügbarer Minute Bearbeitungszeit ansteigen. Es zeigt sich, dass sich mit dem Simplex-Algorithmus lineare Optimierungsprobleme in wenigen Schritten lösen lassen.

Die theoretische Komplexität des Simplex-Algorithmus gemessen an der Anzahl der notwendigen Iterationen ist zwar exponentiell bezüglich der Zahl der Variablen n und der Zahl der Restriktionen m . Bereits Dantzig vermutete aber nach umfangreichen empirischen Untersuchungen, dass die Zahl der Iterationen proportional zu $m \cdot \log(n)$ ist, was auch heute in der Praxis angenommen wird. Beispiele für den worst-case-Fall mit einer exponentiell wachsenden Anzahl von Iterationen seien konstruiert [14]. Somit kann auch in dieser Arbeit ohne Einschränkungen der Simplex-Algorithmus als das beste Verfahren zur Lösung der anstehenden linearen Probleme betrachtet werden.

2.2 Stand der Forschung

Im Folgenden wird ein Überblick über den Stand der Forschung bei der Einbeziehung ökologischer Faktoren in betriebliche Planungsprozesse gegeben. Der Schwerpunkt der Betrachtung liegt auf dem Vergleich bestehender Methoden im Hinblick auf ihre Zielsetzung und ihrer methodischen Ansätze sowie ihrer methodischen Einschränkungen.

Die Einbeziehung von Umweltwirkungen in betriebliche Planungsprozesse ist Gegenstand vieler Untersuchungen im Bereich der Wirtschafts- und Ingenieurwissenschaften. Die existierenden Ansätze unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Ziele und methodischen Ansätze jedoch deutlich. Die relevanten Ansätze werden im Folgenden vorgestellt und im Hinblick auf das Ziel dieser Arbeit beurteilt.

2.2.1 Bewirtschaftung von Gemeingütern

Güter lassen sich grundsätzlich nach verschiedenen Kriterien unterscheiden. Oftmals sind die herangezogenen Unterscheidungskriterien dabei Ausschließbarkeit und Rivalität. Unter der Ausschließbarkeit wird dabei die Möglichkeit, andere Individuen vom Konsum eines Gutes auszuschließen, verstanden. Durch Rivalität im Konsum be- oder verhindert der Konsum eines Individuums den Konsum des Gutes durch andere Individuen. Aus der Beurteilung nach den Kriterien der Rivalität und der Ausschließbarkeit ergeben sich vier idealtypische Arten von Gütern. Diese sind in Tabelle 2-6 dargestellt und im Folgenden beschrieben [29].

Tabelle 2-6: Klassifizierung von Güterarten in Anlehnung an [29].

Güterarten		
Ausschließbarkeit des Konsums	Rivalität des Konsums	
	Nicht gegeben	Gegeben
Nicht gegeben	Öffentliches Gut	Gemeingut
Gegeben	Club-Gut	Privates Gut

Als ein Beispiel für ein öffentliches Gut soll nachfolgend ein Deich betrachtet werden. Alle Individuen werden durch einen Deich geschützt, es besteht also keine Rivalität im Konsum. Auch kann kein Individuum von der Nutzung des Deiches ausgeschlossen werden [29].

Gemeingüter sind Güter, von deren Nutzung niemand ausgeschlossen werden kann, bei denen jedoch eine Rivalität im Konsum besteht. Ein Beispiel ist eine frei zugängliche Weidefläche, die von allen genutzt werden kann, die jedoch bei übermäßiger Nutzung immer geringere Erträge liefert. Somit herrscht Rivalität im Konsum. Gemeingüter werden auch als allmende Güter bezeichnet [29].

Ist Ausschließbarkeit vom Konsum ohne Konsumrivalität gegeben, wird von Club-Gütern gesprochen. Ein Beispiel dafür ist Pay-TV. Nur wer dafür bezahlt,

erhält auch den Zugang, weitere Nutzer schränken aber nicht die Möglichkeiten bestehender Nutzer ein [29]. Gibt es sowohl die Möglichkeit der Ausschließbarkeit als auch Rivalität im Konsum, wird von privaten Gütern gesprochen. Ein Beispiel dafür ist etwa Kleidung [29].

Für die Nutzung von Gemeingütern gelten einige Besonderheiten, diese sind auf die mangelnde Ausschließbarkeit sowie die Konsumrivalität zurückzuführen. Das Phänomen, welches auch als Tragik der Allmende (engl. Tragedy of the Commons) bekannt ist, wurde von Garrett Hardin 1968 [45] detailliert beschrieben. Hardin greift dabei auf das Beispiel einer Weidefläche zurück, welche grundsätzlich allen Individuen zur freien Verfügung steht. Die Fläche wird von mehreren Schäfern mit ihren Herden genutzt. Wenn die äußeren Umstände stabil sind, also keine Krankheiten oder Konflikte die Herden dezimieren, setzt ein Wachstum der Herden ein. Jeder Schäfer wird dabei versuchen, sein Einkommen zu maximieren und deswegen die Größe seiner Herde weiter erhöhen. Während jeder Schäfer direkt von jedem Tier in seiner Herde profitiert, tritt zusätzlich noch ein negativer Effekt auf: Durch die ständig wachsende Anzahl der Tiere kommt es zu einer Überweidung. Dieser negative Effekt verteilt sich jedoch auf alle Nutzer der Weide und ist kleiner als der positive Effekt für den Einzelnen. Das individuell rationale Handeln in dieser Situation führt in der Folge dazu, dass die Anzahl der Tiere auf der Weide ständig wächst und die Fläche immer weiter überweidet wird. Zwar sinkt der zusätzliche individuelle Nutzen durch ein weiteres Tier auf der Weide für jedes Individuum, dennoch wird jedes Individuum immer weiter auf Wachstum setzen. Dies ist der individuellen Perspektive der einzelnen Akteure geschuldet. Nur durch entsprechende Nutzungsregeln lässt sich die Nutzung der Weide auf ein für alle Nutzer sinnvolles Niveau regeln. Das gleiche Phänomen tritt in umgekehrter Form bei Verschmutzung und Emissionen auf. Hierbei kommt es allerdings zu keiner Entnahme aus dem Gemeingut, sondern zu einer Einbringung von Stoffen in ein System mit begrenzter Aufnahmekapazität. Die Grundüberlegung jedes Individuums ist dabei gleich wie im Beispiel der Schäfer: Es ist individuell günstiger, den Folgeschaden gemeinschaftlich zu tragen oder zu beseitigen, statt auf eigenes Einkommen und in der Folge auf die damit zusammenhängenden Umweltwirkungen zu verzichten [45].

Versuche zur Lösung der Tragik der Allmende beschränken sich meist auf zwei Hauptansätze: Der Einsatz einer externen, regulierenden Kraft wie des Staates, oder die Privatisierung der Eigentumsrechte. Die Regulierung umfasst hierbei das Aufstellen von Regeln, die Überprüfung der Einhaltung dieser Regeln sowie eventuelle Sanktionen im Falle einer Regelverletzung. Nur durch eine strenge Durchsetzung aller Regeln kann ein Gleichgewicht sichergestellt werden [48]. Durch eine Privatisierung der Eigentumsrechte wird die Erhaltung des Gutes in den Verantwortungsbereich einzelner Akteure übertragen. Da jeder Akteur für die Pflege und Erhaltung seiner natürlichen Ressourcen verantwortlich ist, wird der Erhalt der Leistungsfähigkeit auch individuell rational [22], [89].

Beide Ansätze haben jedoch Schwächen. Die Durchsetzung der aufgestellten Regeln durch externe Akteure geht mit einem hohen Informationsbedarf sowie zusätzlichen Kosten einher; die Privatisierung der Eigentumsrechte ist in vielen Fällen schlicht nicht umsetzbar. Ostrom greift die Problematik der Regulierung von Gemeingütern auf [72]. Zentraler Aspekt dabei ist die aktive Einbeziehung der betroffenen Akteure, beispielsweise bei der Festlegung von Grenzen und Restriktionen, Nutzungsregeln, Kontroll- und Überwachungsfunktionen oder Sanktionierungsmechanismen [72]. Die anhaltende Relevanz von Analysen der Bewirtschaftung von Gemeingütern zeigt sich auch in der Vergabe des Nobelpreises für Wirtschaftswissenschaften an Elinor Ostrom im Jahr 2009 [70]. Die von Ostrom formulierten Grundlagen werden in ähnlicher Form oftmals in Unternehmen genutzt, beispielsweise im Rahmen von Umweltmanagementprogrammen oder Nachhaltigkeitsinitiativen.

Ansätze zur Bewirtschaftung von Gemeingütern sind für betriebliche Nachhaltigkeitsbemühungen wichtig, da sie die methodische Grundlage für die Überführung von öffentlichen Gütern zu betriebswirtschaftlich relevanten knappen Ressourcen liefern. Die operative Umsetzung von Maßnahmen zur Bewirtschaftung von Gemeingütern ist jedoch auf Grund der umfassenden Anforderungen in Bezug auf Informationsbedarf, Einbeziehung aller relevanten Akteure sowie Kontroll- und Überwachungsmechanismen kritisch zu betrachten. Ansätze zur Bewirtschaftung von Gemeingütern bilden eine implizite Grundlage von betrieblichen Nachhaltigkeitsbemühungen, bieten allerdings keine in der Praxis direkt anwendbaren Methoden zur Erreichung von betrieblichen Umweltzielen.

2.2.2 Internalisierung externer Effekte

Als externen Effekt werden die Auswirkungen wirtschaftlicher Aktivitäten auf Dritte bezeichnet, während der Verursacher des Effekts nicht von den Auswirkungen betroffen ist [105]. Extern bezeichnet dabei das Auftreten eines Effektes mit Wirkung auf unbeteiligte Marktteilnehmer. Die Verschmutzung der Umwelt durch wirtschaftliche Aktivitäten ist ein Beispiel für einen externen Effekt. Der Verursacher ist zwar wirtschaftlich aktiv, kümmert sich jedoch nicht um die resultierenden Umweltschäden. Nach [75] können auch solche Effekte monetär bewertet werden. Die monetäre Bewertung ist Voraussetzung für die Kompensation der tatsächlich entstandenen Kosten. Durch die Diskrepanz zwischen privaten und gesellschaftlichen Kosten kommt es zum Marktversagen und es tritt eine Fehlallokation auf. Um dies zu beheben, werden die externen Effekte internalisiert; sie werden zunächst quantifiziert und dann von einem der Akteure kompensiert. In [20] werden hierzu bilaterale Verhandlungen zwischen Verursacher und Geschädigten vorgeschlagen. Dabei gibt es zwei grundsätzliche Varianten zur Internalisierung. Entweder leistet der Verursacher den Geschädigten eine Kompensation oder die potentiell Geschädigten bezahlen den Verursacher, um ihn von weiteren schädigenden Aktivitäten abzuhalten. Welcher Fall eintritt, hängt dabei von der Verteilung der Eigentumsrechte ab [20]. Neben bilateralen Verhandlungen gibt es auch weitere Möglichkeiten zur Internalisierung externer Effekte. Dies können nicht-ökonomische Maßnahmen wie Reglementierungen, Verbote sowie Normen sein oder ökonomische Maßnahmen wie Besteuerung, Subventionen oder die Einrichtung eines reglementierten Marktes. Die meisten Ansätze basieren auf der Grundannahme eines vollkommenen Marktes. Marktteilnehmer verfügen über vollständige Informationen, es gibt keine Transaktionskosten sowie keine persönlichen, zeitlichen oder sachliche Präferenzen der Marktteilnehmer. Dies ist eine Folge der in Ziffer 2.1.2 dargestellten rationalen Entscheidungsfindung. Dies tritt in der Realität praktisch jedoch nicht auf. Marktbasierte Ansätze werden als effizienter betrachtet, da die Marktteilnehmer jeweils aus ihrer Perspektive rational handeln und somit eine kostenminimale Lösung erreicht werden kann, während gesetzliche Regulierungen in der Regel zu höheren Kosten führen [16], [38].

Das Europäische Emissionshandelssystem ist ein Beispiel für die praktische Umsetzung eines reglementierten Marktes. Dabei handelt es sich um ein cap-and-trade System. Obergrenzen für die Emission von Treibhausgasen werden festgelegt. Unternehmen kaufen in einem wirtschaftlich rationalen Umfang Verschmutzungszertifikate. Jedes Unternehmen entscheidet dabei, ob und in welchem Umfang Zertifikate gekauft werden oder ob die Investition in umweltfreundlichere Technologien lohnender ist. Dies führt dazu, dass Reduktionen dort erzielt werden, wo sie kostengünstig umgesetzt werden können, während Unternehmen mit hohen Reduktionskosten dazu neigen, Zertifikate zu kaufen. Da zunächst leicht realisierbare Einsparpotentiale genutzt werden, werden die Kosten von Reduktionsmaßnahmen aus volkswirtschaftlicher Perspektive minimiert. Unternehmen mit geringen Treibhausgasemissionen profitieren durch ihren niedrigeren Bedarf an Zertifikaten und folglich auch durch geringere Betriebskosten aufgrund von bereits umgesetzten Verbesserungsmaßnahmen [30].

Bei der Umsetzung von Maßnahmen zur Internalisierung externer Effekte zeigen sich oftmals Probleme wie unklare Eigentumsrechte oder Fragen zur rechtlichen Ausgestaltung. Bei konkreten Maßnahmen wie dem EU-Emissionshandelssystem kommt es zu politischer Einflussnahme, wie der Vergabe von kostenfreien Zertifikaten für manche Sektoren [32], [33]. Dadurch wird die Grundidee des Emissionshandelssystems untergraben und es kommt zu einer Ausbeutung des Systems [35]. Durch die wirtschaftspolitisch motivierte Ausgabe von zu großen Mengen an Zertifikaten wird die Wirksamkeit des Emissionshandelssystems reduziert, da der Preis für Emissionszertifikate zu gering ausfällt, um eine wirksame Steuerungsfunktion zu erfüllen [91]. Ansätze zur Internalisierung externer Effekte sind theoretisch zur Reduzierung von Umweltwirkungen geeignet. In der Praxis sind die Ansätze aus den genannten Gründen nur eingeschränkt umsetzbar.

2.2.3 Monetarisierung von Umweltwirkungen

Trotz der in Ziffer 2.2.2 dargestellten praktischen Einschränkungen bei der Anwendung können ökonomische Ansätze zur Bewertung von Umweltwirkungen oder Verbesserungsmaßnahmen herangezogen werden. Ein solcher Ansatz ist die Monetarisierung von Umweltwirkungen [38]. Unter dem Begriff der Monetari-

sierung wird die in Geldeinheiten ausgedrückte Bewertung von Effekten oder Tätigkeiten verstanden. Im Bereich der Umweltökonomie werden dabei Umweltwirkungen, wie Emissionen und ihre erwarteten Folgen, in Geldeinheiten bemessen. Dies kann als Grundlage für eine Besteuerung oder monetäre Anreize zur Emissionsreduzierung dienen [7]. Unter verschiedenen verfügbaren Ansätzen zur monetären Bewertung von Umweltwirkungen greift der am häufigsten Verwendete auf die Zahlungsbereitschaft (engl. willingness to pay) zurück. Dabei wird die Zahlungsbereitschaft für das Erreichen einer Verbesserung, etwa einer Reduktion von Umweltwirkungen, abgefragt. Alternativ kann auch eine Abfrage der Akzeptanz (engl. willingness to accept) durchgeführt werden; hierbei werden Betroffene gefragt, für welchen Betrag sie auf eine Verbesserung der Situation verzichten würden [38].

Trotz der häufigen Verwendung weisen diese Ansätze auch deutliche Schwächen auf. Die individuelle Zahlungsbereitschaft wird dabei von mehreren äußerst subjektiven Faktoren beeinflusst, wie beispielsweise:

- Verfügbares Einkommen: Bei einem höheren Einkommen ist die Zahlungsbereitschaft in der Folge höher.
- Individuelle Exposition: Wer stärker von einer Umweltwirkung betroffen ist, hat in der Folge eine höhere Zahlungsbereitschaft.
- Wissen über die Umweltwirkung: Ob und in welchem Umfang ein Individuum über die Folgen einer Umweltwirkung informiert ist, beeinflusst die Zahlungsbereitschaft [12].

Die Bepreisung von Umweltwirkungen mittels einer Abfrage der Zahlungsbereitschaft kann somit regional und subjektiv korrekte Werte generieren, auf Grund des starken subjektiven Einflusses ist allerdings ein objektiver Vergleich nicht möglich.

Andere Ansätze zur Monetarisierung setzen auf die Bestimmung der Umweltfolgekosten. Einzelne Emissionen werden nicht direkt bewertet, sondern die davon ausgehenden Umweltschäden monetär bewertet. Ein Beispiel hierfür kann etwa das Einleiten von Abwässern in einen Fluss sein. In der Folge sinkt die Wasserqualität, was wiederum Auswirkungen auf Flora und Fauna im Fluss und der Umgebung haben kann. Die Problematik dieses Ansatzes liegt in der Bewertung

der tatsächlichen Umweltfolgen, da einzelne Emissionen weitreichende Auswirkungen auf viele Elemente der natürlichen Umwelt haben, welche wiederum voneinander abhängig sind. Durch die Komplexität der betroffenen Systeme kann es hier zu deutlichen Abweichungen in der monetären Bewertung von Umweltwirkungen kommen [97], [110].

Ein weiterer Ansatz zur monetären Bewertung von Umweltwirkungen beruht auf der Kombination von behinderungsangepassten Lebensjahren (engl. Disability Adjusted Life Years, DALY) und der durchschnittlichen Wertschöpfung eines Individuums pro Jahr. DALY ist im Rahmen der Eco-Indicator 99 Methode zur Umweltwirkungsabschätzung [43] definiert als der durch Umweltwirkungen verursachte negative Einfluss auf die menschliche Gesundheit und der daraus resultierende Verlust an behinderungsfreien Lebensjahren im Vergleich zur statistischen Lebensdauer. Sterben etwa durch einen Umwelteinfluss zwei Personen jeweils fünf Jahre vor ihrer statistischen Lebenserwartung, entspricht dies zehn DALY [43]. Dieser direkte negative Einfluss auf die menschliche Gesundheit wird dann in Bezug zur entgangenen Wertschöpfung durch den Wegfall von Arbeitskräften gesetzt. Um eine globale Vergleichbarkeit herzustellen, werden die USA als Gebiet mit der höchsten durchschnittlichen Wertschöpfung herangezogen. Der monetarisierte Umweltschaden ergibt sich somit als Produkt aus DALY und durchschnittlicher jährlicher Wertschöpfung und stellt somit den Verlust von Arbeitskraft aus volkswirtschaftlicher Sicht dar [103].

Auf Grund der großen Unsicherheiten werden Ansätze zur monetären Bewertung von Umweltwirkungen noch als ungeklärte Problematik betrachtet [76]. Durch die große Unsicherheit beziehungsweise Subjektivität bei der monetären Bewertung sind aktuelle Ansätze zur Unterstützung der Entscheidungsfindung für betriebliche Nachhaltigkeitsbestrebungen nur bedingt geeignet.

2.2.4 Ökologische und soziale Lebenszykluskostenrechnung

Lebenszykluskostenrechnung (engl. Life Cycle Costing, LCC) ist das ökonomische Gegenstück zur Ökobilanzierung. Dabei werden die ökonomischen Aspekte des Produktlebenszyklus analysiert und zur Entscheidungsunterstützung herangezogen. Die Methode wurde zunächst hauptsächlich im militärischen Bereich angewandt, um nicht nur Beschaffungs-, sondern auch Betriebs-, Wartungs- und

Entsorgungskosten in die Entscheidungsfindung einzubeziehen [40]. Ein großer Teil der entlang des Lebenszyklus entstehenden Kosten ist dabei auf Material- und Energieflüsse zurückzuführen, wie etwa Kosten für Materialien bei Herstellung und Wartung sowie Energiekosten in Betrieb und Herstellung. Hieraus ergibt sich eine zu großen Teilen mit der Methode der Ökobilanz identische Datengrundlage [36].

Trotz des Bezugs auf den physikalischen Produktlebenszyklus und einer ähnlichen Datengrundlage bestehen deutliche Unterschiede zwischen LCA und LCC. Aus ökologischer Sicht sind alle während der Lebensdauer des Produktes anfallenden Umweltwirkungen relevant, es wird also eine übergeordnete Sichtweise eingenommen. Aus ökonomischer Sicht sind jedoch nur die individuellen Kosten für einzelne Akteure entscheidungsrelevant. Hierunter fallen Kosten für Erwerb, Betrieb und Wartung, nicht jedoch die Kosten für vor- oder nachgelagerten Schritte wie der Produktentwicklung oder der Verwertung nach der Entsorgung. Diese Kosten fallen an, sind jedoch von anderen Akteuren zu tragen. Die klassische Lebenszykluskostenrechnung erfolgt also aus einer individuellen Perspektive. In der Richtlinie des VDI [99] werden die Lebenszykluskosten als gesamte Kosten eines Systems aus Hersteller- oder Betreibersicht definiert. Je nach Sichtweise kommt es somit zu Unterschieden zwischen LCA und LCC und folglich auch zu unterschiedlichen Ergebnissen.

Die Life Cycle Initiative, eine gemeinsame Initiative des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (engl. United Nations Environment Programme, UNEP) sowie der Gesellschaft für Ökotoxikologie und Umweltchemie (engl. Society for Environmental Toxicology and Chemistry, SETAC) hat zur Lösung dieses Problems die Methode der ökologischen Lebenszykluskostenrechnung (engl. Environmental Life Cycle Costing, E-LCC) entwickelt [52]. Im Rahmen der E-LCC wird der übergeordnete Blick auf den physikalischen Produktlebenszyklus gerichtet. Es werden nicht nur Kosten eines Akteurs betrachtet, sondern alle entlang der Wertschöpfungskette anfallenden Kosten, inklusive Verwertungskosten am Lebensende. Zusätzlich zur ökonomischen Betrachtung wird eine begleitende LCA durchgeführt. Alle in der LCA analysierten Aspekte werden im Rahmen der E-LCC betrachtet, unabhängig davon, von welchem Akteur diese zu tragen sind. Das untersuchte System ist in diesem Fall für LCA und E-LCC identisch.

Noch einen Schritt weiter geht die Methode der sozialen Lebenszykluskostenrechnung (engl. Societal Life Cycle Costing, S-LCC). Dabei werden zusätzlich zu sämtlichen in der E-LCC enthaltenen Kosten noch alle in der Gegenwart oder Zukunft anfallenden oder zu erwartenden Kosten, die von der Gesellschaft getragen werden müssen, einbezogen. Dies beinhaltet unter anderem auch die Internalisierung von externen Effekten [52], [93].

Die Ansätze des E-LCC und S-LCC stellen praktische Erweiterungen zur ökologisch-ökonomischen Analyse dar. Auf Grund der übergeordneten Perspektive bei der Betrachtung ökonomischer Aspekte ist jedoch die Relevanz der Ergebnisse zur Entscheidungsunterstützung eingeschränkt, da auch für einzelne Akteure nicht relevante Kosten in der Analyse enthalten sind. Die Ansätze sind somit im Hinblick auf die Fragestellung dieser Arbeit nur bedingt geeignet.

2.2.5 Ökoeffizienzanalyse

Bei der Beurteilung von Umweltwirkungen in Unternehmen spielen ökonomische Aspekte eine wichtige Rolle. Auch wenn Maßnahmen ökologisch motiviert sind, müssen die ökonomischen Implikationen beachtet werden. Um Entscheidungsprozesse in diesem ökologisch-ökonomischen Spannungsfeld zu unterstützen, wurde der Ansatz der Ökoeffizienz entwickelt. Dabei wird der wirtschaftliche Wert eines Produktes in Verbindung mit den verursachten Umweltwirkungen gesetzt. Mittels Division des ökonomischen Wertes durch die Umweltwirkungen wird eine Kennzahl für die Ökoeffizienz berechnet. Ein höherer Wert entspricht dabei einer verbesserten Ökoeffizienz. Eine Verbesserung der Ökoeffizienz kann entweder durch die Erhöhung des ökonomischen Wertes oder die Reduktion der Umweltwirkungen erreicht werden [85]. Die Ökoeffizienzanalyse wurde in der Folge weiterentwickelt und als Methode zum Produktvergleich durch die DIN EN ISO 14045 [27] international normiert. In [27] wird die Methode der LCA nach DIN EN ISO 14040 [25] und DIN EN ISO 14044 [26] zur Quantifizierung der Umweltwirkungen vorgeschrieben. Im Rahmen der Bewertung von Produkten werden die Umweltwirkungen dabei zunächst durch eine Ökobilanz quantifiziert. Zur besseren Vergleichbarkeit werden die Ergebnisse anschließend normiert. Allerdings kann die Auswahl des Normierungsfaktors großen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Bei falscher Auswahl der Normierungsfaktoren können Er-

gebnisse verzerrt werden 0. Fließen mehrere Umweltwirkungskategorien in die Ökoeffizienzbewertung ein, ist eine Gewichtung der Wirkungskategorien durchzuführen. Die Gewichtungsprinzipien und Gewichtungsfaktoren sind dabei anzugeben. Die Gewichtung darf nicht in Ökoeffizienzanalysen verwendet werden, wenn vergleichende Aussagen getroffen werden und die Analyse zur Veröffentlichung vorgesehen ist. Die monetäre Bewertung kann auf unterschiedliche Größen wie Kosten, Preis, Profit oder andere Werte bezogen werden. Die Systemgrenzen von LCA und ökonomischer Bewertung müssen dabei gleich sein [27].

Die Ökoeffizienzanalyse ist eine nützliche Methode zur Analyse ökonomischer und ökologischer Aspekte. Sie ist jedoch auf den Vergleich von funktionsäquivalenten Produkten beschränkt und erlaubt über den reinen Produktvergleich hinaus keine Aussagen über das Gesamtsystem eines Unternehmens. Aus einer übergeordneten, betrieblichen Perspektive ist die Ökoeffizienzanalyse nur eingeschränkt geeignet, da kein Bezug zu übergeordneten Unternehmenszielen und Umweltzielvorgaben hergestellt werden kann. Damit können nur Teilaspekte der Fragestellung dieser Arbeit adressiert werden.

2.3 Analyse des Stands des Wissens

In diesem Kapitel wird der in Ziffer 2.2 erarbeitete Stand der Forschung im Hinblick auf die Eignung zur ökologisch-ökonomischen Systemanalyse beurteilt. Die Beurteilung erfolgt auf Grundlage der in Ziffer 2.2 dargestellten Stärken und Schwächen der Methoden und im Hinblick auf die Fragestellung dieser Arbeit.

Ansätze zur Bewirtschaftung von Gemeingütern liefern wichtige Beiträge zur grundsätzlichen Herangehensweise bei der Einbeziehung ökologischer Faktoren in betriebliche Planungsprozesse. Betriebliche Umweltmanagementsysteme, freiwillige Selbstverpflichtungen und allgemeines Nachhaltigkeitsstreben sind meist an die in Ziffer 2.2.1 dargestellten Grundzüge angelehnt. Dadurch wird der methodische Rahmen geliefert, jedoch keine konkreten Maßnahmen zur Einbeziehung von ökologischen Faktoren in betriebliche Planungsprozesse angeboten. Problematisch sind außerdem die Durchsetzung von Maßnahmen und eine eventuelle Sanktionierung von Fehlverhalten.

Ein weiterer Ansatz zur Integration von ökologischen Aspekten in betriebliche Planungsprozesse ist die in Ziffer 2.2.2 dargestellte Internalisierung von externen Effekten. Durch bilaterale Verhandlungen zwischen den Akteuren soll das Marktversagen in Bezug auf die Nichterfassung von Umweltwirkungen gelöst werden. Die Schwächen dieses Ansatzes zeigen sich jedoch in der praktischen Umsetzung. Transaktionskosten für die Verhandlung sind in der Praxis oftmals zu hoch, um eine Lösung zu erreichen. Auch andere Ansätze zur Internalisierung externer Effekte wie der Einsatz eines Emissionshandelssystems werden in der Praxis oftmals durch gezielte Eingriffe oder unklare Ausgestaltung von Vertragsdetails in ihrer Wirksamkeit eingeschränkt.

Die in Ziffer 2.2.3 dargestellte Monetarisierung von Umweltwirkungen bietet grundsätzlich Möglichkeiten zur direkten Einbeziehung von ökologischen Aspekten in ökonomisch motivierte betriebliche Entscheidungsprozesse. Die Problematik dieses Ansatzes liegt in der Ungenauigkeit der monetären Bewertung. Auf Grund der Komplexität des zu bewertenden Systems Umwelt sowie einer Vielzahl von globalen, regionalen und lokalen Wechselwirkungen in der Umwelt ist eine objektive, nachvollziehbare und belastbare monetäre Bewertung kaum möglich. Durch die Unsicherheit in der Bewertung wird die Eignung der Methodik zur Entscheidungsunterstützung reduziert.

Die ökologische und soziale Lebenszykluskostenrechnung erlaubt die konsistente ökonomische und ökologische Analyse von Produkten und Prozessen entlang ihres gesamten Lebenszyklus. Wie in Ziffer 2.2.4 dargestellt, ergibt sich durch die übergeordnete Perspektive das Problem einer reduzierten Relevanz der Ergebnisse. Während aus ökologischer Sicht alle während des technischen Lebenszyklus eines Produktes anfallenden Umweltwirkungen für Entscheidungen relevant sind, ist dies für ökonomische Aspekte nicht der Fall. Für jeden Akteur sind insbesondere seine individuellen Kosten und Erlöse relevant. Vor- oder nachgelagerte Kosten und Erlöse können grundsätzlich in Entscheidungen einfließen. Da diese Kosten von anderen Akteuren zu tragen sind, haben sie jedoch nur eine äußerst geringe Bedeutung für die betriebliche Entscheidungsfindung. Durch die übergeordnete Perspektive ergibt sich ein Relevanzverlust der Ergebnisse und die Verwendung der Methodik für die ökologisch-ökonomische Systemanalyse ist eingeschränkt.

Die Ökoeffizienzanalyse nach DIN EN ISO 14045 [27] ist in Ziffer 2.2.5 dargestellt. Durch die Gegenüberstellung von ökologischen und ökonomischen Aspekten von Produkten ist sie ein wirksames Instrument zur betrieblichen Entscheidungsunterstützung. Durch den Bezug auf Produkte ist es jedoch nur möglich, funktionsäquivalente Systeme direkt zu vergleichen. Eine Analyse des betrieblichen Gesamtsystems ist nicht möglich, da keine Zielvorgaben aus dem Umweltmanagement in die Betrachtung einbezogen werden können.

Tabelle 2-7 gibt auf Basis der im Hinblick auf die Fragestellung dieser Arbeit erarbeiteten Stärken und Schwächen einen Überblick über bestehende Ansätze. Es wird ersichtlich, dass keiner der existierenden Ansätze alle Anforderungen erfüllt. Die Ökoeffizienzanalyse kommt der Erfüllung der gestellten Anforderungen am nächsten, ist jedoch durch den Produktbezug und die Beschränkung auf den Vergleich von funktionsäquivalenten Produkten in ihrer Anwendbarkeit eingeschränkt. Durch den fehlenden Bezug zu übergeordneten Unternehmenszielen, wie beispielsweise betrieblichen Umweltzielen, ist die in Ziffer 2.2.5 dargestellte Ökoeffizienzanalyse zum Vergleich von Produkten und Produktalternativen geeignet, kann jedoch nur eingeschränkt zum betrieblichen Umweltmanagement beitragen und ist nicht zu einer stärkeren Einbeziehung von ökologischen Aspekten in betriebliche Planungsprozesse geeignet.

Es besteht somit Forschungsbedarf für die Entwicklung eines neuen Verfahrens zur systematischen Zusammenführung von produktbezogenen ökologischen und ökonomischen Aspekten mit betrieblichen Zielvorgaben.

Tabelle 2-7: Beurteilung bestehender Ansätze im Hinblick auf ihre Anwendungspotentiale bezüglich der gestellten Anforderungen.

Bestehende Ansätze								
Ansatz	Anforderungen							
	Quantifizierung von Umweltwirkungen	Lebenszyklusbezug	Ökologische Entscheidungsunterstützung	Ökonomische Entscheidungsunterstützung	Betrachtung Ökologie & Ökonomie	Organisationsspezifische Betrachtung	Objektivität	Bezug zu Unternehmenszielen
LCA	✓	✓	✓	(✓)	✗	(✓)	✓	(✓)
LCC (konventionell)	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✓	(✓)
E-LCC	(✓)	✓	✓	(✓)	✓	✗	✓	(✓)
Internalisierung externer Effekte	(✓)	(✓)	(✓)	✓	(✓)	✗	(✓)	✗
Monetarisierung von Umwelteffekten	✓	(✓)	✓	(✓)	(✓)	✗	(✓)	✗
Bewirtschaftung von Gemeingütern	✗	(✓)	(✓)	(✓)	✗	(✓)	(✓)	✗
Ökoeffizienzanalyse	✓	✓	✓	(✓)	✓	(✓)	✓	(✓)
Legende	✓ : Möglich und angewandt (✓) : Eingeschränkt möglich ✗ : Nicht möglich							

3 Anforderungen an die zu entwickelnde Methode

Aufbauend aus den in Ziffer 2.3 dargestellten Stärken und Schwächen existierender Ansätze und Methoden werden in Ziffer 3.1 und Ziffer 3.2 die methodischen und praktischen Anforderungen an die Methode formuliert. Sie sind die Grundlage für die Evaluierung der Methode in Ziffer 6.

3.1 Methodische Anforderungen

Die methodischen Anforderungen definieren den Rahmen für die allgemeine Gültigkeit und Übertragbarkeit der Methode. Diese sind:

- Anschlussfähigkeit an die Methode der Ökobilanz

Die Anwendung der EcoPlex-Methode muss auf Basis von Ökobilanzergebnissen erfolgen. Dies stellt die Objektivität und Belastbarkeit der Eingangswerte sicher.

- Konsistenter Betrachtungsrahmen

Die erhobenen ökologischen und ökonomischen Faktoren müssen den gleichen Betrachtungsrahmen aufweisen. Dies ist die Voraussetzung für eine Vergleichbarkeit verschiedener Produkte oder Dienstleistungen.

- Quantifizierte Zielvorgaben

Quantifizierte Zielvorgaben müssen beispielsweise aus dem betrieblichen Umweltmanagementsystem vorhanden und mit den Ergebnissen der LCA kombinierbar sein. Damit wird sichergestellt, dass für relevante Zielwerte die entsprechenden Umweltwirkungen mittels einer LCA berechnet werden können.

- Fortschreibbarkeit der Eingangsdaten

Die Datengrundlage muss so gewählt werden, dass eine Fortschreibung der Daten möglich ist. Dies erlaubt die fortwährende Durchführung der EcoPlex-Methode über mehrere Perioden hinweg.

- **Transparenz und Reproduzierbarkeit**

Ergebnisse und einzelne Schritte der Methode müssen nachvollziehbar und überprüfbar sein. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist Voraussetzung für eine kontinuierliche Fortschreibung der Ergebnisse.

3.2 Praktische Anforderungen

Die praktischen Anforderungen an die Methode betreffen vor allem die Anwendung der Methode sowie die Verwendung der Ergebnisse:

- **Datenverfügbarkeit**

Die Verfügbarkeit von Eingangsdaten für Ökobilanz, Deckungsbeitragsrechnung sowie ökologischen Zielwerten ist Voraussetzung für die Anwendung der EcoPlex-Methode. Aus praktischer Sicht ist die Datenverfügbarkeit deshalb ein wichtiges Kriterium für die Anwendbarkeit der Methode. Idealerweise werden Daten herangezogen, die bereits im Unternehmen erhoben werden, um den zusätzlichen Aufwand für die Datensammlung zu reduzieren. Diese können beispielsweise aus dem betrieblichen Berichtswesen oder aus technischen, ökologischen oder ökonomischen Berichten entnommen werden. Gemessene Werte sind dabei zu bevorzugen. Falls dies nicht möglich ist, können Durchschnittswerte herangezogen werden, alternativ auch Literaturwerte oder durch den Anwender der Methode geschätzte Werte.

- **Detailltiefe**

Der Detaillierungsgrad der Untersuchung muss in Abhängigkeit von Ziel und Untersuchungsgegenstand flexibel sein, um so umfassende Anwendungsfelder zu eröffnen. Im Rahmen der EcoPlex-Analyse ist die Detailtiefe einheitlich zu gestalten, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu steigern.

- **Fortschreibbarkeit der Ergebnisse**

Die Ergebnisse der EcoPlex-Methode müssen über mehrere Perioden hinweg fortschreibbar sein. Dies ist die Voraussetzung für einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess und somit Voraussetzung für die Einbindung der EcoPlex-Methode in das betriebliche Umweltmanagementsystem.

4 Methodenentwicklung

Aufbauend auf den in Ziffer 2 erarbeiteten methodischen Grundlagen sowie den in Ziffer 3 formulierten Anforderungen an die Methode wird diese in den folgenden Abschnitten entwickelt.

4.1 Methodischer Ansatz – EcoPlex

Der methodische Ansatz der EcoPlex-Methode umfasst die Erarbeitung des Konzepts (Ziffer 4.1.1), die Festlegung des Untersuchungsrahmens (Ziffer 4.1.2), den Strukturrahmen (Ziffer 4.1.3) sowie den Aufbau und das Konzept der EcoPlex-Methode (Ziffer 4.1.4).

4.1.1 Konzept

Die EcoPlex-Methode zielt auf eine systematische Einbeziehung von Umweltwirkungen in organisatorische Planungsprozesse ab. Der methodische Ansatz basiert dabei auf einem Mischansatz gemäß [86], der sowohl Elemente eines bottom-up als auch eines top-down Ansatzes beinhaltet, wie in Bild 4-1 schematisch dargestellt.

Die Analyse von Umweltwirkungen mittels einer LCA stellt eine bottom-up-Analyse dar. Stoff- und Energieflüsse von Produkten und Dienstleistungen werden detailliert erhoben und im Hinblick auf die verursachten Umweltwirkungen ausgewertet. Die Analyse ökonomischer Aspekte erfolgt analog zur Bestimmung der Umweltwirkungen bottom-up. Im Rahmen der organisatorischen Planung werden von übergeordneten Stellen Zielvorgaben ausgegeben. Diese können auf ökonomische Größen bezogen sein, wie Umsatz- oder Wachstumsziele, oder auf ökologische Größen, wie etwa Emissionsobergrenzen. Die Definition von Zielen folgt somit einem top-down Ansatz.



Bild 4-1: Schematische Einordnung des methodischen Ansatzes.

4.1.2 Untersuchungsrahmen

Die Festlegung des Untersuchungsrahmens ergibt sich aus dem Ziel der Methodik zur Entwicklung eines systematischen Ansatzes zur ökologisch-ökonomischen Systemanalyse sowie den in Ziffer 3 definierten Anforderungen an die Methode.

Zentraler Bestandteil der Methode sind die aus der Ökobilanz berechneten ökologischen Wirkungen von Produkten oder Prozessen. Die Systemgrenzen der Methode sind in Ziffer 4.2 detailliert dargestellt.

Die Methode kann grundsätzlich auf alle Fragen der ökologisch-ökonomischen Systemanalyse angewandt werden. Voraussetzung ist die klare Auftrennung in einzelne Produktgruppen oder Serviceleistungen sowie die Identifikation der jeweiligen ökologischen und ökonomischen Charakteristika der betrachteten Produkte und Dienstleistungen und die Festlegung von quantitativen ökologischen Zielvorgaben. Bei sich dynamisch ändernden Prozessen, wie etwa Logistikprozesse mit sich durch Änderungen der Auslastung ändernden Umwelt- und Kostenprofilen, müssen geeignete Mittelwerte gebildet werden.

4.1.3 Strukturrahmen

Die Struktur der EcoPlex-Methode ist in Bild 4-2 schematisch dargestellt.

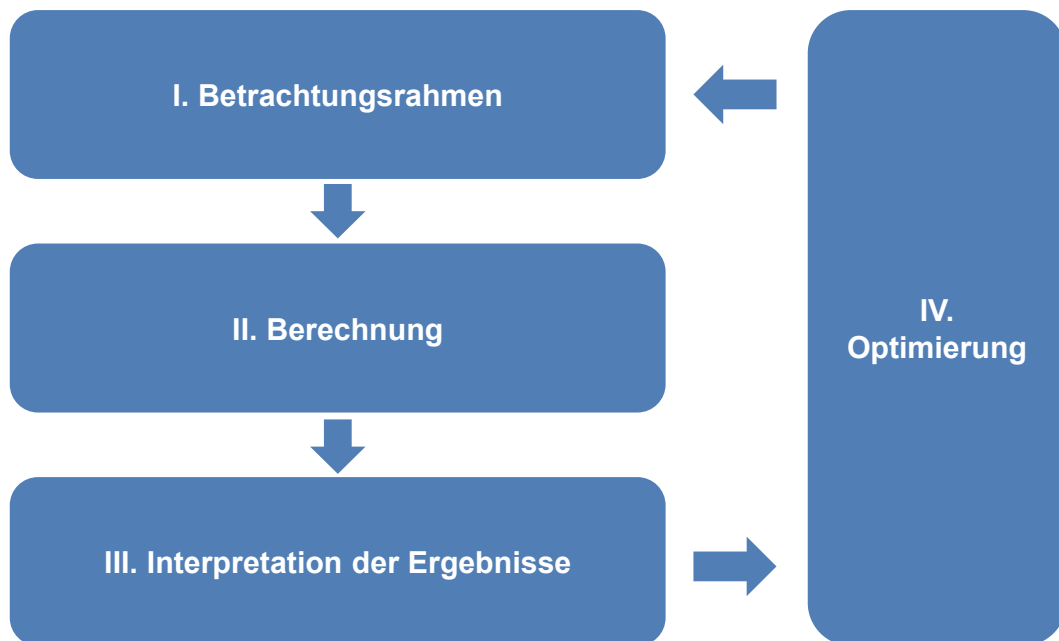


Bild 4-2: Schematische Darstellung des Strukturrahmens der Methode.

Übergeordnetes Ziel der Methode ist die Zusammenführung ökologischer und ökonomischer Faktoren zu einem einheitlichen Bewertungssystem in Unternehmen. Hierdurch wird die Relevanz von ökologischen Aspekten für Planungs- und Entscheidungsprozesse erhöht. Das Vorgehen der EcoPlex-Methode ist dabei an das Vorgehen der Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 angelehnt [25].

Im ersten Schritt werden Ziel und Untersuchungsrahmen der Analyse festgelegt. Im zweiten Schritt werden dann mittels Deckungsbeitragsrechnung ökonomische und durch Ökobilanzierung ökologische Eingangswerte berechnet und in einem Gleichungssystem zusammengeführt und mit Hilfe des Simplex-Algorithmus gelöst (Berechnung). Im dritten Schritt werden die so erhaltenen Ergebnisse interpretiert und technische oder organisatorische Maßnahmen abgeleitet. Die abgeleiteten Maßnahmen werden dann im vierten Schritt (Optimierung) auf ihre Auswirkungen in Bezug auf das Gesamtsystem untersucht und liefern somit einen Beitrag zur Entscheidungsunterstützung.

Die Methode ist iterativ aufgebaut, nach der Optimierung werden Ziel und Untersuchungsrahmen gegebenenfalls angepasst und die einzelnen Schritte erneut durchlaufen. Somit wird die Fortschreibbarkeit der Methode sichergestellt und die Ergebnisse können als Grundlage für einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess herangezogen werden. Der Aufbau der Methode wird in Ziffer 4.1.4 im Detail erläutert.

4.1.4 Aufbau

Im Folgenden wird der Ablauf der in dieser Arbeit entwickelten Methode erläutert und detailliert beschrieben. Die einzelnen Schritte sind in Bild 4-3 schematisch dargestellt.

Danach ist die EcoPlex-Methode in vier Hauptschritte unterteilt. Der erste Schritt ist die in Ziffer 4.2 beschriebene Festlegung des Betrachtungsrahmens (Schritt I). Dies umfasst die Zieldefinition, die Definition des Untersuchungsrahmens sowie die Auswahl der Umweltwirkungskategorien und der ökonomischen Kenngrößen. Im Rahmen der in Ziffer 4.3 dargestellten Berechnung in Schritt II werden ökologische und ökonomische Kenngrößen quantifiziert. Basierend darauf werden die Zielfunktion aufgestellt sowie Restriktionen festgelegt und anschließend der Simplex-Algorithmus angewandt. Bei der in Ziffer 4.4 beschriebenen Interpretation der Ergebnisse (Schritt III) werden Schwachstellen identifiziert und analysiert, ein Budget für Maßnahmen abgeleitet sowie die Schattenpreise berechnet. Auf Grundlage dieser Informationen werden anschließend Maßnahmen abgeleitet. Die abgeleiteten Maßnahmen werden im Rahmen der in Ziffer 4.5 dargestellten Optimierung (Schritt IV) auf ihre Wirkung im Hinblick auf das Gesamtsystem beurteilt. Der methodische Aufbau der EcoPlex-Methode ist dabei an das Vorgehen der Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 [25] angelehnt. Anschließend werden gegebenenfalls Ziel und Untersuchungsrahmen angepasst, beispielsweise durch eine weitere Verschärfung der ökologischen Zielvorgaben, und die einzelnen Schritte der Methode erneut durchlaufen. Die einzelnen Schritte der EcoPlex-Methode werden im Folgenden detailliert dargestellt.

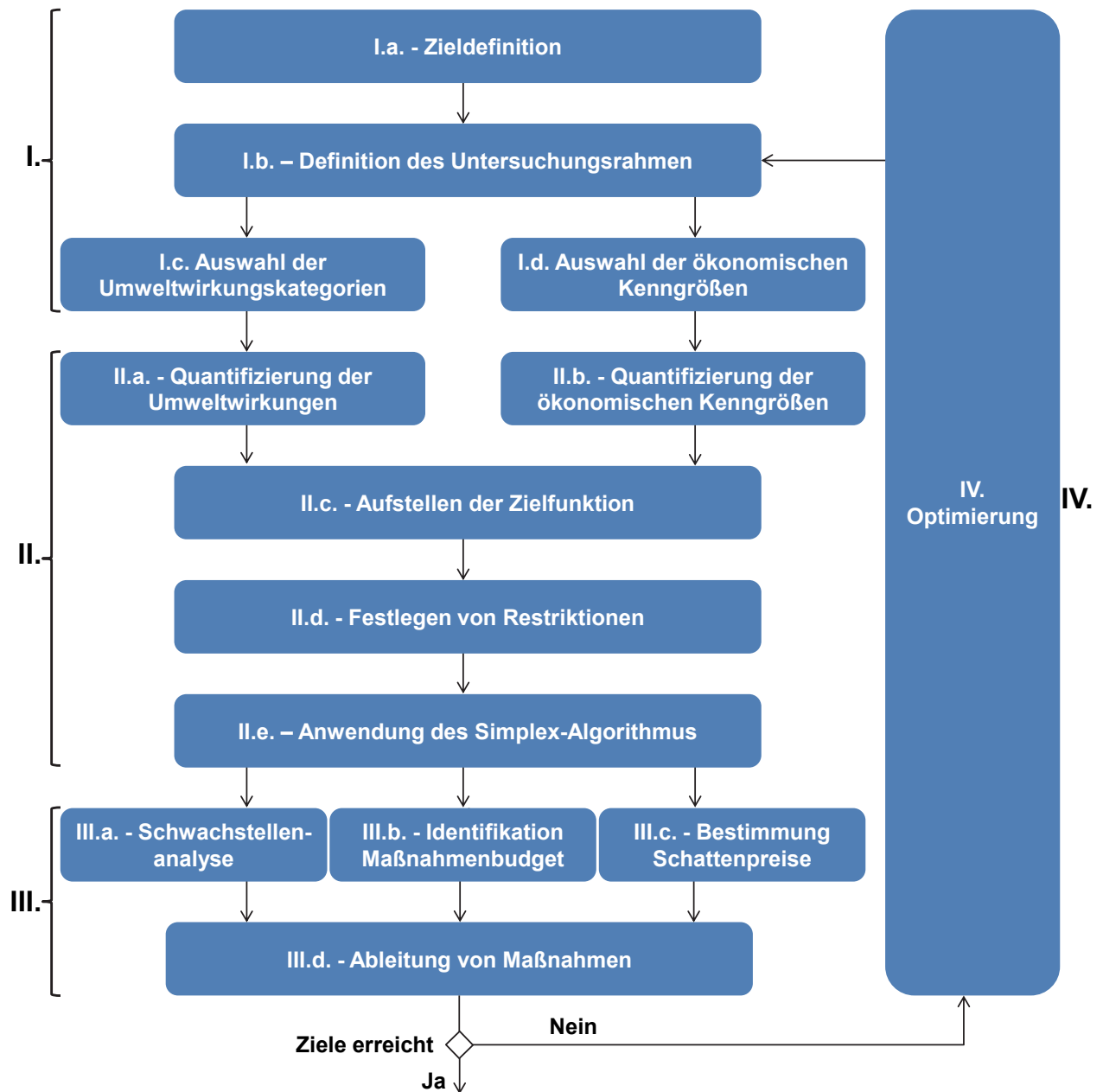


Bild 4-3: Schematische Darstellung des Ablaufplans der EcoPlex-Methode.

Die EcoPlex-Methode basiert auf den in Ziffer 2.1 dargestellten Grundlagen, insbesondere der Ökobilanz, der Deckungsbeitragsberechnung sowie dem Simplex-Algorithmus. Diese etablierten Methoden werden im Rahmen der EcoPlex-Methode zusammengeführt und somit eine Verknüpfung der Disziplinen Ingenieur- und Umweltwissenschaften (Ökobilanz) und Betriebswirtschaftslehre (Deckungsbeitragsrechnung) hergestellt. Eine Neuerung ist die Harmonisierung der Anforderungen zwischen ökologischen und ökonomischen Zielen. Diese be-

zieht sich auf die Referenzeinheit, die Systemgrenzen und den Untersuchungsrahmen der jeweiligen Disziplinen. Aus den übergeordneten Zielen der Unternehmensführung werden ökologische und ökonomische Ziele abgeleitet, die harmonisiert werden und dann in eine Zielfunktion sowie mehrere Restriktionen überführt werden. Die Zielfunktion wird anschließend unter Einhaltung der Restriktionen mit Hilfe des Simplex-Algorithmus gelöst. Die Ergebnisse werden interpretiert und darauf basierend Maßnahmen abgeleitet. Werden die vorgegebenen Ziele erreicht, wird die EcoPlex-Methode beendet, andernfalls wird eine erneute Iteration durchlaufen. Dieses Vorgehen ist in Bild 4-4 dargestellt.

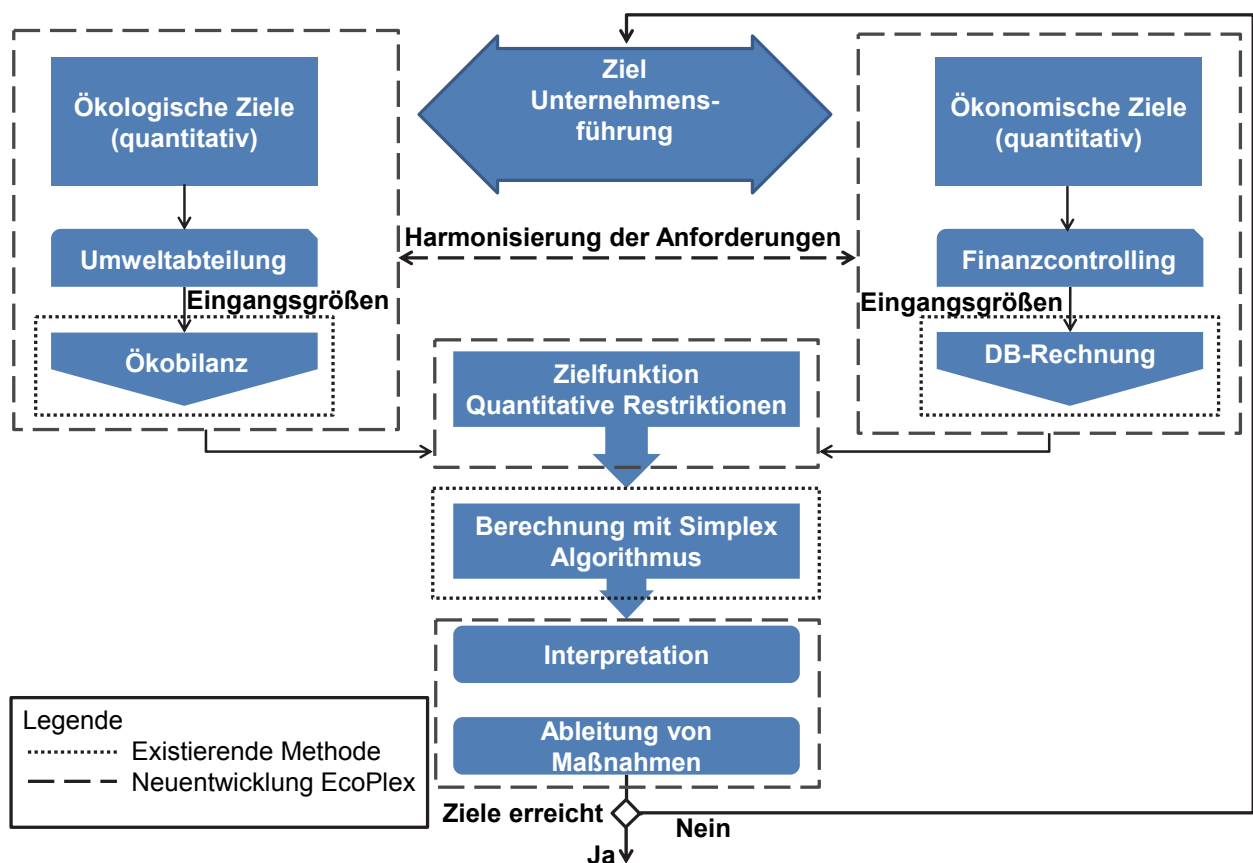


Bild 4-4: Schematischer Ablauf und Neuerungen der EcoPlex-Methode.

Die bei der Anwendung der EcoPlex-Methode beteiligten Unternehmensbereiche und ihre Beiträge sind in Bild 4-5 dargestellt. Dabei wird der unternehmensweite Bezug der Methode ersichtlich.

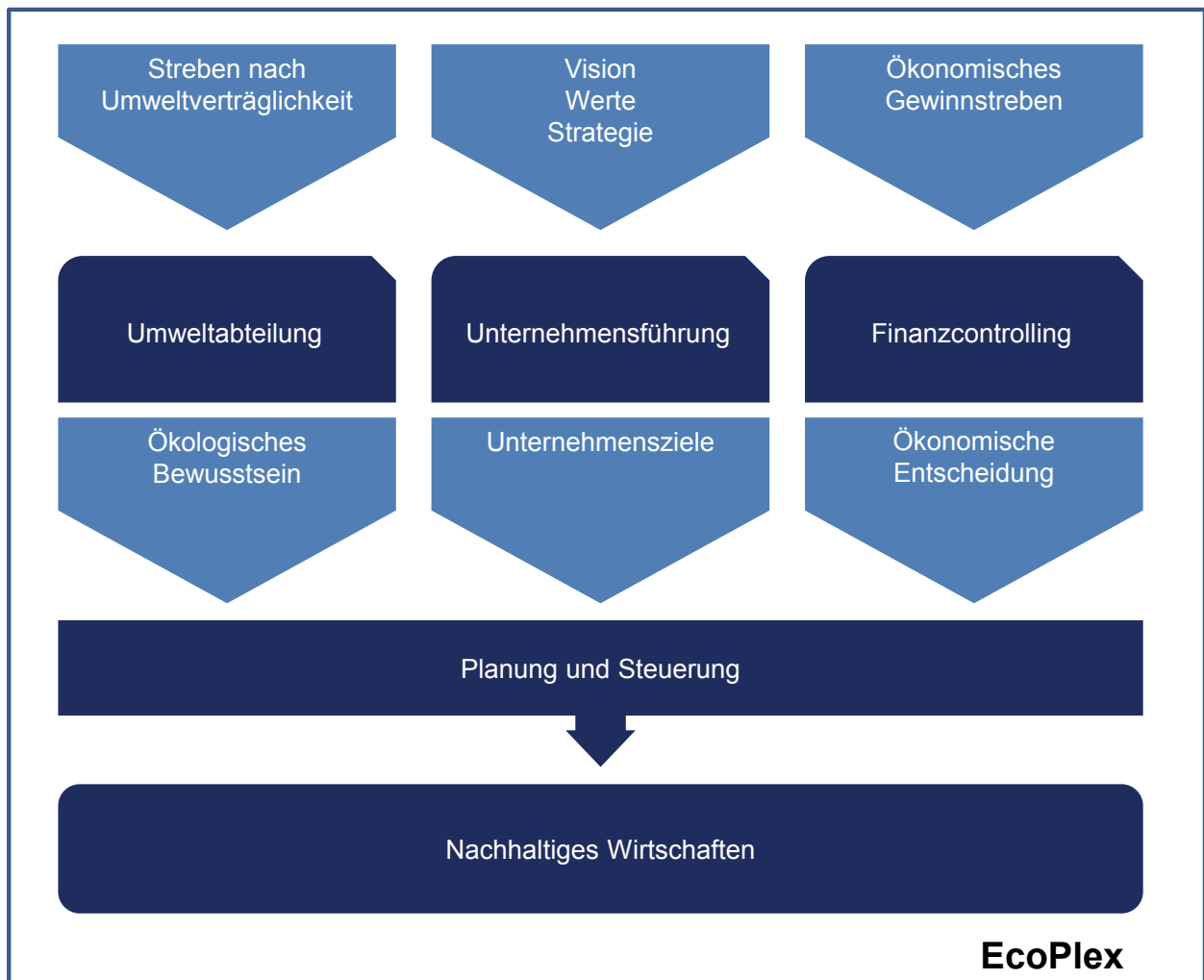


Bild 4-5: Darstellung der an der Anwendung der EcoPlex-Methode beteiligten Unternehmensbereiche.

Im Rahmen der EcoPlex-Methode werden die Aktivitäten von drei unterschiedlichen Unternehmensbereichen unter dem übergeordneten Ziel des nachhaltigen Wirtschaftens zusammengeführt:

- Umweltabteilung, wird vom Streben nach Umweltverträglichkeit getrieben und schafft ein ökologisches Bewusstsein im Unternehmen.
- Unternehmensführung, definiert Visionen und Werte und beeinflusst dadurch die Auswahl von als relevant erachteten Umweltzielen.
- Finanzcontrolling, trifft vor dem Hintergrund des ökonomischen Gewinnstrebens des Unternehmens ökonomisch motivierte Entscheidungen.

Diese unterschiedlichen Perspektiven werden im Rahmen von Planungs- und Steuerungsprozessen vor dem übergeordneten Ziel des nachhaltigen Wirtschaftens zusammengeführt.

4.2 Betrachtungsrahmen

Der übergeordnete Betrachtungsrahmen auf systemischer Ebene wird im ersten Schritt der EcoPlex-Methode festgelegt.

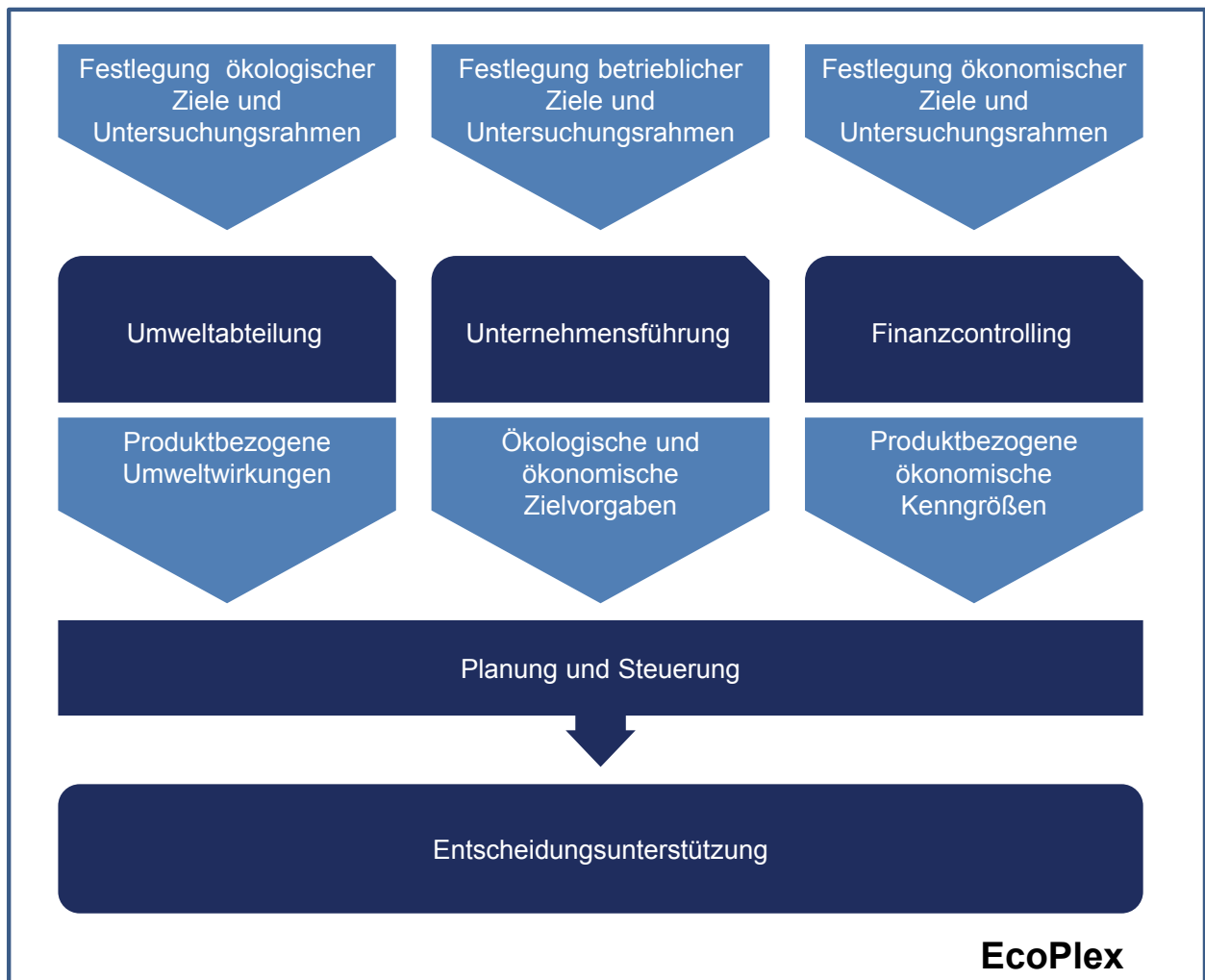


Bild 4-6: Schematische Darstellung des Betrachtungsrahmens der Methode.

Dies umfasst die Zieldefinition, Festlegung des Untersuchungsrahmens, die Festlegung der zu untersuchenden Umweltwirkungen sowie die Identifikation der relevanten ökonomischen Kenngrößen. Auch die geplante Nutzung der Ergeb-

nisse muss in diesem Schritt vorgesehen werden. Bild 4-6 stellt die Festlegung des Betrachtungsrahmens dar. Produktbezogene Umweltwirkungen und ökonomische Kenngrößen werden in Bezug zu Zielvorgaben der Unternehmensführung gesetzt. Ziel ist dabei die systematische Entscheidungsunterstützung.

4.2.1 Untersuchungsziel

Das Ziel der Untersuchung hat Auswirkungen auf die zu erfassenden Daten, den Untersuchungsrahmen, die Auswahl der zu betrachtenden Größen und damit auf alle nachfolgenden Schritte.

Grundlegende Untersuchungsziele für die EcoPlex-Methode sind

- die Überprüfung des aktuellen Unternehmensportfolios auf dessen ökologisch-ökonomische Performance und somit die Identifikation von Schwachstellen,
- die Identifikation von Kosten für eine angestrebte Reduktion von Umweltwirkungen und daraus abgeleitet ein Maßnahmenbudget, sowie
- die monetäre Bewertung von ökologischen Faktoren durch die Bestimmung von Schattenpreisen.

Weiterhin sind eine Beurteilung von technischen und organisatorischen Maßnahmen sowie Untersuchungen zu den Auswirkungen von unterschiedlichen ökologischen, ökonomischen und technischen Zielvorgaben möglich.

4.2.2 Untersuchungsrahmen

Die Festlegung des Untersuchungsrahmens erfolgt analog zum Vorgehen bei der Ökobilanzierung. Der Untersuchungsrahmen ist auf Produktebene angesiedelt und umfasst insbesondere die Definition der Referenzeinheit, die Systemgrenzen sowie die verwendeten Datenquellen.

Die Referenzeinheit ist eine quantifizierte Größe, auf die sich die mittels einer Ökobilanz errechneten Umweltwirkungen sowie die ökonomischen Größen beziehen. Ähnlich der funktionellen Einheit bei der Ökobilanz gibt die Referenzeinheit einen quantifizierten Nutzen eines Produktes oder einer Dienstleistung an [25]. Die Referenzeinheit muss skalierbar sein und bei entsprechender Skalie-

rung die Tätigkeiten eines Unternehmens widerspiegeln. Durch die Betrachtung von Unternehmen können grundsätzlich bei unterschiedlichen Produktgruppen oder Dienstleistungen verschiedene Referenzeinheiten auftreten.

Die Systemgrenzen legen fest, welche Aspekte in die Betrachtung einfließen. Zu Grunde liegende Annahmen, Abschneidekriterien sowie zeitliche, geographische oder organisatorische Restriktionen sind festzulegen. Die für die Untersuchung herangezogenen Datengrundlagen sind entscheidend für die Qualität und damit für die Aussagekraft der durchgeführten Analyse. Die Qualität der Daten ist dabei in absteigender Reihenfolge wie folgt zu beurteilen:

- Gemessene Daten (Primärerhebung), z.B. gemessener Energiebedarf,
- Berechnete Werte, z.B. Energiebedarf aus Nennleistung und Betriebsdauer oder Durchschnittswerte,
- Werte aus der Literatur,
- Abschätzungen.

Je besser die Qualität der Daten, desto größer ist die Aussagekraft der Analyse. Zielvorgaben in Bezug auf ökologische Größen sind festzulegen. Dies kann beispielsweise durch Zielvorgaben aus dem betrieblichen Umweltmanagement erfolgen. Neben den durch eine Ökobilanz berechneten Umweltwirkungen wie etwa GWP, AP, EP und POCP können auch andere Aspekte wie beispielsweise Abfallmenge oder Wasserverbrauch in die Betrachtung einbezogen werden. Grundvoraussetzung für die Betrachtung ist eine quantitativ festgelegte Obergrenze je Umweltwirkungskategorie sowie die quantifizierten Beiträge jedes Produktes je Referenzeinheit zu den Umweltwirkungen.

4.2.3 Auswahl der Umweltwirkungskategorien

In Anlehnung an die Anforderungen an die Durchführung einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 [25] sind auch für die EcoPlex-Methode die zu untersuchenden Umweltwirkungen festzulegen. Dabei wird in der Regel, wie in Ziffer 2.1.1 dargestellt, auf etablierte und wissenschaftlich begründete Wirkungskategorien zurückgegriffen. Grundsätzlich ist auch die Einbeziehung anderer Umweltwirkungen oder Einzelemissionen möglich.

Ökologische Zielvorgaben werden aus dem Umweltmanagement oder aus gesetzlichen Vorgaben abgeleitet. Die ökologischen Ziele repräsentieren, wie in Ziffer 2.1.3 dargestellt, die gesellschaftliche und ökologische Verantwortung des Unternehmens. Gleichzeitig sollen sie auch dazu beitragen das Unternehmen nachhaltig zu entwickeln und damit langfristig den Bestand und wirtschaftlichen Erfolg des Unternehmens sicherzustellen. Die Auswahl ökologischer Zieldimensionen sowie ihre quantitative Restriktion ist somit eine Operationalisierung der Unternehmenswerte und -ziele. Die Berechnung der Umweltwirkungen erfolgt mit der in Ziffer 2.1.1 dargestellten Methode der Ökobilanz. Durch die Verwendung der standardisierten Methode der LCA wird die Belastbarkeit und Objektivität der berechneten Umweltwirkungen sichergestellt. Die Berechnung der Umweltwirkungen erfolgt auf Basis von Massen- und Energiestrommodellen. Die Belastbarkeit der erhaltenen Ergebnisse ist eine wichtige Voraussetzung für die EcoPlex-Methode, da diese direkt in den der EcoPlex-Methode zu Grunde liegenden Algorithmus einfließen. Die Umweltwirkungen haben somit einen direkten Einfluss auf die Resultate der EcoPlex-Methode.

Die ausgewählten Umweltwirkungen müssen in direktem Bezug zur festgelegten Referenzeinheit stehen. Es ist ein Umweltprofil mit den Beiträgen zu allen betrachteten Umweltwirkungen je Referenzeinheit zu erstellen.

4.2.4 Auswahl ökonomischer Kenngrößen

Im Rahmen der EcoPlex-Methode erfolgt die Betrachtung von ökologischen und ökonomischen Aspekten. Neben den zur Quantifizierung der Umweltwirkungen benötigten Daten müssen daher auch ökonomische Eingangsgrößen festgelegt und erhoben werden.

Die in der EcoPlex-Methode verwendete ökonomische Kenngröße ist gleichzeitig die Zielgröße für die später folgende Berechnung und Optimierung. Die Auswahl der ökonomischen Kenngröße ist somit von zentraler Bedeutung und erfolgt in enger Abstimmung mit der die Untersuchung durchführenden Organisation. Durch die Verwendung von etablierten Kenngrößen kann der Aufwand für die Datensammlung reduziert werden, gleichzeitig ist die Interpretation der Ergebnisse leichter verständlich.

Grundsätzlich ist eine Vielzahl ökonomischer Kenngrößen als Eingangsgröße denkbar. Für die operative Planung wird in der Betriebswirtschaft auf den Deckungsbeitrag zurückgegriffen. Der Deckungsbeitrag (DB) berechnet sich aus den Stückerlösen eines Produktes oder einer Dienstleistung abzüglich der variablen Stückkosten. Der Begriff Deckungsbeitrag leitet sich dabei aus dem produktspezifischen Beitrag jedes Produktes zur Deckung der mit der Herstellung zusammenhängenden Fixkosten ab. Ist der DB positiv, trägt ein Produkt zur Deckung von Fixkosten bei; nach Deckung der Fixkosten zum Gewinn. Durch die Einbeziehung von Erlösen und Kosten bietet der DB einen vollständigeren Blick auf den Beitrag zum Unternehmenserfolg als eine reine Kosten- oder Erlösbeurteilung. Wie in Ziffer 2.1.2 dargestellt, wird der DB auch als Schlüsselgröße der kurzfristigen Produktionsprogrammplanung bezeichnet.

Für die EcoPlex-Methode wird die Verwendung des DB als ökonomische Kenngröße festgelegt. Für die Anwendung der EcoPlex-Methode ist ein analoger Betrachtungsrahmen für ökologische und ökonomische Größen wichtig. Die im Rahmen der Deckungsbeitragsrechnung betrachteten Erlöse und Kosten müssen denselben Betrachtungsrahmen wie die Analyse der Umweltwirkungen haben. Der Deckungsbeitrag ist je Referenzeinheit anzugeben. Das in Ziffer 4.2.3 erläuterte Umweltprofil wird somit um eine ökonomische Größe erweitert.

4.3 Berechnung

Im Rahmen der Berechnung werden zunächst die ökologischen und ökonomischen Eingangsgrößen quantifiziert. Der Datenbedarf und die erzeugten Ergebnisse sind schematisch in Bild 4-7 dargestellt. Die Eingangsgrößen werden dann in eine Zielfunktion übertragen, welche zusammen mit den festgelegten Restriktionen in den Simplex-Algorithmus einfließen. Anschließend wird der Simplex-Algorithmus iterativ durchgeführt, bis eine pareto-optimale Allokation der zur Verfügung stehenden Ressourcen gegeben ist.

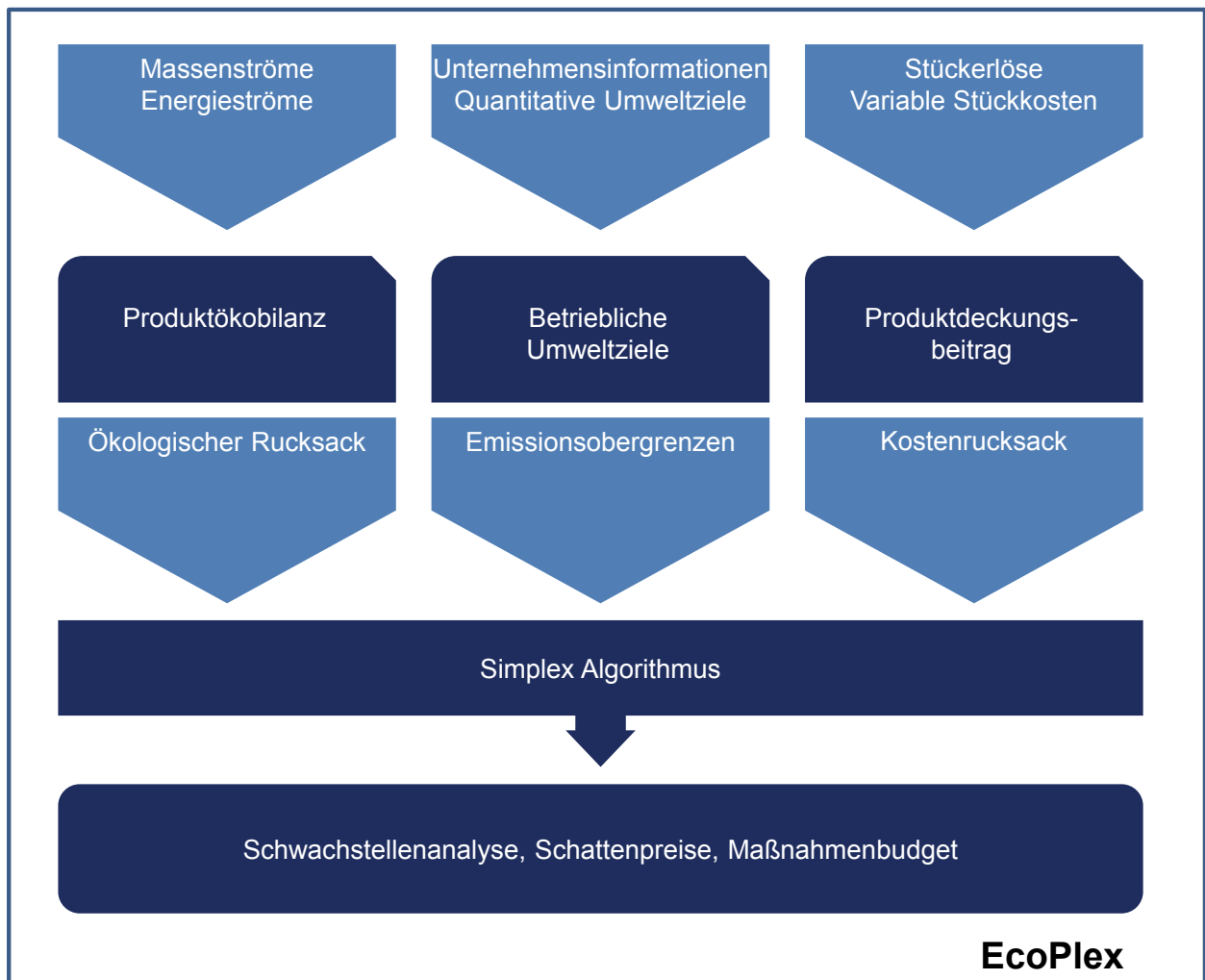


Bild 4-7: Schematische Darstellung des Datenbedarfs und der mit der EcoPlex-Methode erzeugten Ergebnisse.

Bild 4-7 stellt dar, welche Daten für die Durchführung der Berechnung benötigt und welche Ergebnisse mit der Methode generiert werden. Mit Hilfe der Ökobilanz und der Deckungsbeitragsrechnung werden Umwelt- und Kostenprofile der betrachteten Produkte erzeugt und in Bezug zu berechneten oder festgelegten Emissionsobergrenzen gesetzt. Anschließend wird das System mit Hilfe des Simplex-Algorithmus analysiert.

4.3.1 Quantifizierung der Umweltwirkungen

Der Quantifizierung der Umweltwirkungen kommt durch deren Funktion als Eingangsgrößen für die EcoPlex-Methode eine große Bedeutung zu. Hierzu wird

auf die Methode der Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 [25] und DIN EN ISO 14044 [26] zurückgegriffen. Wie in den vorherigen Abschnitten erläutert, werden im Rahmen der zuvor festgelegten Systemgrenzen Daten erhoben und darauf basierend ein Massen- und Energiemodell erstellt. Dieses Modell wird dann im Hinblick auf die zuvor festgelegten Umweltwirkungen ausgewertet. Das Vorgehen zur Erstellung von Ökobilanzen ist in Ziffer 2.1.1 dargestellt.

Als funktionelle Einheit der ökobilanziellen Betrachtung wird die zuvor festgelegte Referenzeinheit herangezogen. Die Referenzeinheiten sind so zu wählen, dass die Summe der Referenzeinheiten die Gesamtfunktion des Unternehmens darstellt. Alle erhobenen Umweltwirkungen beziehen sich auf die Referenzeinheit.

Die Ökobilanz wird als Methode zur Quantifizierung der Umweltwirkungen von Produkten und Dienstleistungen eingesetzt. Basierend auf den Massen- und Energieflüssen werden die Umweltwirkungen je funktioneller Einheit berechnet. Durch Multiplikation dieses ökologischen Rucksacks mit der Ausbringungsmenge jedes Produktes werden die Gesamtumweltwirkungen dieses Produktes berechnet. Nach der Erstellung von Ökobilanzen für alle Produkte und Dienstleistungen werden die Ergebnisse mit der jeweiligen Ausbringungsmenge multipliziert. Gegebenenfalls müssen betriebliche Querschnittsfunktionen wie etwa Personalwesen oder Verwaltung in einer zusätzlichen Ökobilanz erfasst werden, falls sie einen relevanten Beitrag zu den Umweltwirkungen haben. Anschließend lassen sich die gesamten Umweltwirkungen des Unternehmens in Abhängigkeit der angebotenen Produkte und Dienstleistungen darstellen.

4.3.2 Quantifizierung der ökonomischen Kenngrößen

Analog zur Durchführung der Ökobilanzierung werden die zuvor ausgewählten ökonomischen Kenngrößen quantifiziert. Basierend auf den Anforderungen aus Ziffer 4.2.4 ist der Deckungsbeitrag zu verwenden. Er wird berechnet aus den Erlösen eines Produktes abzüglich der vom Produkt verursachten variablen Kosten. Auch der Deckungsbeitrag wird in Bezug zur Referenzgröße gesetzt, die ökonomische Kenngröße ist somit der in Gleichung (9) berechnete Stückdeckungsbeitrag je Referenzeinheit.

$$DB_i = R_i - k_{v,i} \quad [\text{€}] \quad \text{für } i=1, \dots, n \quad (9)$$

mit

DB_i : Deckungsbeitrag von Produkt i [€]

R_i : Erlöse von Produkt i [€]

$k_{v,i}$: Variable Kosten von Produkt i [€].

Die variablen Kosten $k_{v,i}$ beinhalten dabei insbesondere die Kosten für Materialien und Energie, gegebenenfalls erweitert um Gemeinkosten. Durch den identischen Betrachtungsrahmen von Produktökobilanz und DB wird die Konsistenz von ökonomischen und ökologischen Aspekten sichergestellt, was Grundvoraussetzung für eine konsistente ökologisch-ökonomische Analyse ist.

4.3.3 Aufstellen der Zielfunktion

Die Zielfunktion beschreibt den Beitrag einzelner Produkte oder Dienstleistungen zum Gesamtergebnis. Für die EcoPlex-Methode ist mit dem Deckungsbeitrag eine ökonomische Kenngröße als Zielgröße festgelegt. Grundlage dafür ist die in Ziffer 2.1.2 dargestellte Annahme, dass Unternehmen vorrangig an ökonomischem Erfolg interessiert sind und somit ökonomische Größen auch im Fokus von Planungs- und Optimierungsmaßnahmen stehen. Durch den Fokus auf die Maximierung des Deckungsbeitrags repräsentiert die Zielfunktion das übergeordnete ökonomische Gewinnstreben des Unternehmens.

Für die EcoPlex-Methode werden die Deckungsbeiträge aller Produkte und Dienstleistungen im Unternehmen in einer Funktion zusammengefasst. Das Ziel ist eine Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags. Dieser berechnet sich aus der Summe der in Ziffer 4.3.2 berechneten Deckungsbeiträge. Somit ergibt sich die in Gleichung (10) dargestellte Formel

$$DB = \max! \sum_{i=1}^n a_i \cdot DB_i \quad [€] \quad \text{für } i=1, \dots, n \quad (10)$$

mit

a_i : Ausbringungsmenge von Produkt i [-]

DB_i : Deckungsbeitrag von Produkt i [€].

Der Gesamtdeckungsbeitrag beinhaltet dabei die Kosten und Erlöse aller Produkte und Dienstleistungen innerhalb des Betrachtungsrahmens der Analyse. Die in Gleichung (10) dargestellte Berechnung enthält daher alle im Betrachtungsrahmen enthaltenen Kosten und Erlöse des Unternehmens. Ein höherer Gesamtdeckungsbeitrag führt nach der Deckung der Fixkosten zu höheren Gewinnen und trägt somit gemäß den Annahmen in Ziffer 2.1.2 zur Zielerfüllung des Unternehmens bei.

4.3.4 Festlegen der Restriktionen

Nach dem Aufstellen der Zielfunktion sind Restriktionen festzulegen. Diese können beispielsweise ökologischer, technischer, organisatorischer oder rechtlicher Art sein. Wie in Ziffer 2.1.3 dargestellt, handelt es sich dabei um Faktoren, die den maximal möglichen Output beschränken. Im Rahmen des EcoPlex werden Restriktionen aus Vorgaben des betrieblichen Umweltmanagements oder aus gesetzlichen Vorgaben abgeleitet. Unabhängig von ihrer Art beschränken sie den maximalen Output von Produkten und Dienstleistungen. Im Folgenden werden verschiedene Beispiele für Restriktionen gegeben.

- Ökologisch: Emissionsobergrenzen wie etwa eine Limitierung des jährlichen CO₂-Ausstoßes im Rahmen des betrieblichen Umweltmanagements.
- Marktabhängig: Nachfragebedingte Ober- und Untergrenzen der Ausbringungsmenge.
- Organisatorisch: Vorgegebene Mindestausbringungsmenge eines Produktes, beispielsweise zur Sicherung des eigenen Marktanteils.
- Rechtlich: Gesetzliche Festlegung von Emissionsgrenzwerten.

Restriktionen können auch aus Werten der Vorperioden abgeleitet werden. Solche Zielwerte kommen auch in der Praxis häufig vor. Das Ziel ist in diesem Fall beispielsweise die Reduktion von CO₂-Emissionen um einen festgelegten Prozentsatz im Vergleich zu einem Basisjahr. Die Anzahl der Restriktionen ist bei der EcoPlex-Methode nicht beschränkt. Ferner ist die Kombination verschiedener Arten von Restriktionen möglich. Lediglich die Ober- beziehungsweise Untergrenzen müssen quantifiziert und der Beitrag jedes Produktes je Referenzeinheit angegeben werden. Voraussetzung ist die gegenseitige Nicht-Ausschließlichkeit der Restriktionen.

Analog zur Zielfunktion sind auch die Restriktionen in Gleichungen beziehungsweise Ungleichungen darzustellen, mit Ungleichung (11) als Beispiel für Restriktionen mit Obergrenzen

$$\text{Res}_j: \sum_{i=1}^n x_{i,j} \cdot a_i \leq L_j \quad [-] \quad \text{für } j=1, \dots, m \quad (11)$$

sowie Ungleichung (12) als Beispiel für Restriktionen mit Untergrenzen

$$\text{Res}_j: \sum_{i=1}^i x_{i,j} \cdot a_i \geq L_j \quad [-] \quad \text{für } j=1, \dots, m \quad (12)$$

mit

$x_{i,j}$: Koeffizient der Restriktion j für Produkt i [-]

a_i : Ausbringungsmenge von Produkt i [-]

Res_j : Restriktion j [-]

L_j : Ober- beziehungsweise Untergrenze der Restriktion j [-].

Es ist zu beachten, dass sich die Kenngrößen der Zielfunktion und die Kenngrößen der Restriktionen auf die gleiche Referenzeinheit beziehen müssen.

Durch die Einführung von Restriktionen wird das zuvor unbeschränkte Angebot von Unternehmen beschränkt. Eine Einhaltung der Restriktionen kann zu einer Reduktion des Angebotes und somit zu einer Reduzierung des erzielten Gesamtdeckungsbeitrags führen.

4.3.5 Anwendung des Simplex-Algorithmus

Die Anwendung des Simplex-Algorithmus ist der letzte Schritt im Rahmen der EcoPlex-Berechnung. Dazu werden die Zielfunktion in Gleichung (13) und die Restriktionen in den Gleichungen (14) und (15) zusammengeführt. In iterativen Schritten wird die Zielfunktion unter Berücksichtigung der aus den Restriktionen abgeleiteten Nebenbedingungen maximiert. Das Verfahren wird so lange angewandt, bis eine pareto-optimale Allokation der zur Verfügung stehenden Ressourcen erreicht ist, also bis keine Lösung mit einem höheren Ergebnis der Zielfunktion mehr möglich ist. Das Gleichungssystem besteht somit aus einer Zielfunktion und mehreren Nebenbedingungen, die mittels Schlupfvariablen in Gleichungen überführt werden.

$$\max! \quad z = DB_1 \cdot a_1 + \dots + DB_i \cdot a_i + \dots + DB_n \cdot a_n \quad [€] \text{ für } i=1, \dots, n \quad (13)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\text{Res}_1: \quad x_{1,1} \cdot a_1 + x_{2,1} \cdot a_2 + \dots + x_{i,1} \cdot a_i + \dots + x_{n,1} \cdot a_n + s_1 = L_1 \quad [-] \text{ für } i=1, \dots, n \quad (14)$$

$$\text{Res}_2: \quad x_{1,2} \cdot a_1 + x_{2,2} \cdot a_2 + \dots + x_{i,2} \cdot a_i + \dots + x_{n,2} \cdot a_n + s_2 = L_2 \quad [-] \text{ für } i=1, \dots, n \quad (15)$$

mit

$DB_1, DB_2, DB_i:$	Deckungsbeitrag von Produkt 1,2,...,i [€]
$x_{1,1}, x_{2,1}, x_{n,1}:$	Koeffizient von Produkt 1,2,...,n zur ersten Restriktion [-]
$x_{1,2}, x_{2,2}, x_{n,2}:$	Koeffizient von Produkt 1,2,...,n zur zweiten Restriktion [-]
$a_1, a_2, a_n:$	Ausbringungsmenge von Produkt 1,2,...,n [-]
$L_1, L_2:$	Grenzwerte der Restriktionen [-]
$\text{Res}_1, \text{Res}_2:$	Restriktion 1 und 2 [-]
$s_1, s_2:$	Schlupfvariablen für Restriktion 1 und 2 [-]
$z:$	Zielfunktionswert [€].

Das lineare Gleichungssystem aus (13), (14) und (15) wird durch die Anwendung des Simplex-Algorithmus in iterativen Schritten gelöst. Das Vorgehen bei

der Anwendung des Simplex-Algorithmus ist in Ziffer 2.1.4 detailliert beschrieben. Das Ergebnis der Berechnung ist die Grundlage für den folgenden Schritt der Ergebnisinterpretation.

4.4 Interpretation der Ergebnisse

Im Rahmen der Interpretation werden die Ergebnisse der vorhergehenden Simplex-Berechnung analysiert. Die Interpretation gliedert sich dabei in drei Hauptelemente: Schwachstellenanalyse, Identifikation des Maßnahmenbudgets sowie Bestimmung der Schattenpreise.

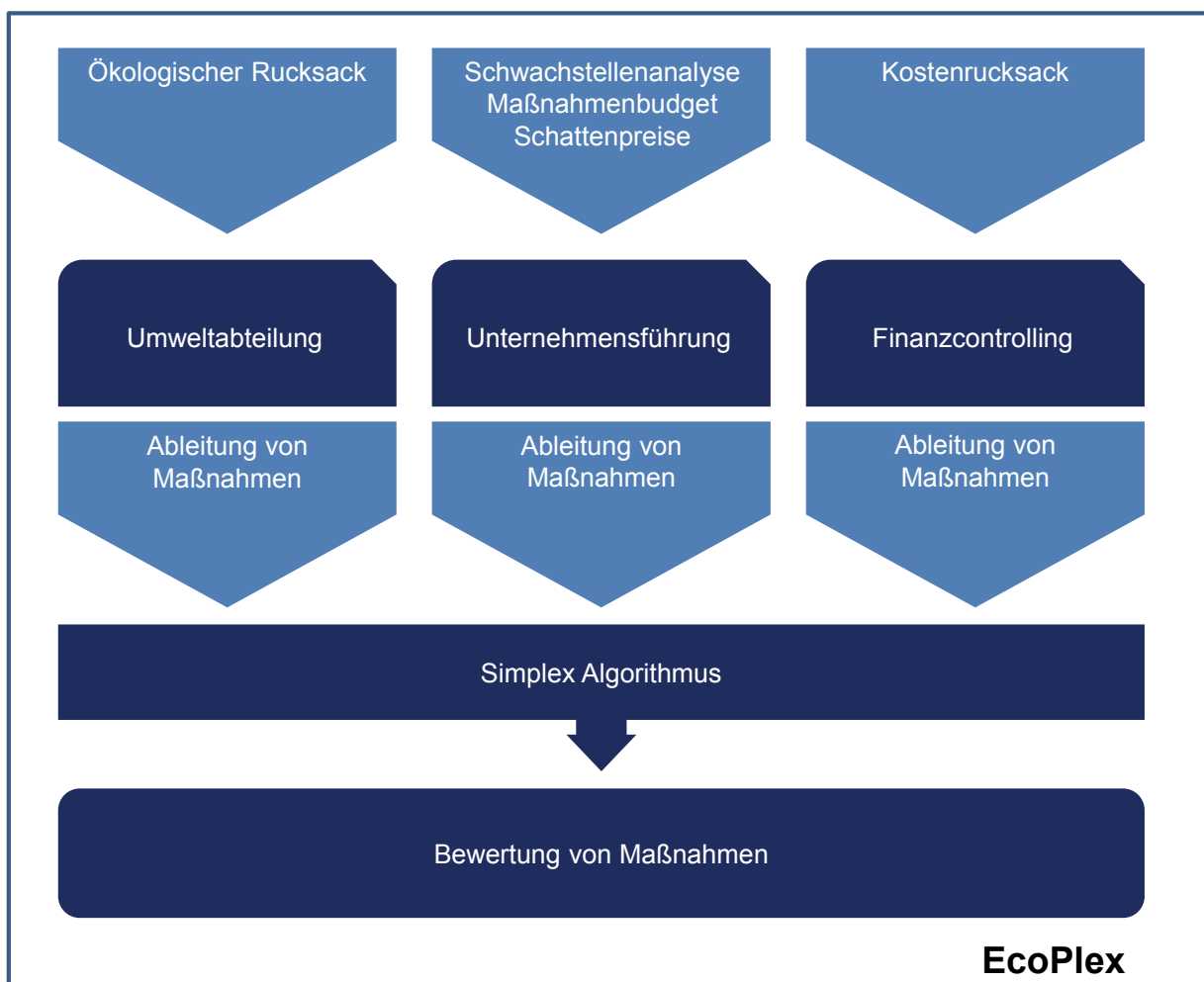


Bild 4-8: Schematische Darstellung des Vorgehens bei der Ergebnisinterpretation.

Die Interpretation ist die Grundlage für die Ableitung von Maßnahmen und damit für die Optimierung von Prozessen, Produkten oder dem Angebotsportfolio. Das Vorgehen ist in Bild 4-8 dargestellt. Durch die Zusammenführung von ökologischen und ökonomischen Produktinformationen wird eine Analyse des betrieblichen Gesamtsystems ermöglicht. Dies ist die Grundlage für die Identifikation von Schwachstellen und folglich für die Ableitung von Maßnahmen zur Reduktion der Umweltwirkungen oder Steigerung des Deckungsbeitrags. Die detaillierte Darstellung der Ergebnisinterpretation erfolgt für die Schwachstellenanalyse in Ziffer 4.4.1. Die Identifikation des Maßnahmenbudgets wird in Ziffer 4.4.2 erläutert; die Bestimmung der Schattenpreise in Ziffer 4.4.3. Anschließend wird auf Basis der Interpretation der Ergebnisse die Ableitung von Maßnahmen in Ziffer 4.4.4 dargestellt.

4.4.1 Schwachstellenanalyse

Im Rahmen der Schwachstellenanalyse werden zunächst Produkte identifiziert, deren Zielerreichungsbeitrag im Vergleich mit anderen Produkten gering ist. Dies ist der Fall, wenn mit einem Produkt ein im Verhältnis zu den Umweltwirkungen zu geringer Deckungsbeitrag erzielt wird. Wie bei der in Ziffer 2.2.5 vorgestellten Ökoeffizienzanalyse ist das Ziel die Schaffung eines möglichst großen Wertes bei möglichst geringen Umweltwirkungen. Im Gegensatz zur Methodik der DIN EN ISO 14045 [27] bezieht sich die Schwachstellenanalyse im Rahmen der EcoPlex-Methode jedoch nicht nur auf die absoluten Umweltwirkungen, sondern setzt diese auch in Relation zu den Zielvorgaben, wie in Ziffer 4.2.3 dargestellt.

Im Rahmen der EcoPlex-Methode werden Produkte priorisiert, die im Verhältnis zu den Umweltwirkungen einen hohen Deckungsbeitrag erzielen und damit einen größeren Beitrag zum wirtschaftlichen Erfolg leisten. Erst wenn die verfügbare Kapazität eines Produktes ausgeschöpft wird, werden Produkte mit einer geringeren Ökoeffizienz an den Markt gebracht. Abhängig von ökologischen und ökonomischen Produkteigenschaften sowie der festgelegten Grenzwerte kann die Einhaltung der Restriktionen zu einer Reduktion der Ausbringungsmenge führen. Produkte, deren Ausbringungsmenge reduziert wird, haben folglich unter den gegebenen Rahmenbedingungen einen zu geringen Zielerreichungsbeitrag.

Die Identifikation von Produkten mit geringer Ökoeffizienz ermöglicht systematische Verbesserungsmaßnahmen. Dabei kann eine Steigerung der Ökoeffizienz entweder durch Reduktion der Umweltwirkungen oder eine Erhöhung des Deckungsbeitrags erreicht werden. Anstelle von Maßnahmen zur Verbesserung kann jedoch auch das Produktportfolio des Unternehmens durch die Einführung von neuen Produkten oder das Aussortieren von Produkten optimiert werden.

Die Schwachstellenanalyse liefert auf Basis von ökonomischen und ökologischen Produkteigenschaften und in Abhängigkeit der Restriktionen eine unternehmensspezifische Analyse. Somit werden systematische Informationen zur Weiterführung oder Einstellung von Produkten generiert und dadurch ein Beitrag zur Entscheidungsunterstützung geleistet.

4.4.2 Identifikation des Maßnahmenbudgets

Wie in Ziffer 4.3.4 erläutert, reduziert sich durch die Einführung von Restriktionen meist die mögliche Ausbringungsmenge und dadurch in der Folge auch der erzielte Gesamtdeckungsbeitrag. Die EcoPlex-Methode ermittelt den Gesamtdeckungsbeitrag unter Berücksichtigung der angesetzten Restriktionen. Die Differenz zwischen dem ursprünglichen Gesamtdeckungsbeitrag und dem Gesamtdeckungsbeitrag unter Einhaltung der Restriktionen stellt die internen Reduktionskosten dar. Im Rahmen dieser Arbeit werden die internen Reduktionskosten auch als Maßnahmenbudget interpretiert. Ohne Änderungen von Umweltwirkung, Deckungsbeitrag oder der Restriktionen selbst ist das Erreichen der gesetzten Restriktionen zu keinen geringeren Kosten möglich. Im Umkehrschluss entspricht die Reduktion des Gesamtdeckungsbeitrags somit dem Budget, das für Maßnahmen zur Reduktion der Umweltwirkungen zur Verfügung gestellt werden sollte. Die Berechnung des Maßnahmenbudgets erfolgt nach Gleichung (16).

$$B_M = \sum_{i=1}^n DB_{U,n} - \sum_{i=1}^n DB_{R,n} \quad [€] \quad \text{Für } i=1, \dots, n \quad (16)$$

mit

B_M : Maßnahmenbudget [€]

DB_U : Ursprünglicher Gesamtdeckungsbeitrag (ohne Restriktionen) [€]

DB_R : Gesamtdeckungsbeitrag mit Restriktionen [€].

Technische Maßnahmen zur Reduktion von Umweltwirkungen sind in der Regel mit Kosten verbunden, beispielsweise durch Produkt- oder Prozessinnovationen. Die Ableitung des Maßnahmenbudgets liefert somit auf Basis von ökonomischen und ökologischen Produkteigenschaften sowie den Restriktionen ein objektives, unternehmensspezifisch berechnetes Ergebnis, das zur Beurteilung und Auswahl von Maßnahmen herangezogen werden kann.

4.4.3 Bestimmung der Schattenpreise

Das der EcoPlex-Methode zugrunde liegende Simplex-Verfahren erlaubt die pareto-optimale Allokation knapper Ressourcen. Bei der Anwendung der EcoPlex-Methode wird die Aufnahmefunktion der Natur für Schadstoffe durch Festlegung von Obergrenzen als knappe Ressource betrachtet [96]. Beispielsweise wird durch die Festlegung einer Emissionsobergrenze eine zuvor unbeschränkte Ressource limitiert, die systematische Einbeziehung der Ressource in betriebliche Prozesse wird somit erforderlich. Dies ist an die in Ziffer 2.2.1 dargestellte Bewirtschaftung von Gemeingütern angelehnt.

Durch die Einführung von Emissionsobergrenzen entsteht Knappheit in Bezug auf tolerierbare Emissionen. Im Gegensatz zu unbegrenzt verfügbaren Ressourcen haben knappe Ressourcen einen ökonomischen Gegenwert. Deshalb müssen sie systematisch bewirtschaftet werden, um betriebliche Ergebnisse zu optimieren. Je knapper eine Ressource – in diesem Fall also je niedriger eine Emissionsobergrenze – desto größer ist ihr Wert. In Ziffer 2.1.2 wird das Konzept der Schattenpreise dargestellt. Schattenpreise stellen den internen, kalkulatorischen Wert knapper Ressourcen dar, es handelt sich also nicht um einen am Markt realisierbaren Preis. Die Wertbestimmung hängt dabei direkt von den Umweltwirkungen und Deckungsbeiträgen einzelner Produkte, sowie den Rest-

riktionen ab. Der Schattenpreis gibt an, um welchen Betrag sich der Gesamtdeckungsbeitrag bei einer weiteren Verknappung einer knappen Ressource reduziert, beziehungsweise um welchen Betrag sich der Gesamtdeckungsbeitrag bei der Lockerung einer Restriktion erhöht.

Im Rahmen der EcoPlex-Methode bedeutet beispielsweise ein Schattenpreis von 10 €/t CO₂-Äq., dass zur Erhöhung des Gesamtdeckungsbeitrags um 10 € eine weitere Tonne CO₂-Äq. emittiert werden muss. Analog würde die Reduktion der Emission von Treibhausgasen um eine Tonne zu einer Reduktion des Gesamtdeckungsbeitrags um 10 € führen. Die so berechneten Werte liefern im Fall von ökologischen Restriktionen eine objektive und organisationspezifische monetäre Bewertung. Der so bestimmte Wert von ökologischen Ressourcen kann wiederum als Grundlage für den Vergleich mit externen Kosten (siehe Ziffer 2.2.2) von Umweltwirkungen herangezogen werden. Im Falle von CO₂-Emissionen kann der so berechnete Wert beispielsweise die Grundlage für eine systematische Entscheidung über den Ankauf oder Verkauf von Emissionszertifikaten für das europäische Emissionshandelssystem (siehe Ziffer 2.2.2) liefern. Ist der Schattenpreis von CO₂ höher als der Preis für CO₂-Zertifikate lohnt sich der Zukauf. Dadurch ist eine Organisation zum Ausstoß weiterer CO₂-Emissionen berechtigt, die Restriktion wird also gelockert. Da der Schattenpreis in diesem Fall höher als der Marktpreis ist, werden die Kosten für den Zukauf durch den zusätzlich erzielten Deckungsbeitrag aufgewogen und der Gesamtdeckungsbeitrag kann erhöht werden. Ist der Schattenpreis hingegen geringer, sollten eventuell vorhandene Zertifikate verkauft werden, da die so erzielten zusätzlichen Einnahmen größer sind als die durch eine Ausweitung des eigenen Angebotes zu realisierenden Mehreinnahmen. Der Marktpreis am European Energy Exchange belief sich am 01.06.2015 auf 7,23 €/t CO₂ [34]. Beim beispielhaften Schattenpreis von 10 €/t CO₂ wäre aus betriebswirtschaftlicher Sicht ein Zukauf von Zertifikaten sinnvoll.

Neben der systematischen Entscheidungsunterstützung im Falle von Emissionszertifikaten kann der Schattenpreis auch als Grundlage für die Entscheidung über andere Maßnahmen, wie beispielsweise die Teilnahme an Programmen zur Klimakompensation, oder als Grundlage zur Wertbestimmung für interne Anreizmechanismen dienen.

4.4.4 Ableitung von Maßnahmen

Basierend auf den vorangegangenen Interpretationsschritten werden Maßnahmen zur Reduzierung der Umweltwirkungen oder der Erhöhung des Deckungsbeitrags abgeleitet. Basierend auf den in Ziffer 2.1.2 dargestellten Annahmen strebt das Unternehmen nach einer Erhöhung des erzielten Gesamtdeckungsbeitrags. Um dies unter Einhaltung der gesetzten Restriktionen zu erreichen ist im Rahmen der EcoPlex-Methode entweder eine Erhöhung des Deckungsbeitrags von Produkten oder die Reduktion der Umweltwirkungen von Produkten nötig.

Die Erhöhung des Deckungsbeitrags kann durch eine Steigerung der Erlöse oder die Reduktion der Stückkosten erfolgen. Erfolgt die Erhöhung des Deckungsbeitrags bei gleichbleibenden Umweltwirkungen, führt dies in der Folge auch zu einer Erhöhung des Gesamtdeckungsbeitrags bei gleichbleibender Ausbringungsmenge. Eine Reduktion der Umweltwirkungen kann beispielsweise durch technische Maßnahmen erfolgen. Durch die Reduktion der Umweltwirkungen je Referenzeinheit wird eine höhere Ausbringungsmenge bei Einhaltung der Restriktionen ermöglicht, was wiederum zu einer Erhöhung des Gesamtdeckungsbeitrags führt. Die konkreten Maßnahmen hängen dabei vom Untersuchungsgegenstand ab. Es kann auch eine Kombination von technischen und ökonomischen Maßnahmen angewandt werden. Maßnahmen sind insbesondere nach ihrer Eignung zur Reduzierung der Umweltwirkungen oder einer Erhöhung des Deckungsbeitrags auszuwählen. Nur so kann eine Verbesserung des Gesamtsystems erreicht werden. Durch die EcoPlex-Methode werden Schwachstellen aufgezeigt, ein Maßnahmenbudget berechnet sowie Schattenpreise zum Vergleich interner Werte mit Marktpreisen ermöglicht. Somit wird die Grundlage für eine systematische Auswahl von Maßnahmen geschaffen.

Im Rahmen der Schwachstellenanalyse werden Produkte mit geringer Ökoeffizienz identifiziert. Diese Produkte rücken somit in den Fokus der weiteren Betrachtung. Zusätzlich zur Analyse der Ökoeffizienz werden Maßnahmen für Produkte mit den größten absoluten Umweltwirkungen in Erwägung gezogen, da hier grundsätzlich aufgrund der absoluten Höhe der Umweltwirkungen auch das größte Reduktionspotential vorhanden ist. Produkte mit geringer Ökoeffizienz sowie den größten absoluten Umweltwirkungen werden in der Folge detailliert

betrachtet. Hierdurch werden ökologische Treiber identifiziert und somit die Grundlage für die systematische Reduzierung der Umweltwirkungen durch gezielte Maßnahmen geschaffen. Basierend auf der Schwachstellenanalyse werden Ansatzpunkte für Optimierungsmaßnahmen ausgewählt. Durch die Berechnung des Maßnahmenbudgets wird ein Anhaltspunkt für den Kostenrahmen geschaffen. Technische Maßnahmen, deren Kosten das berechnete Maßnahmenbudget übersteigen, sind dabei jedoch nicht grundsätzlich ungeeignet. Vielmehr muss ihr Einfluss auf Umweltwirkungen und Deckungsbeiträge im Rahmen der Optimierung beurteilt werden und die Amortisationsdauer identifiziert werden.

Die Schattenpreise bieten über mögliche technische Maßnahmen hinaus weitere Möglichkeiten. Sie bieten objektive Informationen zum Vergleich von internen Werten und externen Kosten. Dies unterstützt Entscheidungen bezüglich marktbasierter Aktionen wie etwa dem Kauf beziehungsweise Verkauf von Emissionszertifikaten [30], der Investition in Klimaschutzinitiativen [3], [69] oder für Anreizmechanismen wie internen CO₂-Abgaben [94].

4.5 Optimierung

Die Interpretation der Ergebnisse innerhalb der EcoPlex-Methode ermöglicht eine Schwachstellenanalyse, die Identifikation von Schattenpreisen sowie die Ableitung eines Maßnahmenbudgets. Diese Ergebnisse sind die Grundlage für einen systematischen Optimierungsprozess und erlauben eine Untersuchung und Auswahl von potentiell geeigneten ökonomischen und technischen Maßnahmen.

Wie in Bild 4-9 dargestellt, werden im Rahmen der Optimierung ausgewählte oder in Erwägung gezogene Maßnahmen im Hinblick auf ihre Eignung beurteilt und die Auswirkungen auf relevante Eingangsgrößen wie beispielsweise Material- und Energiebedarf berechnet.

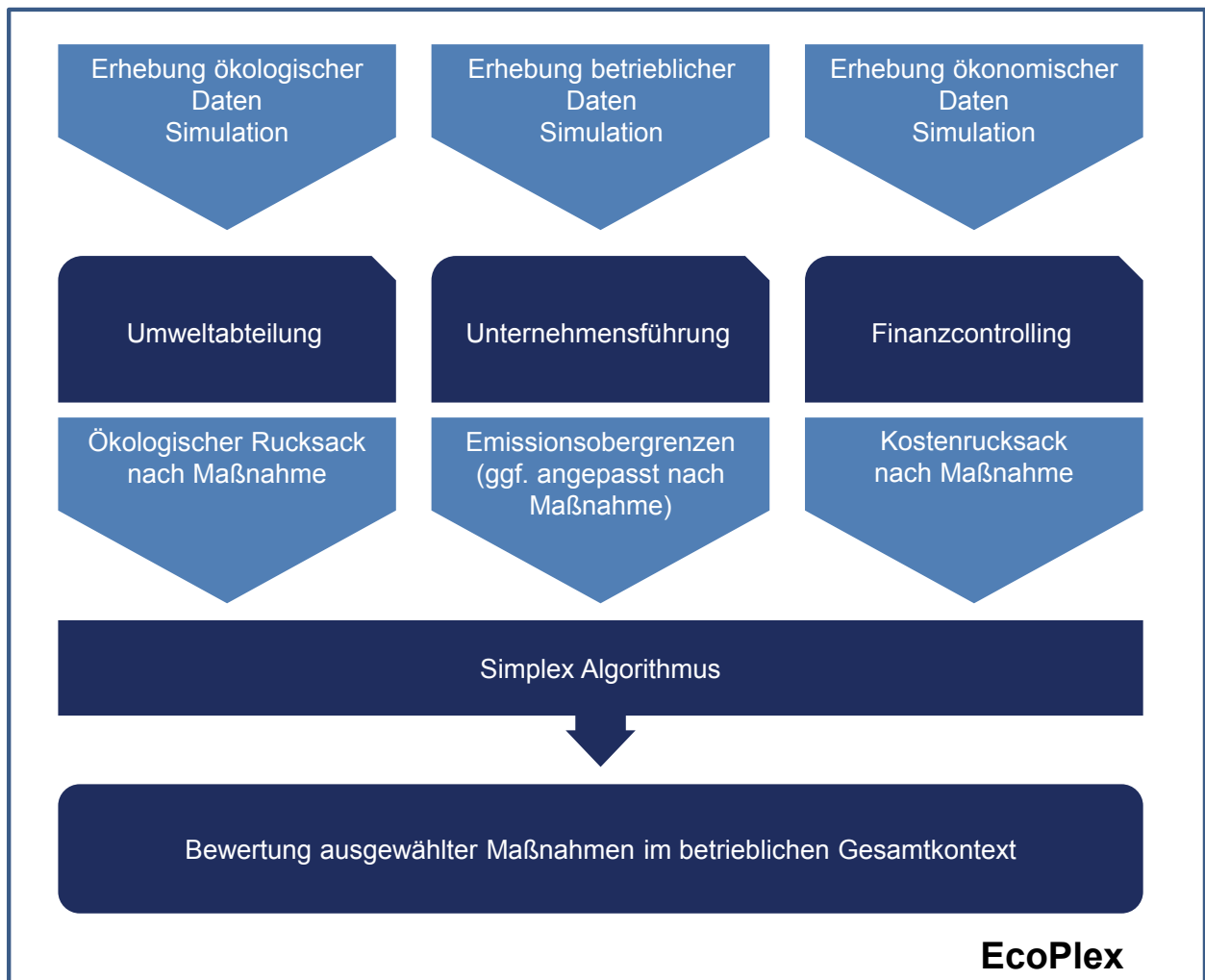


Bild 4-9: Schematische Darstellung des Optimierungsschrittes im Rahmen der EcoPlex-Methode.

Die resultierenden Veränderungen von ökologischem Rucksack und Kostenrucksack dienen als Eingangsdaten für eine weitere Iteration der EcoPlex-Methode. Somit werden die Auswirkungen einzelner Maßnahmen auf das Gesamtsystem untersucht. Die Ergebnisse unterstützen die Entscheidungsfindung und erlauben die Identifikation und Umsetzung der aus ökologisch-ökonomischer Perspektive am besten geeigneten Maßnahmen. Durch die im Rahmen der Optimierung durchgeführten Maßnahmen ergibt sich eine Veränderung des Gesamtsystems: Technische Maßnahmen führen zu einer Veränderung des Umweltprofils von Produkten oder Dienstleistungen und können zudem sub-

stantielle Auswirkungen auf die Kosten haben. Ökonomische Maßnahmen wie eine Kostenreduktion haben Einfluss auf die Deckungsbeiträge und dadurch ebenfalls auf das gesamte dem EcoPlex zu Grunde liegende Gleichungssystem.

Vor der Analyse mittels der EcoPlex-Methode wird vorab die Amortisationsdauer durch die Division der Kosten mit der jährlichen Änderung der Betriebskosten wie in Gleichung (17) dargestellt berechnet. Die Formel hierzu lautet:

$$t = \frac{K_M}{\Delta K_B} \quad [\text{Jahre}] \quad (17)$$

mit

t: Amortisationsdauer [Jahre]

K_M : Kosten der Maßnahme [€]

ΔK_B : Jährliche Änderung der Betriebskosten [€/Jahr].

Das Ergebnis ist die Amortisationsdauer, also die Zeit nach der sich Anschaffungs- oder Maßnahmenkosten durch Einsparungen refinanzieren. Eine kürzere Amortisationsdauer ist stets vorteilhaft, wobei in der betrieblichen Praxis Maßnahmen mit Amortisationsdauern von unter fünf Jahren meist als sinnvoll beurteilt werden [78]. Zur Beurteilung von durchgeführten Maßnahmen im Hinblick auf das betriebliche Gesamtergebnis wird die Kennzahl E_i zur Beurteilung der Effizienz der Maßnahme als Quotient aus der Steigerung des Gesamtdeckungsbeitrags und der Maßnahmenkosten berechnet. Die Formel ist in Gleichung (18) dargestellt.

$$E_i = \frac{DB_M - DB_R}{K_M} \quad [-] \quad (18)$$

mit

E_i : Kennzahl zur Beurteilung der Maßnahmeneffizienz bei Produkt P_i [-]

DB_M : Gesamtdeckungsbeitrag nach Durchführung der Maßnahme [€]

DB_R : Gesamtdeckungsbeitrag mit Restriktionen (vor Maßnahme) [€]

K_M : Kosten der Maßnahme [€].

Nach der Durchführung der Optimierung ist der Untersuchungsrahmen gegebenenfalls anzupassen, etwa bei einer Neustrukturierung des Portfolios mit zusätzlichen Produkten oder Dienstleistungen. In der Folge hat dies auch Auswirkungen auf die Quantifizierung von Umweltwirkungen und ökonomischen Kenngrößen. Die Zielfunktion muss somit angepasst und gegebenenfalls neu aufgestellt werden. Auch die Restriktionen sind mit den veränderten Umweltwirkungen anzupassen und bei Bedarf um neue Produkte oder Dienstleistungen zu erweitern. Auch kann sich die Festsetzung der Obergrenzen ändern, beispielsweise durch neue Reduktionsziele im Rahmen des betrieblichen Umweltmanagements oder veränderte rechtliche Vorgaben. Die EcoPlex-Methode wird dann mit den geänderten Bedingungen nochmals durchlaufen, um nicht nur das Pareto-Optimum bei gegebenen Bedingungen zu identifizieren, sondern auch das Pareto-Optimum unter angepassten Bedingungen zu ermitteln. Basierend auf den Ergebnissen der EcoPlex-Methode können anschließend Maßnahmen zur Umsetzung ausgewählt werden.

4.6 Wesentliche Erkenntnisse

Ziel der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten EcoPlex-Methode ist die systematische Einbeziehung ökologischer Faktoren in ökonomische Entscheidungsprozesse. Durch die direkte Einbeziehung von Umweltwirkungen in ökonomisch-relevante Planungs- und Entscheidungsprozesse wird die Relevanz von Umweltmanagementvorgaben und ökobilanziellen Erhebungen in Unternehmen gesteigert. Hierzu sind zunächst Ziel (Ziffer 4.2.1) und Untersuchungsrahmen (Ziffer 4.2.2) für die folgende Untersuchung festzulegen. Während das Vorgehen analog zu den Schritten der Ökobilanz ist, verursacht es durch die parallele Betrachtung von ökologischen und ökonomischen Aspekten einen höheren Aufwand als die Durchführung einer alleinstehenden Ökobilanzierung. Zunächst werden ökologische (Ziffer 4.2.3) und ökonomische (Ziffer 4.2.4) Größen für die Untersuchung ausgewählt und festgelegt. Im Rahmen der Berechnung werden mittels einer Ökobilanz die Umweltprofile von Produkten oder Dienstleistungen erhoben (Ziffer 4.3.1). Parallel werden ökonomische Eingangsgrößen quantifiziert (Ziffer 4.3.2) und daraus die Zielfunktion aufgestellt (Ziffer 4.3.3). Ökologi-

sche und ökonomische Parameter werden um Restriktionen erweitert (Ziffer 4.3.4) und fließen in den Simplex-Algorithmus ein. Nach dem Durchlaufen des Simplex-Algorithmus (Ziffer 4.3.5) folgt die Interpretation der Ergebnisse (Ziffer 4.4). Der Fokus liegt dabei auf der Analyse von Schwachstellen, der Identifikation des Maßnahmenbudgets sowie der Bestimmung der Schattenpreise. Basierend auf diesen Ergebnissen werden Maßnahmen abgeleitet. Im Rahmen der Optimierung (Ziffer 4.5) werden Maßnahmen und ihre Auswirkungen auf das Gesamtsystem untersucht, beurteilt und bei positiver Evaluierung durch das Projektteam oder die Unternehmensleitung umgesetzt.

Die hier entwickelte EcoPlex-Methode stellt einen innovativen Ansatz zur weiteren Steigerung der Relevanz von Umweltwirkungen und der Methode der Ökobilanz für die betriebliche Entscheidungsfindung dar. Die Anwendung der EcoPlex-Methode wird im folgenden Abschnitt an einem praktischen Beispiel vorgestellt.

5 Anwendung der Methode

Zur Validierung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten EcoPlex-Methode und zur Darstellung des Anwendungspotentials wird die Methode auf ein Fallbeispiel angewandt.

In diesem Kapitel wird die Anwendung der EcoPlex-Methode am Beispiel von ausgewählten touristischen Resorts durchgeführt. Die Erstellung der Fallstudie erfolgt in Kooperation mit einem Praxispartner. Im Rahmen der Untersuchung wird für acht Ferienresorts mit Ganzjahresbetrieb eine ökologisch-ökonomische Systemanalyse mit Hilfe der EcoPlex-Methode durchgeführt. Hierdurch werden im Rahmen der Schwachstellenanalyse Resorts mit geringem Zielerreichungsbeitrag identifiziert. Außerdem werden ein Maßnahmenbudget abgeleitet und Reduktionskosten ermittelt sowie die Schattenpreise von ökologischen Aspekten berechnet. Anschließend werden technische Maßnahmen abgeleitet und beurteilt. Der Betrieb der Resorts ist Haupteinnahmequelle des Unternehmens. Gleichzeitig wird auch ein Großteil der Kosten sowie der Umweltwirkungen durch den Betrieb der Resorts verursacht. Durch die Ausrichtung der Resorts auf luxuriösen Urlaub ergeben sich hohe Anforderungen an die technische Ausstattung der Resorts. Durch die technischen Anlagen und die aufwändige Infrastruktur ergibt sich ein hoher Energiebedarf, beispielsweise für die Temperierung mehrerer Schwimmbecken, die Klimatisierung von Gebäuden oder die Beleuchtung der Resorts.

Die Analyse von Umwelt- und Kostenaspekten sowie die systematische Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen sind somit von großer Relevanz für das Unternehmen. Die Resorts sind in ihrer grundsätzlichen Ausstattung vergleichbar. Durch die jeweiligen Standorte mit ihren spezifischen geographischen, technischen, rechtlichen, ökologischen und ökonomischen Rahmenbedingungen ergibt sich jedoch eine Vielzahl von Einflussfaktoren. Dies umfasst beispielsweise die Umweltwirkungen aus der Energiebereitstellung, Kostenstrukturen sowie ökologische Zielvorgaben. Bild 5-1 stellt die an der Analyse beteiligten Akteure sowie ihre Motivation und Ziele dar und zeigt somit den interdisziplinären Ansatz der EcoPlex-Methode unter Einbeziehung verschiedener Disziplinen.

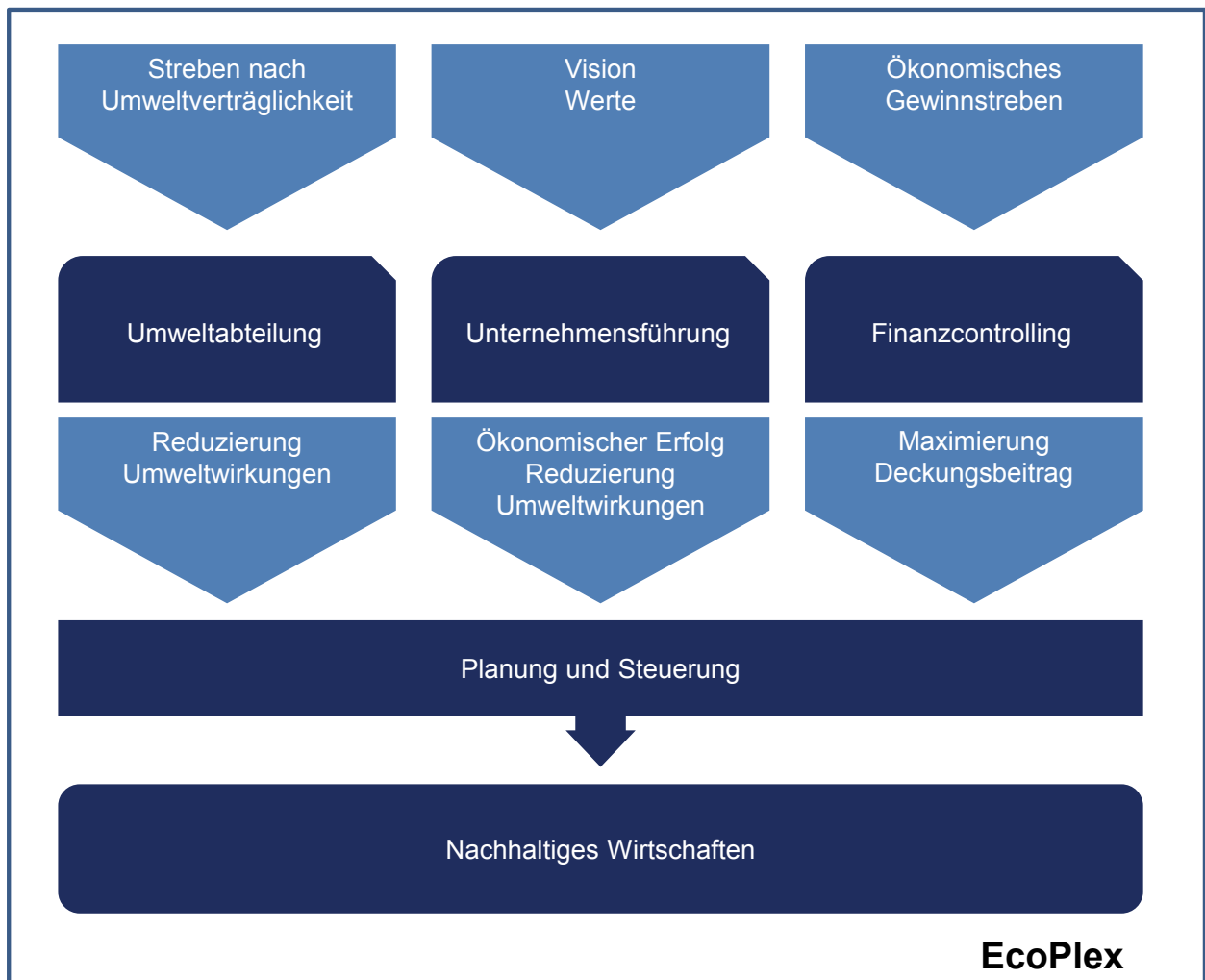


Bild 5-1: An der Analyse beteiligte Unternehmensbereiche, sowie deren Motivation und Ziele.

Mit dem Ziel des nachhaltigen Wirtschaftens werden die jeweiligen Ziele der einzelnen Akteure im Rahmen einer verbesserten Planung und Steuerung im Rahmen der EcoPlex-Methode zusammengeführt. Die Ziele der einzelnen Akteure sind im vorliegenden Fall grundsätzlich gegenläufig: Eine Reduzierung der Umweltwirkungen kann beispielsweise über eine Reduzierung des Angebots erreicht werden, während die Maximierung des Deckungsbeitrags unter anderem durch die Erhöhung des Angebots erreicht werden kann. Diese grundsätzlich konkurrierenden Ziele werden im Rahmen der EcoPlex-Methode in einem einheitlichen Betrachtungsrahmen zusammengeführt.

5.1 Betrachtungsrahmen

Wie in Ziffer 4.2 beschrieben, steht am Anfang der EcoPlex-Methode die Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen. Bild 5-2 stellt die aus Sicht der jeweiligen Akteure relevanten Kenngrößen dar.

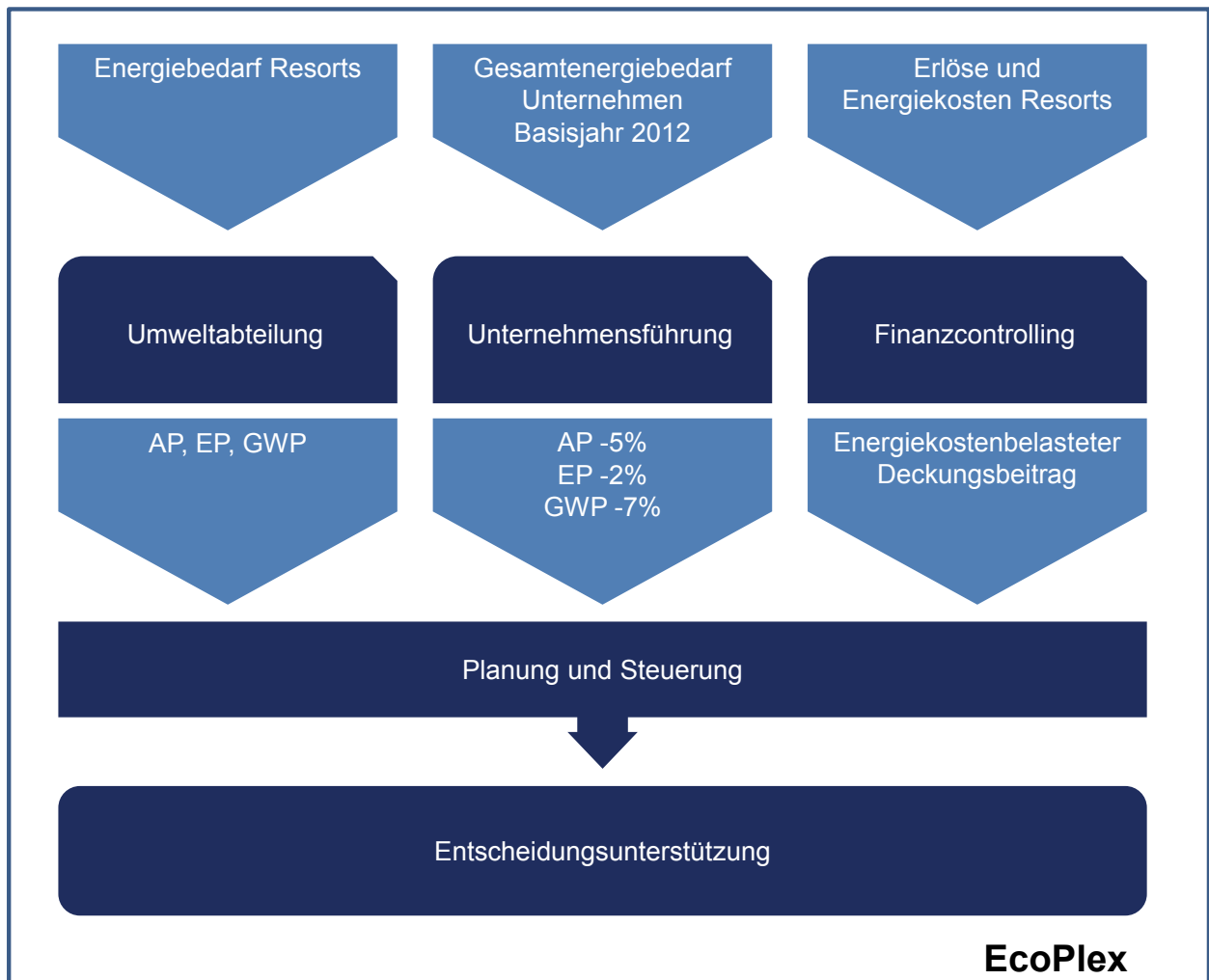


Bild 5-2: Betrachtungsrahmen des Fallbeispiels und für die beteiligten Akteure relevante Kenngrößen.

Das Ziel für den hier untersuchten Anwendungsfall ist die ökologisch-ökonomische Analyse des Betriebs von acht Resorts mit Ganzjahresbetrieb. Alle Resorts sind im mediterranen oder tropischen Raum angesiedelt und somit in ihrer technischen Ausstattung grundsätzlich vergleichbar. In Abstimmung mit

dem Partnerunternehmen werden ökologische Zielvorgaben in Anlehnung an das betriebliche Umweltmanagement als Restriktionen aus [78], [95] abgeleitet. Für den vorliegenden Fall handelt es sich dabei um folgende Vorgaben:

- Reduktion der Beiträge zum Versauerungspotential (AP) der Resorts in Spanien und Portugal um 5 %,
- Reduktion der Beiträge zum Eutrophierungspotential (EP) aller Resorts um 2 %,
- Reduktion der Beiträge zum Treibhauspotential (GWP) aller Resorts um 7 %,

jeweils im Vergleich zu den Beiträgen aus dem Basisjahr 2012. Es wird die von der Universität Leiden entwickelte und in Wissenschaft und Industrie weit verbreitete und angewandte CML 2001-April 2013 Methodik zur Wirkungsabschätzung verwendet [41].

Die EcoPlex-Methode betrachtet damit zwei globale und eine regionale Zielvorgabe, die als Restriktionen in das Modell eingehen. Die Auswahl der Umweltwirkungskategorien richtet sich dabei an den Zielen des Unternehmens aus. Die Emissionen von Treibhausgasen haben sich in den letzten Jahren als eine der größten ökologischen Herausforderungen der Menschheit herausgestellt. Die Reduktion der Beiträge zum GWP ist daher in vielen Unternehmen ein vorrangiges ökologisches Ziel. Der verstärkte Eintrag von Phosphaten oder anderen als Nährstoffen wirksamen Verunreinigungen in an die Ferienresorts angrenzende Gewässer und Meere, die sogenannte Eutrophierung, führt zu einem verstärkten Algenwachstum und damit zu einem Sinken der Wasserqualität. Die Reduktion von Beiträgen zum EP begründet sich damit aus dem Streben des Unternehmens nach einer Sicherstellung der Wasserqualität sowie nach der Erhaltung von Stränden. Versauerung greift Korallenriffe an und bedroht somit die maritime Tier- und Pflanzenwelt. Durch den Fokus auf Wassersportaktivitäten ergibt sich auch hier ein direkter Handlungsbedarf des Unternehmens. Die Erhaltung der Umwelt ist im Tourismusbereich für die Aufrechterhaltung des Betriebs von großer Wichtigkeit.

Die Analyse erfolgt rückblickend auf das Basisjahr 2012. Außerdem wird für jedes Resort die Anzahl der Gastnächte im Basisjahr als zusätzliche organisatorische und nachfragebedingte Restriktion festgelegt. Dies dient zusätzlich auch

zur Plausibilisierung der Ergebnisse, da die tatsächliche Auslastung der einzelnen Resorts in die Betrachtung mit einbezogen wird. Die Analyse ist auf den Energiebedarf beschränkt. Aus ökologischer Sicht werden die Umweltwirkungen des energetischen Betriebs analysiert, inklusive der Bereitstellung der Energieträger. Aus ökonomischer Sicht werden die Erlöse den Kosten für Energie gegenübergestellt. Mit Hilfe der EcoPlex-Methode sollen Aussagen über die ökologisch-ökonomische Effizienz der einzelnen Resorts getroffen werden. Weiterhin sollen ein Maßnahmenbudget abgeleitet sowie Schattenpreise bestimmt werden.

Die Betrachtung erfolgt auf Basis des Betriebs der Resorts im Basisjahr 2012. Als Referenzeinheit wird eine Gastnacht festgelegt. Dies stellt die kleinste ganzzahlig skalierbare Funktion der Resorts dar. Gleichzeitig stellt die Bereitstellung von Übernachtungen die Hauptfunktion des Unternehmens und somit auch das Produkt dar, nämlich das „Anbieten von Urlaub“. Dieses Produkt setzt sich zusammen aus der Übernachtung des Gastes und weiteren Dienstleistungen wie beispielsweise Verpflegung, sportliche und kulturelle Aktivitäten sowie Unterhaltung und Animation. Ziel ist das Erwirtschaften größtmöglicher Erlöse durch die Maximierung der verkauften Übernachtungen durch Gäste in Resorts des Unternehmens. Die gewählte Referenzeinheit repräsentiert somit also die Kernfunktion des Unternehmens. Vereinfachend wird angenommen, dass sowohl finanzielle Erlöse als auch Energieverbrauch je Gastnacht linear skaliert sind. Annahm gemäß ist der Energiebedarf für jede Übernachtung während der Studienperiode gleich; und damit auch die daraus resultierenden Umweltwirkungen sowie die Energiekosten. Durch die Wahl der oben genannten Referenzeinheit beziehen sich getroffene Aussagen somit auf die durchschnittliche Performance jedes Resorts im Basisjahr.

Der Untersuchungsrahmen umfasst den Betrieb der Resorts für das Basisjahr 2012. Betrachtet werden die durch den Energieverbrauch verursachten Umweltwirkungen sowie die damit zusammenhängenden Kosten. Dies umfasst ausschließlich Kosten für Energieträger. Kosten für Investitionen oder Wartung fließen nicht in die Betrachtung ein. Es wird der gesamte Lebenszyklus der verwendeten Energieträger betrachtet, von der Rohstoffentnahme bis zur energetischen Verwertung und den daraus resultierenden Umweltwirkungen. Die Betrachtung der Umweltwirkungen der verwendeten Energieträger erfolgt mit Hilfe

der Methode der Ökobilanz. Im Rahmen der ökonomischen Analyse wird dies durch die zu bezahlenden Marktpreise für Energieträger erreicht, dies impliziert auch alle in der Vorkette anfallenden Kosten.

Die in die Untersuchung einfließenden Energieverbrauchswerte basieren auf gemessenen Verbrauchswerten. Diese sind für jedes Resort im Basisjahr nach Energieträgern getrennt verfügbar. Die entsprechenden Kosten für Energieträger werden ebenfalls erfasst und repräsentieren die tatsächlich geleisteten Zahlungen an die jeweiligen Energieversorger. Die Erlöse je Resort sind ebenfalls bekannt und wurden für die vorliegende Untersuchung zur Verfügung gestellt. Die Datenqualität für die Resorts ist somit sehr gut. Die für die Berechnung der Umweltwirkungen verwendeten Datensätze stammen aus der GaBi-Datenbank [41]. Die Datensätze repräsentieren länderspezifische Strommixe sowie auf der Marktzusammensetzung basierenden Umweltwirkungen der verwendeten Energieträger. Die Qualität der im Rahmen der ökologischen Analyse herangezogenen Hintergrunddaten ist somit ebenfalls als sehr gut zu beurteilen; die GaBi Datenbank wurde von der Europäischen Kommission als qualitativ beste Datenbank für Energiedaten identifiziert [73]. Die Daten für Energiebedarf, Kosten und Erlöse sind vollständig erfasst. Somit ist die in die Analyse einfließende Datenbasis als vollständig zu betrachten. Verbrauchsdaten, Kosten und Erlöse beziehen sich auf dasselbe Basisjahr. Bei den verwendeten Hintergrunddaten handelt es sich um aktuelle Datensätze. Die verwendeten Daten sind somit konsistent, vollständig und von hoher Qualität.

Die untersuchten Umweltwirkungen leiten sich aus den Zielvorgaben ab. Für die vorliegende Analyse handelt es sich dabei um

- Versauerungspotential (AP [kg SO₂-Äq.]),
- Eutrophierungspotential (EP [kg PO₄³⁻-Äq.]),
- Treibhauspotential (GWP 100 [kg CO₂-Äq.]).

Als ökonomische Kenngröße wird der energiekostenbelastete Deckungsbeitrag je Gastnacht DB_e herangezogen. Dieser repräsentiert die durchschnittlichen Erlöse je Gastnacht abzüglich der durchschnittlichen Energiekosten je Gastnacht. Die Summe der Deckungsbeiträge DB_e eines Resorts stellt somit den gesamten Jahresumsatz des Resorts nach Abzug der gesamten Energiekosten für das Ba-

sisjahr dar. Die untersuchten Resorts werden im Folgenden durch die Abkürzungen R₁ bis R₈ dargestellt.

5.2 Berechnung

Zunächst werden die in Bild 5-3 dargestellten Daten aus technischen Berichten, Erhebungen des Controllings sowie Vorgaben des betrieblichen Umweltmanagements gesammelt und daraus die Eingangsgrößen für die EcoPlex-Methode berechnet.

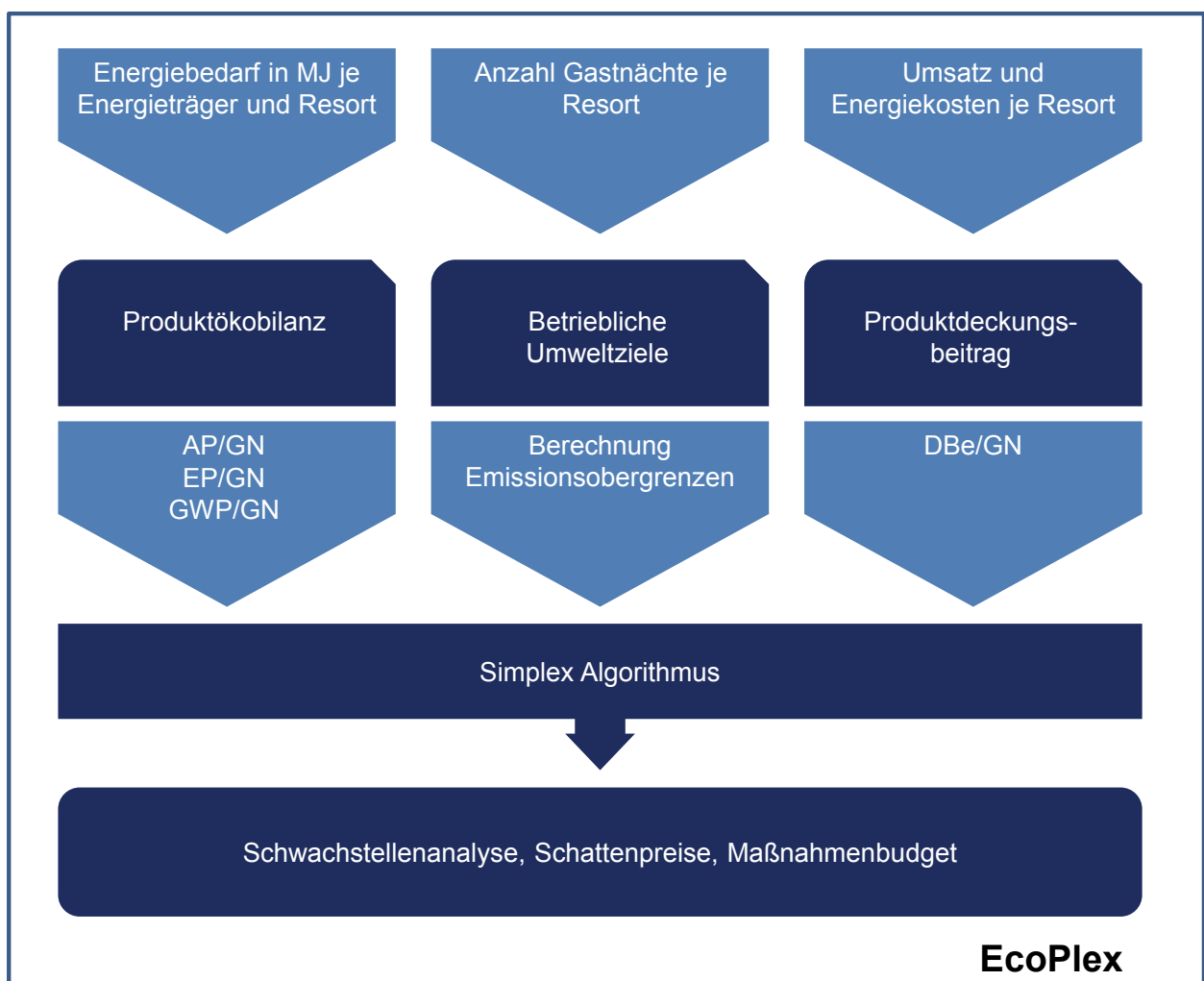


Bild 5-3: Darstellung der erhobenen Daten zur Berechnung der Eingangsgrößen des Fallbeispiels für die EcoPlex-Methode.

Zur Quantifizierung der ausgewählten Umweltwirkungen wird eine Ökobilanz entsprechend der in Ziffer 2.1.1 dargestellten Grundlagen erstellt. Diese basiert auf dem gemessenen Bedarf an verschiedenen Energieträgern für jedes Resort im Basisjahr [79], [81]. Die Eingangsgrößen sind in Tabelle 5-1 aufgeführt. Dabei zeigen sich deutliche Unterschiede im Energiebedarf je Gastnacht zwischen den einzelnen Resorts, bedingt durch die technische Ausstattung der Resorts.

Tabelle 5-1: Eingangsdaten in die Ökobilanz, je Gastnacht und Resort [79], [81].

Eingangsdaten Ökobilanz				
Resort	Elektrischer Strom	Thermische Energie aus Erdgas	Thermische Energie aus Heizöl	Thermische Energie aus Biomasse
[-]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
R ₁	27	4,7	0,04	0
R ₂	46,3	1,5	23,5	0
R ₃	0	6,9	221,8	0
R ₄	24,4	21,5	0	0
R ₅	24,9	2,85	19,1	3,4
R ₆	18,4	0,41	2,9	5,8
R ₇	12,7	0	15,9	0
R ₈	34,6	26,5	0,8	0

Im Rahmen der Ökobilanzierung werden spezifische Energievorketten betrachtet. Hierdurch werden die Umweltwirkungen, die beispielsweise durch die jeweilige Zusammensetzung des Strommixes in unterschiedlichen Ländern zustande kommen, in die Betrachtung aufgenommen. Die Erstellung der Ökobilanz erfolgt mit Hilfe der GaBi 6 Software und den zur Verfügung stehenden Datenbanken [41]. Die errechneten Umweltwirkungen beziehen sich auf die zuvor festgelegte

Referenzeinheit von einer Gastnacht. Der zusätzliche Aufwand zur Datenerhebung und -aufbereitung war für die vorliegende Fallstudie gering, da die Verbrauchsdaten laufend erfasst werden.

Im Rahmen der Erstellung der Ökobilanz wird für jedes Resort ein Ökobilanzmodell auf Basis des jeweiligen Energiebedarfs erstellt. Die Modelle basieren auf dem gemessenen Bedarf verschiedener Energieträger mit den länder- oder regionsspezifischen Vorketten. Entsprechende Modelle werden für alle betrachteten Resorts erstellt und sind die Grundlage für die Berechnung der Umweltwirkungen. Aufgrund der geographischen Lage einiger Resorts mussten länderspezifische Strommixe modelliert werden, da diese in der GaBi Datenbank nicht verfügbar waren. Hierzu wurden in Anlehnung an [66] für eine Übertragung von Sachbilanzdaten nötige Ähnlichkeitsaspekte analysiert und anschließend basierend auf Statistiken zu Verbrauchswerten länder- und regionsspezifische Ökobilanzmodelle erstellt [17], [18], [19], [54], [55], [77]. Die Ökobilanzmodelle bilden den ökologischen Rucksack des energetischen Betriebs der Resorts ab. Sie erfassen und quantifizieren für die untersuchten Umweltwirkungskategorien die Auswirkungen der Ressourcenentnahme, der Herstellung von Vorprodukten, der Energieumwandlung und -bereitstellung inklusive Übertragungsverlusten.

Bild 5-4 zeigt beispielhaft ein Modell der Ökobilanz. Darin werden die zur Deckung des Endenergiebedarfs einer Gastnacht benötigten Mengen der jeweiligen Energieträger hinsichtlich ihrer ökologischen Wirkungen bewertet.

Energiebedarf, Resort R5

GaBi Prozessplan: Energie (unterer Heizwert) [MJ]

p

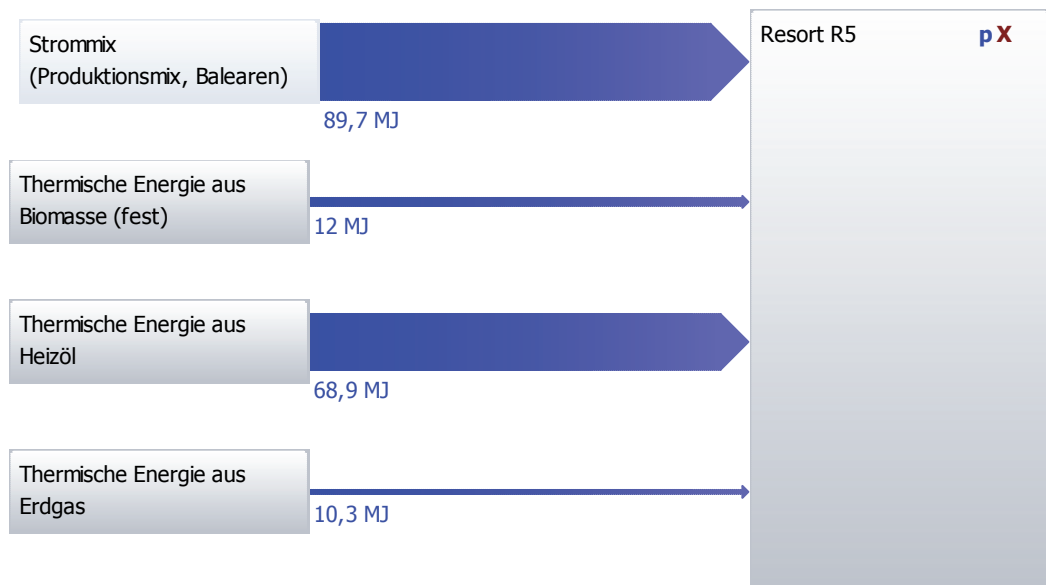


Bild 5-4: Ökobilanzmodell des Endenergiebedarfs je Gastnacht von Resort R₅.

Analog zum in Bild 5-4 dargestellten Vorgehen werden Modelle für alle betrachteten Resorts erstellt und ausgewertet.

Als ökonomische Kenngröße wird der DB je Gastnacht und Resort herangezogen. Es wird dabei auf den energiekostenbelasteten Deckungsbeitrag DB_e zurückgegriffen. Dieser setzt sich aus den durchschnittlichen Erlösen je Gastnacht abzüglich der durchschnittlichen Energiekosten je Gastnacht zusammen und wird entsprechend der Formel in Gleichung (19) berechnet.

$$DB_e = R_{GN} - k_{E,GN} \quad [€] \quad (19)$$

mit

DB_e : Energiekostenbelasteter Deckungsbeitrag [€/Gastnacht]

R_{GN} : Durchschnittlicher Erlös je Gastnacht [€/Gastnacht]

$k_{E,GN}$: Durchschnittliche Energiekosten je Gastnacht [€/Gastnacht].

Analog zum ökologischen Rucksack stellt der DB_e hier den ökonomischen Rucksack dar. Er umfasst die gesamten erzielten Erlöse abzüglich der Kosten für

Energie. In den Energiekosten sind dabei implizit alle Schritte der Wertschöpfungskette enthalten. Diese werden von den einzelnen Akteuren jeweils weitergegeben. Alle verwendeten ökologischen als auch ökonomischen Kenngrößen beinhalten somit vollständige Basisdaten aus der kompletten Wertschöpfungskette der Energieträger. Die Konsistenz der Analyse ist sichergestellt.

Die Qualität der verwendeten Daten ist sehr gut, da sie anhand direkter Messungen beziehungsweise Datenerfassung erhoben wurden. Der Energiebedarf wird gemessen. Erlöse, Energiekosten und Übernachtungszahlen werden ebenfalls direkt in den Resorts erfasst und zentral zusammengeführt. Die hier ausgewählten und berechneten Werte gehen als Eingangsgrößen in die Berechnung ein. Sie sind in Tabelle 5-2 dargestellt.

Die zuvor festgelegte ökonomische Kenngröße DB_e sowie die drei betrachteten Umweltwirkungen fließen in die EcoPlex-Analyse ein. Bei EP und GWP handelt es sich um globale Restriktionen, das heißt sie werden auf alle Resorts angewandt. Das Versauerungspotential (AP) wird lediglich für die Resorts R_4 - R_7 in Spanien und Portugal restriktiert, es handelt sich somit um eine regionale Restriktion. Auf Grund der Auswahl der Restriktionen gehen die grau hinterlegten Faktoren nicht in die Berechnung ein.

Im Rahmen der Berechnung zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den Resorts. Der DB_e beträgt zwischen 68,25 € und 178,18 € je Gastnacht. In den meisten Resorts liegt er zwischen 80 € und 110 €. Die Höhe des DB_e wird neben der geographischen Lage auch von Ausstattung, Zusatzangebot und Zielpublikum des jeweiligen Resorts beeinflusst. Resorts mit Familien als Zielgruppe sind beispielsweise etwas günstiger. Ferner sind die Übernachtungspreise für Kinder in der Regel günstiger als für Erwachsene, wodurch der Deckungsbeitrag je Gastnacht vergleichsweise gering ausfällt. Resort R_3 richtet sich hingegen insbesondere an Paare und hat ein entsprechend ausgerichtetes kostenpflichtiges Zusatzangebot. Hierdurch wird der Deckungsbeitrag je Gastnacht erhöht.

Tabelle 5-2: Eingangsdaten für die EcoPlex Berechnung, je Gastnacht, auf Basis von [78], [79], [81], [83].

Eingangsdaten EcoPlex					
Resort	Gastnächte	Ökonomische Kenngröße	Umweltwirkungsindikatoren		
		DB _e	AP	EP	GWP
[-]	[-]	[€]	[kg SO ₂ -Äq.]	[kg PO ₄ ³⁻ -Äq.]	[kg CO ₂ -Äq.]
R ₁	160.552	68,25	0,2594	0,0153	28,03
R ₂	162.089	89,40	0,2542	0,0139	36,88
R ₃	64.702	178,18	0,1463	0,0171	69,71
R ₄	119.796	81,94	0,0591	0,0041	15,02
R ₅	130.697	108,40	0,1969	0,0123	31,70
R ₆	184.419	102,72	0,0563	0,0039	14,84
R ₇	272.430	74,88	0,0457	0,0033	14,57
R ₈	197.386	88,39	0,3336	0,0118	28,82

Auch bei den Umweltwirkungen kommt es zu deutlichen Unterschieden zwischen den einzelnen Resorts. Beispielsweise liegen die Beiträge zum GWP zwischen 14,57 kg CO₂-Äq. und 69,71 kg CO₂-Äq. Dies kommt einerseits durch den unterschiedlichen Energiebedarf in den Resorts zustande, der wiederum von Klima, technischer Ausstattung und Nutzung beeinflusst wird. Andererseits sind die Umweltwirkungen der jeweiligen Energieträger und Strommixe erheblich unterschiedlich.

Das vorrangige Ziel von privatwirtschaftlichen Unternehmen ist wie in Ziffer 2.1.2 dargestellt eine lukrative Geschäftstätigkeit. Die gewählte Zielfunktion ist

deshalb auf eine Maximierung des energiekostenbelasteten Deckungsbeitrags ausgerichtet. Sie setzt sich aus dem jeweiligen DB_e aller betrachteten Resorts zusammen. Die Zielfunktion für die acht betrachteten Resorts ist in Gleichung (20) dargestellt.

$$\begin{aligned} \max! \quad z = & (68,25 \cdot a_1 + 89,40 \cdot a_2 + 178,18 \cdot a_3 + 81,94 \cdot a_4 & [\text{€}] \quad (20) \\ & + 108,40 \cdot a_5 + 102,72 \cdot a_6 + 74,88 \cdot a_7 + 88,39 \cdot a_8) \end{aligned}$$

mit

a_1, a_2, \dots, a_8 : Anzahl Gastnächte in Resort 1,2,...8 [-]

z: Zielfunktionswert [€].

Anschließend werden die festgelegten Restriktionen in Gleichungen übertragen. Als limitierende Werte kommen die um die Reduktionsziele verknüpften Emissionen des Basisjahrs zur Anwendung. Die Emissionsobergrenzen werden mit der in Ziffer 2.1.1 dargestellten Methode der Ökobilanz berechnet. Tabelle 5-3 stellt die Emissionen des Basisjahres sowie die Zielwerte nach Anwendung der Restriktionen dar. Die hier festgelegten Emissionsobergrenzen werden hierbei aus den berechneten Gesamtumweltwirkungen des Basisjahrs reduziert um die in Ziffer 5.1 festgelegten Reduktionsvorgaben für die von der Restriktion betroffenen Resorts. Im Einzelnen sind diese Restriktionen

- Versauerungspotential (AP) von vier betroffenen Resorts des Basisjahrs, reduziert um 5%,
- Eutrophierungspotential (EP) von acht betroffenen Resorts des Basisjahrs, reduziert um 2%,
- Treibhauspotential (GWP) von acht betroffenen Resorts des Basisjahrs, reduziert um 7%.

Tabelle 5-3: Darstellung der Emissionen für das Basisjahr sowie der Zielwerte nach der Anwendung der Restriktionen, auf Basis von [78], [79].

Emissionen und Zielwerte			
Emissionen	Umweltwirkungsindikatoren		
	AP [kg SO ₂ -Äq.]	EP [kg PO ₄ ³⁻ -Äq.]	GWP [kg CO ₂ -Äq.]
Emissionen Basisjahr	55.847,26	11.876,13	33.326.038,78
Reduktion	-2.782,86	-237,52	-2.332.822,71
Zielwert Emissionen	52.874,39	11.638,61	30.993.216,06

Die Restriktionen Res_{1,2,3} sind somit

$$\text{Res}_1: 0,0591 \cdot a_4 + 0,1969 \cdot a_5 + 0,0563 \cdot a_6 + 0,0457 \cdot a_7 \leq 52.874,39 \text{ [kg SO}_2\text{-Äq.]} \quad (21)$$

für das Versauerungspotential in Gleichung (21);

$$\text{Res}_2: 0,0153 \cdot a_1 + 0,0139 \cdot a_2 + 0,0171 \cdot a_3 + 0,0041 \cdot a_4 + 0,0123 \cdot a_5 + 0,0039 \cdot a_6 + 0,0033 \cdot a_7 + 0,0118 \cdot a_8 \leq 11.638,61 \text{ [kg PO}_4^{3-}\text{-Äq.]} \quad (22)$$

für das Eutrophierungspotential in Gleichung (22); sowie

$$\text{Res}_3: 28,03 \cdot a_1 + 36,88 \cdot a_2 + 69,71 \cdot a_3 + 15,02 \cdot a_4 + 31,70 \cdot a_5 + 14,84 \cdot a_6 + 14,57 \cdot a_7 + 28,82 \cdot a_8 \leq 30.993.216,06 \text{ [kg CO}_2\text{-Äq.]} \quad (23)$$

für das Treibhauspotential in Gleichung (23)

mit

a_i: Gastnächte in Resort i [-]

Res_j: Restriktion j.

Weiterhin kommen für rückblickende Betrachtungen weitere Restriktionen zur Anwendung; die Anzahl der Gastnächte des Basisjahrs kann nicht überschritten werden. Alternativ wäre es auch möglich, die maximale theoretische Anzahl an Übernachtungen als Restriktion festzulegen. Mit der hier durchgeführten Untersuchung soll jedoch die tatsächliche Situation des Basisjahrs analysiert und die durchschnittliche Performance jedes Resorts abgebildet werden. Die Restriktion der Gastnächte ist in Gleichung (24) dargestellt.

$$a_i \leq a_{2012,i} \quad \text{für } i=1, \dots, n \quad [-] \quad (24)$$

mit

a_i : Gastnächte in Resort i [-]

$a_{2012,i}$: Anzahl Gastnächte in Resort i im Jahr 2012 [-].

Die Anzahl der Gastnächte ist in Tabelle 5-2 dargestellt. Alle Restriktionen beziehen sich auf nicht zu überschreitende Obergrenzen, somit schließen sich die aufgestellten Restriktionen nicht gegenseitig aus. Ein gegenseitiger Ausschluss von Restriktionen könnte beispielsweise auftreten, wenn eine Emissionsobergrenze festgelegt wird, gleichzeitig aber eine hohe Übernachtungszahl als Untergrenze festgelegt wird: Ohne eine Überschreitung der Emissionsbegrenzung könnte dann die Anzahl der Übernachtungen nicht erreicht werden. Die Beiträge der Resorts zu DB_e und Umweltwirkungen beziehen sich auf eine Gastnacht und stimmen somit mit der Referenzeinheit überein.

Das so formulierte lineare Optimierungsproblem wird anschließend durch Anwendung des Simplex-Algorithmus gelöst. Der Simplex-Algorithmus wird iterativ so lange angewandt, bis eine pareto-optimale Allokation der verfügbaren Ressourcen erreicht ist. Eine pareto-optimale Allokation liegt vor, wenn in der Zielfunktionszeile ausschließlich positive Werte stehen. Das finale Simplex-Tableau bei Anwendung der Restriktionen ist in Tabelle 5-4 dargestellt. Auf der linken Seite sind die Zeilen der Matrix zur besseren Übersicht mit den Kürzeln Z1 bis Z12 bezeichnet. Die Spalten mit den Buchstaben R_1 bis R_8 stellen die untersuchten Resorts dar. In den Spalten s_1 bis s_{11} werden die Schlupfvariablen mitgeführt. Die ersten drei Schlupfvariablen repräsentieren dabei die Restriktionen

für GWP, AP und EP; die Spalten s_4 bis s_{11} sind die Restriktionen in Bezug auf die Gastnächte in den Resorts. In der Spalte RHS sind die Ergebniswerte dargestellt. Zeile Z12 ist die Zielfunktionszeile. Es wird ersichtlich, dass keine negativen Werte mehr vorhanden sind, somit ist die erreichte Allokation pareto-optimal. Der Gesamtdeckungsbeitrag beläuft sich auf 111.648.000 € und ist rechts unten dargestellt.

Die Werte in den Spalten s_1 bis s_{12} der Zielfunktionszeile sind die Schattenpreise der knappen Ressourcen. Die Variable s_1 repräsentiert die Treibhausgasemissionen, der Schattenpreis beläuft sich auf 2,42 €/kg CO₂-Äq. Die Variable s_2 stellt dementsprechend das Versauerungspotential dar. Der Schattenpreis beläuft sich auf 160,27 €/kg SO₂-Äq. Spalte s_3 repräsentiert die Beiträge zum Eutrophierungspotential. Der zugehörige Schattenpreis ist 0 €; die Restriktion wird also nicht voll ausgenutzt. Zeile Z3 liefert den zugehörigen Wert; es sind noch 661 kg PO₄³⁻-Äq. verfügbar, die Zielvorgabe wird also um diesen Wert unterschritten.

Die Zahlenwerte der Matrixkomponenten (Tabelle 5-4) dienen zur Überprüfung der Stabilität des Tableaus, das heißt in welchem Umfang Verschiebungen ohne eine vollständige Neuberechnung des Algorithmus möglich sind. Aufgrund der Anpassung von Zielfunktionswerten und Umweltwirkungen im Zuge der Maßnahmenbeurteilung ist dies für die EcoPlex-Methode jedoch hier irrelevant, da durch die Änderung der Eingangswerte stets eine Neuberechnung nötig wird.

Tabelle 5-4: Simplex-Ergebnistableau nach Durchführung der EcoPlex-Methode für das Anwendungsbeispiel.

Finales Simplex-Tableau, mit Restriktionen																					
Zeile	Resorts								Schlupfvariablen											Ergebnis RHS	
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9	s10	s11		
Z1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	160.552
Z2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	272.430
Z3	0	0	0	0	0	0	0	-0,0004	-0,002	1	-0,005	0	0,009	0,002	0	0,002	0,002	0,002	-0,001	0	661
Z4	0	0	0	0	0	0	0	-0,027	4,37	0	0,76	1	1,89	0,15	0	0,16	0,2	0,782	0	0	51.022
Z5	0	1	0	0	0	0	0	0,027	-4,37	0	-0,76	0	-1,89	-0,15	0	-0,16	-0,2	-0,78	0	0	111.067
Z6	0	0	1	0	0	0	0	0	0,00	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	64.702
Z7	0	0	0	1	0	0	0	0	0,00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	119.796
Z8	0	0	0	0	1	0	0	0	5,08	0	0	0	0	0	-0,3	0	-0,29	-0,23	0	0	116.477
Z9	0	0	0	0	0	1	0	0	0,00	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	184.419
Z10	0	0	0	0	0	0	0	0	-5,08	0	0	0	0	0,3	1	0,29	0,23	0	0	0	14.220
Z11	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	197.386
Z12	0	0	0	0	0	0	0	2,42	160,27	0	0,3	0	9,20	36,06	0	57,72	32,22	18,53	0	0	111.648.000

5.3 Interpretation der Ergebnisse

Auf Grundlage der zuvor durchgeführten Berechnungen erfolgt eine Analyse des bestehenden Portfolios. Die auf der Zielfunktion unter Berücksichtigung der aufgestellten Restriktionen durch den Simplex-Algorithmus berechnete paretooptimale Allokation der knappen Ressourcen stellt dabei das zentrale Bewertungselement dar (Tabelle 5-4). Wie in Ziffer 4.4 erläutert, unterteilt sich die Interpretation der Ergebnisse in die drei Hauptaspekte Schwachstellenanalyse, Identifikation des Maßnahmenbudgets sowie Berechnung der Schattenpreise. Die Ergebnisse basieren hierbei direkt auf den organisationsspezifischen ökonomischen und ökologischen Eingangswerten sowie den angesetzten Restriktionen. Durch eine Veränderung der Eingangswerte, beispielsweise durch Maßnahmen zur Reduzierung des Energiebedarfs oder eine Anpassung der Restriktionen, können sich die Ergebnisse bei erneuter Durchführung der EcoPlex-Methode ändern.

Im Rahmen der Schwachstellenanalyse werden zunächst Resorts mit der geringsten Ökoeffizienz identifiziert. Für die vorliegenden Eingangswerte und Restriktionen handelt es sich hierbei um die Resorts R_2 und R_5 . Vor dem Hintergrund der angelegten Restriktionen verursachen diese Resorts zu große Umweltwirkungen im Verhältnis zum erwirtschafteten energiekostenbelasteten Deckungsbeitrag DB_e . Dies ist daran zu erkennen, dass im Rahmen der Analyse der Wert der theoretischen Ausbringungsmenge, in diesem Fall also die Anzahl der Gastnächte im Betrachtungszeitraum, kleiner als der tatsächliche Wert ist. Die Resorts R_2 und R_5 rücken somit in den Fokus für die Analyse potentieller Verbesserungsmaßnahmen. Zusätzlich zu den als nicht-ökoeffizient identifizierten Resorts werden außerdem noch technische Maßnahmen in Resort R_3 untersucht, da auf Grund der großen absoluten Umweltwirkungen theoretisch große Reduktionspotentiale vorhanden sind.

Die Identifikation des Maßnahmenbudgets ergibt sich aus dem Ergebniswert der Zielfunktion. Aus der Differenz zwischen dem unter Einhaltung der Restriktionen realisierbaren Gesamtdeckungsbeitrags mit dem tatsächlich erzielten Deckungsbeitrag des Betrachtungszeitraums ergibt sich die mit den Restriktionen einhergehende Deckungsbeitragsreduktion. Die Reduktion beläuft sich im vorliegenden Fall auf 6.101.000 €. Im Umkehrschluss kann dieser Betrag als Maß-

nahmenbudget abgeleitet werden und beispielsweise zur Kommunikation mit der Unternehmensleitung herangezogen werden. Gleichzeitig bietet das errechnete Maßnahmenbudget aber auch die Möglichkeit einer Vorauswahl von Maßnahmen, da eine systematische Berechnung des Investitionsbedarfs zur Zielerreichung basierend auf den organisationsspezifischen Werten des Basisjahres erfolgt.

Weiterhin ergibt sich für die vorliegenden Rahmenbedingungen ein Schattenpreis von 2,42 €/kg CO₂-Äq. Eine Reduktion um ein weiteres kg CO₂-Äq. resultiert also in einer Reduktion des realisierbaren Deckungsbeitrags um diesen Wert, während die Emission eines weiteren kg CO₂-Äq. den Deckungsbeitrag entsprechend erhöhen würde. Der Schattenpreis für das Versauerungspotential liegt bei 160,27 €/kg SO₂-Äq., die Reduktion um ein weiteres kg SO₂-Äq. führt also im vorliegenden Fall zu einer Reduktion des Gesamtdeckungsbeitrags um 160,27 €. Das Eutrophierungspotential wird im vorliegenden Fall nicht voll ausgenutzt; es werden 661 kg PO₄³⁻-Äq. weniger emittiert als im Rahmen der Restriktionen erlaubt. Da es sich somit um eine nicht-knappe Ressource handelt, ist der Schattenpreis folglich 0 €/kg PO₄³⁻-Äq. Für den vorliegenden Fall bieten somit Maßnahmen zur Reduktion der Beiträge zum Versauerungspotential ein größeres Potential zur Verbesserung des Gesamtergebnisses.

Sowohl das Maßnahmenbudget als auch der Schattenpreis bieten eine systematische Grundlage für die Beurteilung von Maßnahmen. Das Maßnahmenbudget leitet sich aus den minimalen Reduktionskosten zur Erreichung der Umweltziele ab. Für eine erste Beurteilung der ausgewählten technischen Maßnahmen kann somit überprüft werden, ob die Investitionskosten geringer als die Reduktionskosten sind. Ist dies der Fall und reduziert die ausgewählte Maßnahme die Umweltwirkungen so stark, dass alle Restriktionen erfüllt werden, ist die Maßnahme als effizient zu bezeichnen.

Die Resorts R₂ und R₅ stehen auf Grund der Analyse im Fokus für zu ergreifende Maßnahmen; jedoch beschränkt sich die Analyse von Maßnahmen nicht auf diese beiden Resorts. Maßnahmen in einem effizienten Resort können durch eine Reduktion der Umweltwirkungen ebenfalls zu einer Steigerung des erzielten Gesamtdeckungsbeitrags beitragen. Grundsätzlich in Frage kommen hierbei technische Maßnahmen wie die Umstellung auf andere Energieträger, der Aus-

bau von erneuerbaren Energien oder andere Maßnahmen wie eine Anpassung der Steuerung des Energiebedarfs. Die Schattenpreise für AP und GWP können als Grundlage für interne Anreizmechanismen zur Reduzierung der Umweltwirkung herangezogen werden. Die Schattenpreise je kg SO₂-Äq. sind deutlich höher als die Schattenpreise je kg CO₂-Äq. Der Fokus sollte also auf einer Reduktion der Beiträge zum AP liegen, da hier der Gesamtdeckungsbeitrag stärker erhöht werden kann. Gleichzeitig muss jedoch beachtet werden, dass die Einsparung von 1.000 kg CO₂-Äq. einer Reduktion der Gesamtemissionen um 0,003 % entspricht, während die Einsparung von 1.000 kg SO₂-Äq. einer Reduktion von rund 2 % entspricht. Es kann davon ausgegangen werden, dass Reduktionen der Beiträge zum Treibhauspotential somit leichter zu realisieren sind.

5.4 Ableitung von Maßnahmen und Optimierung

Bild 5-5 stellt das Vorgehen und die beteiligten Akteure im Rahmen der Optimierung dar. Basierend auf der Interpretation der Ergebnisse werden Maßnahmen zur Reduzierung des Energiebedarfs identifiziert und die zu erwarteten Energieeinsparungen quantifiziert. Die aktualisierten Werte gehen als Eingangsdaten in die Ökobilanz und Deckungsbeitragsrechnung ein und werden anschließend im betrieblichen Gesamtkontext beurteilt.

Bei der Anwendung der EcoPlex-Methode wird festgestellt, dass die Resorts R₂ und R₅ den geringsten ökologisch-ökonomischen Zielerreichungsbeitrag aufweisen. Im Zuge einer weiterführenden Schwachstellenanalyse werden deshalb die zu Grunde liegenden Ergebnisse der Ökobilanz weiter analysiert. Dabei wird der zur Deckung des Gesamtenergiebedarfs der Resorts verwendete Anteil unterschiedlicher Energieträger sowie die daraus resultierenden relativen Beiträge zu EP, GWP und gegebenenfalls AP dargestellt.

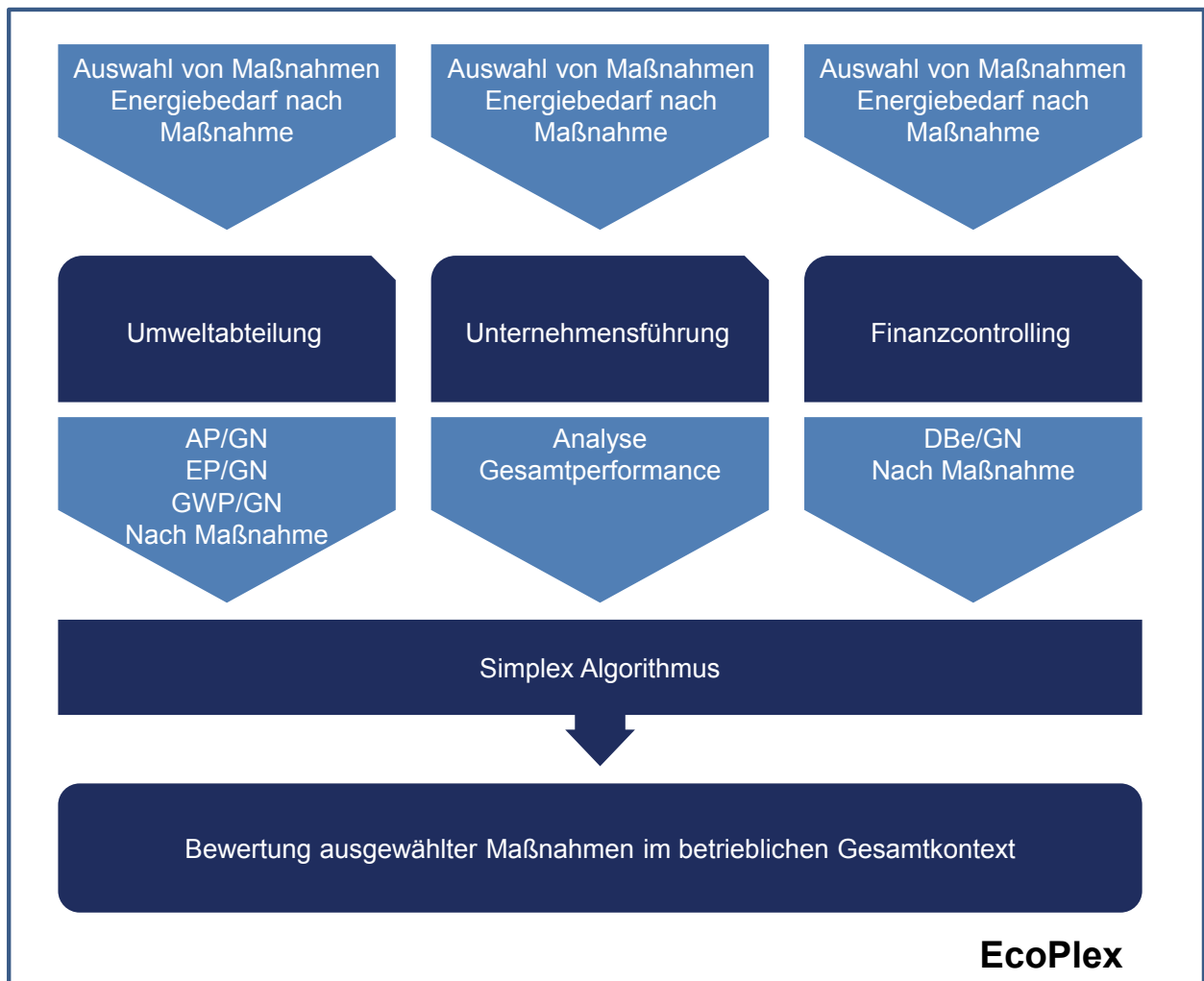


Bild 5-5: Vorgehen und beteiligte Akteure im Rahmen des Optimierungsschrittes.

Für das Resort R_2 kommen lediglich zwei ökologische Restriktionen zur Anwendung, der Beitrag zu GWP und EP. Die absoluten Beiträge zu GWP und EP sind in Tabelle 5-2 dargestellt. Die relativen Beiträge zu den ausgewählten Wirkungsindikatoren sowie den Anteil der verwendeten Energieträger sind in Tabelle 5-5 dargestellt.

Tabelle 5-5: Relative Umweltwirkungen und Energieverbrauch von Resort R₂, auf Basis von [79].

Umweltwirkungen und Energieverbrauch			
Umwelt- und Energieindikatoren	Energieträger		
	Strom	Gas	Heizöl
EP [kg PO ₄ ³⁻ -Äq.]	78,3 %	0,8 %	20,9 %
GWP [kg CO ₂ -Äq.]	80,6 %	0,9 %	18,5 %
Anteil Endenergie	64,9 %	2,2 %	32,9 %

Aus Tabelle 5-5 wird ersichtlich, dass durch den Bedarf an elektrischem Strom die größten Umweltwirkungen verursacht werden. Diese Umweltwirkungen sind auch im Verhältnis zum Anteil der verbrauchten Endenergie höher als bei den anderen Energieträgern: Für die Deckung von rund 65 % des gesamten Energiebedarfs werden 78 % der Beiträge zum EP beziehungsweise 81 % der Beiträge zum GWP emittiert. Dies ist auf den regionalen Strommix am Standort des Resorts zurückzuführen. Innerhalb der Strombereitstellungskette trägt die Stromerzeugung aus Erdgas stark zum Eutrophierungspotential bei. Auch durch die Verstromung von Schweröl werden große Umweltwirkungen verursacht.

Im Zuge dessen wird geprüft, ob der Verbrauch an elektrischem Strom reduziert werden kann, etwa durch den verstärkten Einsatz von Gas und Heizöl oder durch den Einsatz von erneuerbaren Energien wie beispielsweise durch Photovoltaik. Neben den ökologischen Faktoren ist jedoch auch der Einfluss von Maßnahmen auf die Betriebskosten zu beachten. Durch eine Umstellung der Energieversorgung verändern sich auch die Kosten für den Betrieb. In der Folge verändert dies wiederum den in der EcoPlex-Methode verwendeten DB_e. Potentielle Maßnahmen zur Reduzierung des Energiebedarfs werden im Folgenden identifiziert und beurteilt.

Analog zur detaillierten Analyse von Resort R₂ werden auch die Umweltwirkungen von Resort R₅ genauer analysiert. Für R₅ gibt es drei begrenzende ökologi-

sche Faktoren, da hier zusätzlich zur Beschränkung von EP und GWP auch noch der Beitrag zum AP einer Obergrenze unterliegt. Die relativen Umweltwirkungen sind in Tabelle 5-6 dargestellt.

Tabelle 5-6: Relative Umweltwirkungen und Energieverbrauch von Resort R₅, auf Basis von [79].

Umweltwirkungen und Energieverbrauch				
Umwelt- und Energieindikatoren	Energieträger			
	Strom	Gas	Heizöl	Biomasse
AP [kg SO ₂ -Äq.]	91,8 %	0,4 %	6,7 %	1,1 %
EP [kg PO ₄ ³⁻ -Äq.]	83,9 %	0,5 %	12,2 %	3,4 %
GWP [kg CO ₂ -Äq.]	78,0 %	2,4 %	19,4 %	0,2 %
Anteil Endenergie	49,6 %	5,7 %	38,1 %	6,6 %

In diesem Fall zeigt sich deutlich der Einfluss des länderspezifischen Strommixes. Rund die Hälfte des Energiebedarfs wird durch elektrischen Strom gedeckt, die daraus resultierenden Umweltwirkungen belaufen sich jedoch je nach Wirkungskategorie auf 78 bis knapp 92 % der gesamten Umweltwirkungen. Die großen Umweltwirkungen sind hierbei auf den hohen Anteil von Steinkohle und Schweröl im Strommix am Standort des Resorts zurückzuführen. Es ist zu prüfen, ob der Bedarf an elektrischem Strom reduziert werden kann, da hierdurch deutliche Reduktionen der Umweltwirkungen zu erwarten sind. Im Folgenden werden Maßnahmen zur Reduzierung des Strombedarfes identifiziert und beurteilt.

Neben den Resorts R₂ und R₅ ist grundsätzlich auch eine Überprüfung von Maßnahmen in anderen Resorts sinnvoll. Dies gilt insbesondere für Resorts mit großen absoluten Umweltwirkungen, wie im vorliegenden Fall Resort R₃. Auf Grund der hohen Umweltwirkungen des Resorts sind auch grundsätzlich große Reduktionspotentiale vorhanden. Werden diese Potentiale gehoben, tragen sie zu

einer Entspannung der Restriktionen und damit zu einer Verbesserung des Gesamtergebnisses bei. Die relativen Umweltwirkungen von Resort R₃ sind in Tabelle 5-7 dargestellt.

Tabelle 5-7: Relative Umweltwirkungen und Energieverbrauch von Resort R₃, auf Basis von [79].

Umweltwirkungen und Energieverbrauch		
Umwelt- und Energieindikatoren	Energieträger	
	Gas	Heizöl
EP [kg PO ₄ ³⁻ -Äq.]	1,0 %	99,0 %
GWP [kg CO ₂ -Äq.]	2,4 %	97,6 %
Anteil Endenergie	1,0 %	99,0 %

Im Unterschied zu den Resorts R₂ und R₅ wird der größte Teil der Umweltwirkungen aus der Verwendung von Öl zur lokalen Erzeugung von elektrischem Strom eingesetzt wird, während die Verwendung von Gas als Energieträger keine relevanten Umweltwirkungen verursacht. Maßnahmen zur Reduzierung der Umweltwirkungen sollten somit auf eine Reduzierung des Ölverbrauchs abzielen. Ausgewählte Maßnahmen werden im Folgenden dargestellt und beurteilt.

Bei der Beurteilung von Maßnahmen ist im vorliegenden Falle besonders auf den Beitrag zum Versauerungspotential zu achten: Durch den im Vergleich zum GWP deutlich höheren Schattenpreis von 160,27 €/kg SO₂-Äq. im Vergleich zu 2,42 €/kg CO₂-Äq. ergibt sich eine klare Priorisierung der Wirkungskategorien. In der vorliegenden Situation kann der DB_e mit jedem kg eingesparten SO₂-Äq. um 160,27 € erhöht werden.

Die untersuchten Maßnahmen beziehen sich lediglich auf einzelne Resorts. In der Beurteilung wird keine Analyse der Kombination von Maßnahmen in mehreren Resorts durchgeführt.

Optimierungsmaßnahmen – Resort R₂

Im Rahmen der Untersuchung wurde das Resort R₂ als nicht ökoeffizient identifiziert. Es werden also im Hinblick auf die ökologischen Zielvorgaben zu große Umweltwirkungen im Verhältnis zum erwirtschafteten energiekostenbelasteten Deckungsbeitrag DB_e erzielt. Ziel der Optimierungsmaßnahmen ist eine Reduktion der Umweltwirkungen, hier durch eine Reduzierung des Energiebedarfs, oder die Steigerung des DB_e.

Der Energiebedarf im Resort R₂ ist relativ hoch, was in der Folge auch zu großen Umweltwirkungen je Gastnacht führt: Nur Resort R₃ hat einen größeren Beitrag zum GWP je Gastnacht. Dies ist hauptsächlich durch das hohe Alter der technischen Anlagen des Resorts R₂ begründet. Für das Resort wurden im Rahmen eines Energie-Audits potentielle Maßnahmen identifiziert [80]. Dabei wurde festgestellt, dass die Kälteanlage veraltet, überdimensioniert und nicht effizient ist. Die Kosten für deren Betrieb machen rund 20 % der gesamten Energiekosten aus. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher ein Austausch der Kühlelemente durch eine wassergekühlte Anlage sowie der Einbau einer separaten, kleiner dimensionierten Kälteanlage für den Küchenbereich analysiert. Aktuell wird eine einzige große Kälteanlage verwendet. Diese ist so ausgelegt, dass sie den Kältebedarf des gesamten Resorts während der heißen Hauptsaison decken kann. In der Nebensaison werden lediglich der Küchenbereich sowie die Kühlkammer weiter klimatisiert. Jedoch muss hierzu die gesamte, zu diesem Zweck deutlich überdimensionierte Anlage betrieben werden. Durch den Einbau von zwei separaten Kälteanlagen kann der Kältebedarf der Küche effizient gedeckt werden, während die große Kälteanlage für das Gesamtresort nur in den heißen Sommermonaten betrieben werden muss.

Die Auswirkungen der Maßnahme auf den Energiebedarf werden aus [80] und [83] berechnet. Der Endenergiebedarf reduziert sich durch die Maßnahmen um 2.852.000 kWh, was zu einer erheblichen Reduktion der Energiekosten um 142.600 € je Jahr für die betrachtete Basisperiode führt. Der Ressourcenverbrauch an fossilen Energieträgern sinkt um 29.056.074 MJ. Die Investitionskosten für den Austausch der Kühlanlage belaufen sich auf 235.000 €.

Zusätzlich zu den Ergebnissen der EcoPlex-Methode wird eine klassische betriebswirtschaftliche Amortisationsrechnung durchgeführt. Dabei werden die

Kosten der Maßnahmen den jährlichen Einsparungen gegenübergestellt und somit berechnet, nach welchem Zeitraum sich eine Maßnahme aus ökonomischer Sicht rechnet. Dies dient als erste Analyse zur ökonomischen Sinnhaftigkeit von Maßnahmen. Im Rahmen dieser Fallstudie werden Maßnahmen mit einer Amortisationsdauer von unter fünf Jahren weiter untersucht. Die Amortisationsdauer berechnet sich in (25) als Quotient der Maßnahmenkosten und der eingesparten Energiekosten und beläuft sich auf

$$t = \frac{235.000 \text{ €}}{142.600 \text{ €/Jahr}} = 1,65 \quad [\text{Jahre}] \quad (25)$$

Somit sind die Kosten für die Installation der neuen Kälteanlagen bereits nach 1,65 Jahren durch die reduzierten Energiekosten amortisiert, die Maßnahme ist also als ökonomisch sinnvoll zu beurteilen.

Für die Maßnahme werden anschließend die angepassten ökologischen sowie ökonomischen Eingangswerte durch Neuberechnung der Ökobilanz beziehungsweise der Deckungsbeitragsrechnung bestimmt. Die neu berechneten Eingangswerte sind in Tabelle 5-8 dargestellt.

Tabelle 5-8: Eingangswerte der Simplex-Berechnung nach Austausch der Kälteanlage in Resort R₂, auf Basis von [79], [81], 0.

Eingangswerte nach Maßnahme				
Resort	Ökonomische Kenngröße	Umweltwirkungsindikatoren		
	DB _e	AP	EP	GWP
[-]	[€]	[kg SO ₂ -Äq.]	[kg PO ₄ ³⁻ -Äq.]	[kg CO ₂ -Äq.]
R ₂ ohne Maßnahme	89,40	0,2542	0,0139	36,88
R ₂ mit Maßnahme	90,28	0,1669	0,0097	25,58
Differenz absolut	+0,88	-0,09	-0,0041	-11,30
Differenz relativ	+1 %	-34,3 %	-29,8 %	-30,6 %

Die Beurteilung der Maßnahmen in Bezug auf Umweltwirkungen und DB_e bezieht sich ausschließlich auf den Betrieb. Durch die Reduktion des Energiebedarfs sinken die Kosten, was in der Folge zu einer Steigerung des energiekostenbelasteten Deckungsbeitrags um 1 % führt. Die Umweltwirkungen je Gastnacht sinken in allen betrachteten Umweltwirkungskategorien um rund 30 %. Die Maßnahme ist also im Hinblick auf den Betrieb sowohl aus ökonomischer und ökologischer Sicht sinnvoll.

Anschließend werden die neuen Werte für Resort R₂ mit den ursprünglichen Werten der anderen Resorts analog zum Vorgehen in Ziffer 5.2 wieder in Gleichungen überführt und mit Hilfe des Simplex-Algorithmus gelöst. Dadurch erfolgt eine Beurteilung der Maßnahmen im Gesamtkontext aus ökonomischen und ökologischen Aspekten im Hinblick auf die Umweltziele.

Nach Durchführung der Maßnahme steigt der energiekostenbelastete Gesamtdeckungsbeitrag auf 116.230.000 €, was einem Anstieg um 4.582.000 € entspricht. Bei Maßnahmenkosten von insgesamt 235.000 € trägt die Maßnahme somit zu einer deutlichen Steigerung des betrieblichen Gesamtergebnisses bei und ist aus ökonomischer Sicht als äußerst effizient zu beurteilen. Die Kosten liegen deutlich unter dem in Ziffer 5.3 identifizierten Maßnahmenbudget in Höhe von 6.101.000 €.

Zur weiterführenden Beurteilung der Maßnahme im Hinblick auf das betriebliche Gesamtergebnis wird die Kennzahl E_i zur Beurteilung der Effizienz der Maßnahmen in Gleichung (26) berechnet. Diese berechnet sich als Quotient der Steigerung des Gesamtdeckungsbeitrags und der Maßnahmenkosten. Für den vorliegenden Fall beläuft sich dieser auf

$$E_2 = \frac{4.582.000 \text{ €}}{235.000 \text{ €}} = 19,49 \quad [-] \quad (26)$$

Je investiertem Euro wird laut Gleichung (22) der Gesamtdeckungsbeitrag um 19,49 € gesteigert. Dieser Wert kann als Grundlage für den Vergleich der Effizienz verschiedener Maßnahmen herangezogen werden. Der Schattenpreis je kg CO₂-Äq. steigt geringfügig von ursprünglich 2,42 € auf 2,43 €. Der Schattenpreis je kg SO₂-Äq. sinkt hingegen von 160 € auf 158,53 €. Die Beiträge zu Treibhauspotential und Versauerungspotential sind weiterhin knappe Ressourcen in der Betrachtung.

Die Maßnahme ist sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht sinnvoll, da unter Einhaltung der ökologischen Zielvorgaben der Gesamtdeckungsbeitrag deutlich erhöht werden kann. Gleichzeitig werden die Gastkapazitäten in Resort R₂ vollständig ausgeschöpft, das Resort ist also als ökoeffizient zu beurteilen. Durch die reduzierten Umweltwirkungen sowie den gesteigerten energiekostenbelasteten Deckungsbeitrag von Resort R₂ ist Resort R₅ bei den aktuellen Zielvorgaben das einzige nicht ökoeffiziente Resort.

Optimierungsmaßnahmen – Resort R₅

Resort R₅ wurde im Rahmen der Analyse ebenfalls als nicht ökoeffizient identifiziert. Im Gegensatz zu Resort R₂ kommt hier jedoch auch die Restriktion der Beiträge zum Versauerungspotential zur Anwendung. Die technische Ausstattung von Resort R₅ ist auf Grund einer Vielzahl von Maßnahmen in den vergangenen Jahren relativ neu. Der Energiebedarf je Gastnacht liegt infolgedessen im Mittelfeld der betrachteten Resorts. Grund für die hohen Umweltwirkungen ist hauptsächlich der länderspezifische Strommix. Durch den hohen Anteil von Steinkohle und Schweröl werden hohe Umweltwirkungen verursacht.

Für das Resort R₅ wurden im Rahmen eines Energieaudits potentielle technische Maßnahmen abgeleitet. Aus den in Erwägung gezogenen Maßnahmen wird ein Austausch der bestehenden, luftgekühlten Kälteanlage durch zwei neue Kältemaschinen mit Wärmerückgewinnung und einem besseren Wirkungsgrad ausgewählt und beurteilt. Durch den verbesserten Wirkungsgrad der Kältemaschine und die Wärmerückgewinnung wird eine Reduktion des Endenergiebedarfs um 1.074.000 kWh erwartet, was zu einer Kostenreduktion von rund 68.700 € pro Jahr führt. Bei Maßnahmenkosten von rund 220.000 € ergibt sich aus Gleichung (27) eine Amortisationsdauer von 3,2 Jahren.

$$t = \frac{220.136 \text{ €}}{68.738 \text{ €/Jahr}} = 3,2 \quad [\text{Jahre}] \quad (27)$$

Die Investitionskosten der neuen Anlage werden durch die reduzierten Betriebskosten also nach etwas mehr als drei Jahren kompensiert. Die Maßnahme ist somit ökonomisch sinnvoll.

Anschließend wird für das Resort mit der neuen Kälteanlage wieder eine Ökobilanz zur Quantifizierung der Umweltwirkungen durchgeführt sowie die Berechnung des energiekostenbelasteten Deckungsbeitrags aktualisiert. Die daraus resultierenden Veränderungen der ökologischen und ökonomischen Eingangsgrößen sind in Tabelle 5-9 dargestellt.

Tabelle 5-9: Eingangswerte der Simplex-Berechnung nach Austausch der Kälteanlage in Resort R₅, auf Basis von [79], [80], [81].

Eingangswerte nach Maßnahme				
Resort	Ökonomische Kenngröße	Umweltwirkungsindikatoren		
	DB _e	AP	EP	GWP
[-]	[€]	[kg SO ₂ -Äq.]	[kg PO ₄ ³⁻ -Äq.]	[kg CO ₂ -Äq.]
R ₅ ohne Maßnahme	108,40	0,20	0,012	31,70
R ₅ mit Maßnahme	108,93	0,14	0,009	23,70
Differenz absolut	+0,53	-0,06	-0,003	-8,00
Differenz relativ	+0,5 %	-29,50 %	-27,00 %	-25,00 %

Während die Maßnahme zu einer geringen Steigerung des DB_e (+0,5%) führt, können gleichzeitig die Umweltwirkungen um rund ein Viertel in den untersuchten Wirkkategorien reduziert werden. Die Maßnahme ist somit aus ökologischer und ökonomischer Sicht sinnvoll. Die neu berechneten Werte werden anschließend in die Zielfunktion und die Restriktionen übertragen und der Simplex-Algorithmus neu durchlaufen.

Durch den Austausch der Kälteanlage steigt der erzielte Gesamtdeckungsbeitrag auf 114.688.000 €, was einer Steigerung um 3.040.000 € entspricht. Die Gesamtkosten der Maßnahme belaufen sich auf 220.136 € und liegen damit unter dem in Ziffer 5.3 abgeleiteten Maßnahmenbudget. Zur weiterführenden Beurteilung wird die Kennzahl E₅ berechnet in Gleichung (28) berechnet. Für die untersuchte Maßnahme beträgt diese

$$E_5 = \frac{3.040.000 \text{ €}}{220.136 \text{ €}} = 13,81 \quad [-] \quad (28)$$

Je investiertem Euro steigt der Gesamtdeckungsbeitrag somit um 13,81 €. Der Ressourcenverbrauch von fossilen Energieträgern sinkt um 11.164.180 MJ. Der Schattenpreis je kg CO₂-Äq. bleibt bei 2,42 €, die Beiträge zum Treibhauspotential sind also weiterhin ein limitierender Faktor. Der Schattenpreis für die Beiträge zum Versauerungspotential sinkt auf 0 €/kg SO₂-Äq., die Restriktion wird um rund 4.800 kg SO₂-Äq. unterschritten.

Nach dem Austausch der Kälteanlage wird Resort R₅ als ökoeffizient beurteilt, die verfügbaren Kapazitäten werden vollständig genutzt. Resort R₂ ist weiterhin nicht ökoeffizient, da die Reduktion der Emission Treibhausgasen in Resort R₅ nicht zur Erreichung des Zielwertes ausreicht.

Optimierungsmaßnahmen – Resort R₃

Im Gegensatz zu den beiden vorhergehenden Resorts ist Resort R₃ als ökoeffizient identifiziert worden, das heißt die dort erzielten Umweltwirkungen werden im Verhältnis zu den erzielten Erlösen als effizient beurteilt. Dennoch wird das Resort einer detaillierteren Analyse unterzogen, da die absoluten Umweltwirkungen je Gastnacht dort die Höchsten aller untersuchten Resorts sind, und somit auch ein großes Potential zur Reduktion der Umweltwirkungen vermutet wird.

Wie in Tabelle 5-7 ersichtlich wird, ist ein Großteil der Umweltwirkungen auf die Verwendung von Heizöl zurückzuführen, welches im Resort zur Erzeugung von elektrischem Strom verwendet wird. Auf Grund der isolierten Lage des Resorts ist kein Anschluss an das Stromnetz möglich. Es bietet sich hier also die Möglichkeit, die komplette Energieversorgung zu untersuchen. Rund zwei Drittel des Endenergiebedarfs werden zur Kühlung benötigt [10]. Maßnahmen zur effizienteren Kühlung oder eine Reduzierung des Kühlbedarfs haben somit das größte Potential zur Reduzierung der Umweltwirkungen und der Energiekosten. Basierend auf einer Beurteilung der technischen Ausstattung des Resorts werden Maßnahmen zur Reduzierung des Energiebedarfs abgeleitet sowie alternative Möglichkeiten der Energiebereitstellung untersucht und beurteilt.

Zur Reduzierung des Energiebedarfs werden folgende Möglichkeiten in Erwägung gezogen:

- Verwendung von Leuchtdioden (LED) zur Beleuchtung,
- Einsatz einer solarthermischen Anlage zur Deckung des Bedarfs an Warmwasser,
- Verbesserte Wärmedämmung der Gebäude.

Außerdem wird ein Austausch der Generatoren zur Stromerzeugung durch ein Blockheizkraftwerk in Kombination mit einem Nahkältenetz und einer zentralen Absorptionskälteanlage betrachtet. Aktuell erfolgt die Stromerzeugung über Generatoren, die von Dieselmotoren angetrieben werden. Somit wird für Resort R₃ die komplette Energieerzeugung inklusive der Energieumwandlung aus fossilen Energieträgern untersucht.

Aus [10] sowie [79] sind Informationen zum Energiebedarf einzelner Teilanlagen verfügbar. Die Auswirkungen der oben genannten Maßnahmen auf den gesamten Energiebedarf werden im Folgenden analysiert und mittels einer Amortisationsberechnung in einem ersten Schritt auf ihre ökonomische Sinnhaftigkeit hin überprüft.

Durch den Einsatz von LED wird von einer Reduzierung des Energiebedarfs für die Beleuchtung um 80 % ausgegangen [5]. Dies entspricht somit einer Reduktion des Endenergiebedarfs um rund 152.000 kWh je Jahr und resultiert in einer Reduktion der jährlichen Energiekosten um rund 29.900 €, während sich die Kosten für die Anschaffung der neuen Leuchten bei einem angenommenen Preis von 2 € je Watt installierter Leistung auf rund 7.890 € belaufen [63]. Die Amortisationsdauer der Maßnahme beläuft sich nach Gleichung (29) auf 0,26 Jahre.

$$t = \frac{7.893 \text{ €}}{29.963 \text{ €/Jahr}} = 0,26 \quad [\text{Jahre}] \quad (29)$$

Auf Grund der kurzen Amortisationsdauer ist der Austausch der Beleuchtung aus ökonomischer Sicht als äußerst sinnvoll zu betrachten.

Die Bereitstellung von Warmwasser erfolgt aktuell über dezentrale Widerstandsheizanlagen und verursacht mehr als 10 % des gesamten Energieverbrauchs [10]. Alternativ kann die Bereitstellung von Warmwasser auch durch den Einsatz

von solarthermischen Anlagen erfolgen. Es wird eine Anlagengröße von 1 m² je 10 m² Nettogrundfläche angenommen [104] und für die Rahmenbedingungen des Resorts modellseitig angepasst [31]. Annahmegemäß können durch die solarthermische Anlage 80 % des Warmwasserbedarfs gedeckt werden. Durch den Einsatz einer dezentralen Anlage entfällt der Bedarf eines zentralen Speichers, da die benötigten Mengen der einzelnen Gebäude direkt in den Anlagen sowie in dezentralen Pufferspeichern vorgehalten werden können. Dies führt zu einer Reduktion des Endenergiebedarfs um rund 490.000 kWh je Jahr und resultiert in einer Reduktion der jährlichen Energiekosten um rund 96.000 €, während die Kosten für die Anlage 323.040 € betragen [11]. Die Amortisationsdauer der solarthermischen Anlage wird in Gleichung (30) berechnet.

$$t = \frac{323.040 \text{ €}}{96.542 \text{ €/Jahr}} = 3,35 \quad [\text{Jahre}] \quad (30)$$

Mit einer Amortisationsdauer von rund 3 Jahren ist die solarthermische Anlage aus ökonomischer Sicht als sinnvoll zu betrachten.

Eine weitere mögliche Maßnahme zur Reduzierung des Energieverbrauchs ist eine verbesserte Wärmedämmung der Gebäude im Resort R₃ zur Reduktion des Kühlbedarfs. Die Kühlung der Gebäude verursacht rund zwei Drittel des gesamten Energiebedarfs des Resorts. Durch den Einbau eines mineralischen Wärmedämmverbundsystems sowie Zweischeibenverglasung nach Stand der Technik kann der Bedarf an Kühlenergie um rund 50 % reduziert werden, was einer Reduktion der Endenergie um rund 1.400.000 kWh entspricht [4]. Durch die Vielzahl der Gebäude im Resort ist die Wärmedämmung jedoch recht aufwändig. Die Gesamtkosten der Maßnahme belaufen sich auf 5.486.100 € [11]; die erwarteten jährliche Einsparungen durch den reduzierten Energiebedarf belaufen sich auf rund 271.000 €. Die Amortisationsdauer einer verbesserten Wärmedämmung beläuft sich somit nach Gleichung (31) auf

$$t = \frac{5.486.100 \text{ €}}{271.760 \text{ €/Jahr}} = 20,19 \quad [\text{Jahre}] \quad (31)$$

Auf Grund der langen Amortisationsdauer ist die Wärmedämmung der Gebäude als ökonomisch nicht sinnvoll zu betrachten. Die Maßnahme wird deshalb im Rahmen der weiteren Analyse nicht beurteilt.

Neben Maßnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs wird weiterhin auch der Austausch von Generatoren zur Stromerzeugung durch ein Blockheizkraftwerk (BHKW) untersucht. Da rund zwei Drittel der Energie zur Kühlung eingesetzt werden, bietet die Nutzung der Abwärme eines BHKW mittels einer Absorptionskälteanlage in Kombination mit einem Nahkältenetz große Potentiale. Die Auslegung des BHKW sowie des Nahkältenetzes erfolgte mit Hilfe einer im Rahmen von [51] erarbeiteten Software sowie aus [2], [8]. Das BHKW wird über die maximale Nennkälteleistung definiert und hat eine Größe von 430 kW thermisch sowie einen Wirkungsgrad von 38 %. In Anlehnung an [2] wird eine analoge elektrische Leistungsfähigkeit angenommen. Die verwendete Absorptionskältemaschine hat eine Arbeitszahl von 0,75. Das Kältenetz erstreckt sich über eine Länge von 2 km, dabei treten Übertragungsverluste von 20 % auf. Die Maßnahmenkosten belaufen sich annahmegemäß auf rund 1.173.000 € [51]. Durch die effizientere Strombereitstellung sowie die Nutzung der Abwärme zur Kühlung über das BHKW sinken die Energiekosten um rund 543.000 € jährlich. Es ergibt sich aus Gleichung (32) somit eine Amortisationsdauer von

$$t = \frac{1.173.168 \text{ €}}{543.521 \text{ €/Jahr}} = 2,15 \text{ [Jahre]} \quad (32)$$

Auf Grund der kurzen Amortisierungsdauer ist die Maßnahme aus ökonomischer Sicht als sinnvoll zu betrachten.

Für die Beurteilung der Maßnahmen mittels der EcoPlex-Methode werden die vorab ausgewählten Maßnahmen kombiniert und auf ihre Gesamtwirkung hin beurteilt. Es wird also von einer Erneuerung der Beleuchtung durch LED, dem Einbau einer solarthermischen Anlage zur Warmwassererzeugung sowie der Anschaffung eines BHKW mit Absorptionskühlanlage und Nahkältenetz ausgegangen. Auf Grund der langen Amortisierungsdauer wird die Wärmedämmung der Gebäude nicht weiter in Erwägung gezogen. Die gesamte Amortisationsdauer des Maßnahmenpakets wird in Gleichung (33) berechnet. Sie beläuft sich auf 2,24 Jahre.

$$t = \frac{7.893 \text{ €} + 323.040 \text{ €} + 1.173.168 \text{ €}}{29.963 \text{ €/Jahr} + 96.542 \text{ €/Jahr} + 543.521 \text{ €/Jahr}} = 2,24 \quad [\text{Jahre}] \quad (33)$$

Die Amortisationsdauer des Maßnahmenpakets bestehend aus dem Austausch der aktuellen Beleuchtung durch LED, dem Einbau einer solarthermischen Anlage zur Erzeugung von Warmwasser sowie dem Ersatz des aktuell verwendeten Generators zur Stromerzeugung durch ein BHKW von 2,24 Jahren macht das Gesamtpaket aus ökonomischer Sicht sinnvoll.

Durch die effizientere Stromerzeugung, die Nutzung der Abwärme sowie die Reduktion des Stromverbrauchs durch die Verwendung von LED sowie den Einbau der solarthermischen Anlage zur Warmwasserbereitstellung reduziert sich die Entnahme an fossilen Energieträgern um rund 65 %. Die Kosten für Energie reduzieren sich um 670.026 €. Die resultierenden Betriebskosten sowie Umweltwirkungen werden entsprechend der Vorgaben in Ziffer 4.3 neu berechnet. Die neu berechneten Eingangswerte sind in Tabelle 5-10 dargestellt.

Es wird ersichtlich, dass die Maßnahmen zu erheblichen Reduktionen der Umweltwirkungen führen. Durch die Reduktion der Energiekosten erhöht sich gleichzeitig der DB_e um rund 6 %, die Maßnahmen sind also sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht als sehr sinnvoll zu betrachten. Anschließend werden die neuen Werte für Resort R_3 mit den ursprünglichen Werten der anderen Resorts analog zum Vorgehen in Ziffer 5.2 in Gleichungen überführt und der Simplex-Algorithmus durchlaufen. Somit erfolgt eine Beurteilung der Maßnahmen im Gesamtkontext aus ökonomischen und ökologischen Aspekten im Hinblick auf die Umweltziele.

Tabelle 5-10: Eingangswerte der Simplex-Berechnung nach Einsatz von LED-Beleuchtung, Installation einer solarthermischen Anlage sowie Austausch der bisherigen Generatoren durch ein BHKW mit Absorptionskälteanlage in Resort R₃, auf Basis von [79], [81].

Eingangswerte, Resort R ₃				
Resort	Ökonomische Kenngröße	Umweltwirkungsindikatoren		
	DB _e	AP	EP	GWP
[-]	[€]	[kg SO ₂ -Äq.]	[kg PO ₄ ³⁻ -Äq.]	[kg CO ₂ -Äq.]
R ₃ ohne Maßnahme	178,18	0,1463	0,0171	69,71
R ₃ mit Maßnahme	188,91	0,0561	0,0065	27,20
Differenz absolut	+10,73	-0,090	-0,0110	-42,51
Differenz relativ	+6,0 %	-61,6 %	-61,8 %	-61,0 %

Durch die Maßnahme steigt der erzielte Gesamtdeckungsbeitrag auf 116.904.000 €, was einem Anstieg um 5.256.000 € entspricht. Die Gesamtkosten der Maßnahmen belaufen sich auf 1.504.101 € und somit ebenfalls deutlich unter dem in Ziffer 5.3 identifizierten Maßnahmenbudget. Zur Beurteilung der Maßnahme im Hinblick auf das ökonomische Gesamtergebnis wird in Gleichung (34) die Kennzahl E₃ berechnet. Diese beläuft sich hier auf

$$E_3 = \frac{5.256.000 \text{ €}}{1.504.101 \text{ €}} = 3,49 \quad [-] \quad (34)$$

Je investiertem Euro wird der Gesamtdeckungsbeitrag für die hier analysierten Maßnahmen um 3,49 € gesteigert. Insgesamt sinkt der Ressourcenverbrauch von fossilen Energieträgern um 38.219.092 MJ. Der Schattenpreis je kg CO₂-Äq. sinkt auf 0 €. Die Reduktionsziele für CO₂-Emissionen werden in diesem Fall sogar um rund 868 t CO₂-Äq. unterschritten. Der Schattenpreis je kg SO₂-Äq. steigt auf 550 €/kg SO₂-Äq. an; die Beiträge zum Versauerungspotential sind somit die einzige knappe Ressource in der Betrachtung.

Durch die Maßnahme kommt es zu einer deutlichen Reduzierung der Treibhausgasemissionen. Dies führt dazu, dass Resort R₂ im Falle von Maßnahmen in Resort R₃ als ökoeffizient identifiziert wird, da in einem einheitlichen übergeordneten Zielsystem operiert wird. Die Maßnahme in Resort R₃ hat also auch indirekt positive Einflüsse auf Resort R₂, da die Ziele im Hinblick auf Beiträge zum Treibhauseffekt bereits vollständig erreicht wurden. Resort R₅ ist weiterhin nicht ökoeffizient. Dies ist auf die regionale Zielvorgabe für die Beiträge zum Versauerungspotential zurückzuführen, die diesbezügliche Zielvorgabe kann folglich nur durch Maßnahmen in den Resorts R₄, R₅, R₆ oder R₇ erfüllt werden.

Analyse der Optimierungsmaßnahmen

Durch die Analyse der ökologischen und ökonomischen Aspekte des Betriebs der Resorts mittels der EcoPlex-Methode wird die Betrachtung der beiden Nachhaltigkeitsdimensionen Ökologie und Ökonomie erreicht. Bei der Festlegung der Restriktionen kommen sowohl globale (Beiträge zu GWP und EP) als auch regionale (Beiträge zu AP) Restriktionen zur Anwendung. Weiterhin werden marktbedingte Restriktionen zur Plausibilisierung (Begrenzung der maximalen Anzahl an Übernachtungen je Resort) herangezogen. Die Kombination unterschiedlicher Arten von Restriktionen erweist sich dabei als unproblematisch.

Im Rahmen der Ergebnisanalyse zeigt sich, dass die identifizierten Schwachstellen durch die systematische Verknüpfung von ökonomischen und ökologischen Faktoren berechnet werden konnten. Die Resorts R₂ und R₅ wiesen dabei eine zu geringe Ökoeffizienz auf. Das Resort R₃ mit den höchsten relativen Umweltwirkungen ist auf Grund des hohen Deckungsbeitrags effizient, während Resorts mit geringeren Umweltwirkungen je Referenzeinheit auf Grund des geringeren

Deckungsbeitrags als nicht ökoeffizient identifiziert werden. Im Rahmen der Optimierung und Maßnahmenbeurteilung werden die vielfältig nutzbaren Ergebnisse der EcoPlex-Methode dargestellt. Dabei kann nicht nur die Eignung von Maßnahmen zur Zielerreichung beurteilt werden, sondern auch die Rentabilität und die über Zielvorgaben hinausgehenden Effekte analysiert und bewertet werden.

Im Rahmen der Optimierung in Ziffer 5.4 zeigt sich, dass die ökologischen Zielvorgaben aus Ziffer 5.1 mit verschiedenen Maßnahmen adressiert werden können. Keine der untersuchten Maßnahmen kann alle Zielvorgaben erfüllen. Auf Grund der regionalen Restriktionen können grundsätzlich alle Zielvorgaben nur dann ohne Einschränkungen erfüllt werden, wenn die Maßnahme in Resort R_5 oder einem anderen Resort in der Region ansetzt, da nur eine Reduktion der dort verursachten Umweltwirkungen zu einer Erfüllung der Restriktion führen kann.

Die beurteilten Maßnahmen unterscheiden sich deutlich in ihrem Umfang und ihrer Art. So zeigt sich, dass durch den Austausch der Kälteanlage in Resort R_2 die Ziele in Bezug auf Beiträge zum Eutrophierungspotential vollständig erreicht werden können, und das zu relativ geringen Investitionskosten. Es ergibt sich eine Effizienzkennzahl der Maßnahme von 19,49, das heißt jeder investierte Euro steigert den Gesamtdeckungsbeitrag um 19,49 €. Während die Investition nur einmal zu tätigen ist, fallen die reduzierten Betriebskosten und Umweltwirkungen hingegen wiederkehrend an. Beiträge zu Treibhauspotential und Versauerungspotential sind weiterhin knappe Ressourcen. Die Zielvorgabe in Bezug auf das Versauerungspotential kann auf Grund der geographischen Lage des Resorts nicht erfüllt werden.

Durch den Austausch der Kälteanlage in Resort R_5 können zwar die Reduktionsziele im Hinblick auf Eutrophierungspotential und Versauerungspotential erreicht werden. Beiträge zum Treibhauspotential sind weiterhin eine knappe Ressource. Die Maßnahme hat eine Effizienzkennzahl von 13,81, das heißt jeder investierte Euro steigert den Gesamtdeckungsbeitrag um 13,81 €.

Resort R_3 wird als ökoeffizient identifiziert. Auf Grund der großen absoluten Umweltwirkungen werden jedoch auch hier technische Maßnahmen in Erwägung gezogen, da somit auch ein entsprechend großer Spielraum für die Reduktion

von Umweltwirkungen vorliegt. Durch die Umstellung der Beleuchtung, die Verwendung von solarthermischen Anlagen sowie den Einsatz eines BHKW zur Stromerzeugung und Kühlung fallen zwar große Investitionskosten an, jedoch erfolgt auch eine drastische Reduktion der Treibhausgasemissionen in Höhe von rund 8 % der gesamten Emissionen aller Resorts im Basisjahr und eine Reduktion von 5,7 % der Gesamtbeiträge zum Eutrophierungspotential. Die Umweltziele werden in Bezug auf Treibhaus- und Eutrophierungspotential durch diese umfangreichen Maßnahmen deutlich übererfüllt. Wird nur die Effizienz der Maßnahmen zur Zielerfüllung betrachtet, ist diese mit einer Effizienzkennzahl von 3,49 zwar als effizient einzustufen, die Maßnahmen in Resort R_2 und R_5 sind jedoch deutlich effizienter.

Die Zielvorgaben dieser Analyse können nur durch die Kombination der untersuchten Maßnahmen erreicht werden. Hier empfehlen sich auf Grund der hohen Rentabilität die Maßnahmen in Resort R_2 und R_5 . Die Maßnahme in Resort R_3 hat zwar das mit Abstand größte Reduktionspotential, die Rentabilität der Maßnahmen ist auf Grund der hohen Investitionskosten jedoch vergleichsweise gering. Grundsätzlich ist auch die Analyse weiterer technischer Maßnahmen möglich.

Die EcoPlex-Methode erlaubt die Analyse verschiedener technischer Maßnahmen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf ökologische und ökonomische Aspekte im Gesamtkontext des Unternehmens. Ökologische Aspekte können somit direkt in betriebliche Entscheidungsprozesse einbezogen werden und können durch die Verknüpfung mit ökonomischen Aspekten systematisch beurteilt und verglichen werden. Die Auswahl von konkreten Maßnahmen zur Umsetzung kann auf Basis der hier dargestellten Ergebnisse im Unternehmen durchgeführt werden. Weiterführende Informationen zu Umweltwirkungen sind in den zu Grunde liegenden Ökobilanzen verfügbar.

6 Evaluierung der Methode

In diesem Kapitel wird die Methode gegenüber den Anforderungen aus Ziffer 3 evaluiert. Hierfür werden die Anforderungen einzeln aufgeführt und die Evaluierung jeweils erläutert.

6.1 Methodische Anforderungen

Im Folgenden wird die entwickelte Methode auf die in Ziffer 3.1 gestellten methodischen Anforderungen hin überprüft. Diese sind:

- Anschlussfähigkeit an die Methode der Ökobilanz

Die Anwendung des EcoPlex bezieht direkt Ökobilanzergebnisse ein. Diese stellen – neben dem Deckungsbeitrag – die Grundlage der Berechnung dar. Durch die Belastbarkeit und Objektivität der Methode der Ökobilanz wird in der Folge auch die Objektivität der darauf aufbauenden EcoPlex-Methode sichergestellt. Die Ergebnisse der Ökobilanz gehen direkt als Eingangsgrößen in die EcoPlex-Methode ein. Die Anschlussfähigkeit ist somit gegeben.

- Konsistenter Betrachtungsrahmen

Durch die Festlegung eines einheitlichen Betrachtungsrahmens von ökologischer und ökonomischer Analyse sowie einer einheitlichen Detailtiefe bei der Betrachtung beider Dimensionen wird die Konsistenz der Analyse sichergestellt. Dabei ist der Bezug auf die gleiche Referenzeinheit sowie einheitliche Abschneidekriterien Voraussetzung. Im Rahmen der Dokumentation sind die Abschneidekriterien, Datengrundlagen und Betrachtungszeiträume anzugeben. Ein einheitlicher Betrachtungsrahmen von ökologischen und ökonomischen Aspekten wird sichergestellt. Die Konsistenz des Betrachtungsrahmens ist somit gegeben.

- Quantifizierte Zielvorgaben

Die quantitative Beschreibung der Restriktionen ist Voraussetzung für die Anwendung der EcoPlex-Methode. Dies kann über festgelegte absolute Werte (beispielsweise die Emission von maximal 1.000 t CO₂-Äq. für den Betrachtungszeitraum) erfolgen oder wie im vorliegenden Fall über relative Re-

duktionsvorgaben aus dem betrieblichen Umweltmanagement im Bezug zu einer definierten Basisperiode in Verbindung mit einer ökobilanziellen Analyse der Basisperiode (hier die Reduktion der Beiträge zu AP, EP und GWP um einen festgelegten Prozentsatz). Die Anforderung ist für diese Studie erfüllt.

- Fortschreibbarkeit der Eingangsdaten

Die Fortschreibbarkeit der Eingangsdaten ist eine Voraussetzung für die fortwährende Anwendung der EcoPlex-Methode. Dies erlaubt beispielsweise die Aktualisierung der Analyse mit Werten aus zukünftigen Perioden. Die Fortschreibbarkeit wird in dieser Arbeit im Rahmen der Analyse der Optimierungsmaßnahmen in Ziffer 5.4 nachgewiesen. Ändern sich durch technische Maßnahmen oder andere Effekte relevante Eingangswerte, können diese mit Hilfe der Ökobilanz und der Deckungsbeitragsrechnung auf ihre ökologischen und ökonomischen Auswirkungen hin überprüft werden. Die geänderten Werte können mit geringem Aufwand in die EcoPlex-Methode eingebracht werden und die Auswirkungen im Gesamtkontext analysiert werden. Das Vorgehen für die Fortschreibung für Folgeperioden ist analog. Der manuelle Arbeitsaufwand für die Fortschreibung ist dabei als relativ gering zu betrachten. Die Anforderung ist somit erfüllt.

- Transparenz und Reproduzierbarkeit

Durch die Verwendung und Verknüpfung von etablierten Methoden wie der Ökobilanz, Deckungsbeitragsrechnung und des Simplex-Algorithmus sowie der Vermeidung von subjektiven Einflussfaktoren sind die Ergebnisse der EcoPlex-Methode nachvollziehbar und reproduzierbar. Eine wiederholte Durchführung aller Berechnungen liefert stets die gleichen Ergebnisse. Die Anforderung ist somit erfüllt.

6.2 Praktische Anforderungen

Im Folgenden wird die EcoPlex-Methode im Hinblick auf die in Ziffer 3.2 definierten praktischen Anforderungen überprüft.

- Datenverfügbarkeit

Im Rahmen der Anwendung der EcoPlex-Methode werden zum größten Teil bereits verfügbare Daten herangezogen. Der Aufwand für die Datensammlung sowie die anschließende Aufbereitung der Daten ist dabei als gering zu beurteilen. Die Anforderung ist somit erfüllt.

- Angemessene Detailtiefe

Die formulierten Analyseziele werden durch die Untersuchung auf Resortebene erfüllt. Resorts mit dem geringsten ökologisch-ökonomischen Zielerreichungsgrad werden identifiziert. Im Rahmen der detaillierten Analyse können ökologische Treiber identifiziert und darauf basierend Maßnahmen-schwerpunkte abgeleitet werden. Ausgewählte Maßnahmen werden anschließend im Gesamtkontext auf ihre ökologischen und ökonomischen Wirkungen untersucht und beurteilt. Die Anforderung ist somit erfüllt.

- Fortschreibbarkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse der EcoPlex-Methode müssen nach einer Anpassung der Eingangswerte fortschreibbar sein und mit den Ergebnissen der Vorperiode vergleichbar sein. Auch hier zeigt sich im Rahmen der Beurteilung von Maßnahmen bereits, dass diese Anforderung erfüllt wird. Durch den Vergleich von Maßnahmen mit der Ausgangslösung können die Auswirkungen auf das Gesamtsystem dargestellt werden und sind mit den ursprünglichen Ergebnissen verknüpfbar. Die Anforderung ist somit erfüllt.

6.3 Möglichkeiten und Grenzen

Mit dem entwickelten Ansatz können die Ergebnisse von Ökobilanzstudien in Verbindung mit ökonomischen Kennzahlen verknüpft und direkt in organisatorische Entscheidungsprozesse einbezogen werden.

Die systematische Verknüpfung bestehender Ansätze der Ökobilanz, der Deckungsbeitragsrechnung sowie des Simplex-Algorithmus zur Ressourcen- und Kapazitätsplanung in Verbindung mit Zielvorgaben aus dem betrieblichen Umweltmanagement zur EcoPlex-Methode stellt einen innovativen Ansatz zur betrieblichen Entscheidungsfindung dar. Durch den ökologisch-ökonomischen Ansatz wird die Relevanz von Umweltaspekten für die Entscheidungsfindung gesteigert. Bei der Beurteilung der technischen Maßnahmen zeigt sich, dass nicht zwangsweise die Maßnahmen mit den größten Reduktionspotentialen als am besten geeignet identifiziert werden, da bei Übererfüllung der ökologischen Ziele organisatorische Restriktionen – in diesem Fall die Beschränkung der Übernachtungszahlen – zur Anwendung kommen. Für eine Beurteilung der Übererfüllung ökologischer Ziele besteht noch weiterer Forschungsbedarf.

Die EcoPlex-Methode ist grundsätzlich auf eine Vielzahl von Situationen anwendbar. Voraussetzung ist dabei die Skalierbarkeit der zu Grunde liegenden Referenzeinheit. Die Referenzeinheit muss dabei so gewählt werden, dass die Summe aller Referenzeinheiten die Gesamtfunktion des betrachteten Unternehmensbereichs darstellt, also den gesamten erzielten Deckungsbeitrag und die gesamten betrachteten Umweltwirkungen. Andere Anwendungsfälle wurden bereits untersucht [61]. Grundsätzlich ist die EcoPlex-Methode in allen Bereichen anwendbar und um weitere ökologische, technische oder organisatorische Aspekte erweiterbar.

Im Rahmen der Analyse können grundsätzlich auch Produkte mit verschiedenen Referenzeinheiten betrachtet werden. Die Beurteilung erfolgt im Hinblick auf die Beiträge der Produkte zur Zielerreichung des Unternehmens. Hierdurch werden Produkte und Dienstleistungen nicht wie bei der Ökobilanz auf Basis ihrer funktionellen Einheit sondern im Hinblick auf ihren Beitrag zum Gesamtdeckungsbeitrag und damit zum Unternehmensergebnis bewertet.

Eine Einschränkung der Anwendung der EcoPlex-Methode tritt bei sich ändernden Systemen auf. Tritt im Verlauf der Analyse eine Änderung der ökologischen oder ökonomischen Aspekte der betrachteten Referenzeinheiten auf, kommt die Methode an die Grenzen ihrer Anwendbarkeit. Dies kann beispielsweise bei Transportprozessen der Fall sein. Ändert sich das Emissionsprofil eines Lastkraftwagens durch das sukzessive Ausladen von Gütern und erhält somit jedes

Warenpaket ein individuelles Umwelt- und Kostenprofil, ist die EcoPlex-Methode nicht ohne weiteres anwendbar. In diesem Fall sind mittels geeigneter Methoden Durchschnittswerte zu bilden und für die Analyse heranzuziehen. Im Rahmen der Fallstudie wurde mit Mittelwerten gearbeitet. Es zeigt sich, dass dies in der praktischen Anwendung problemlos ist. Auch bei Produkten oder Prozessen, bei denen die Definition einer skalierbaren Referenzeinheit nicht gegeben ist, ist die Anwendbarkeit der Methode eingeschränkt. Werden Mittelwerte gebildet, sind die zu Grunde liegenden Annahmen im Rahmen der Untersuchung zu dokumentieren. Somit ist die Anwendbarkeit der EcoPlex-Methode auch in diesem Fall sichergestellt.

Eine praktische Einschränkung ist die Komplexität des betrachteten Systems. Grundsätzlich ist die Anzahl von Parametern, Restriktionen und Produkten nicht begrenzt. Jedoch steigt der Arbeits- und Berechnungsaufwand exponentiell an. Im vorliegenden Anwendungsbeispiel war der Berechnungsaufwand überschaubar, werden jedoch mehrere Hundert Produkte mit einer Vielzahl von Restriktionen analysiert, ist insbesondere der Aufwand für die Berechnung der ökologischen Eingangsdaten durch die Erstellung von Ökobilanzen deutlich aufwändiger.

Durch den über die Skalierbarkeit der Referenzeinheit erreichten Bezug auf die Gesamtumweltwirkungen ist die EcoPlex-Methode auch an die derzeit entwickelte ISO/TS 14072 zur Quantifizierung der Umweltwirkungen von Unternehmen und Organisationen anschlussfähig [57]. Die systematische Quantifizierung der Umweltwirkungen von Organisationen gilt derzeit als eine der größten Herausforderungen im Hinblick auf organisatorische Nachhaltigkeitsbemühungen [28]. Die EcoPlex-Methode kann durch die Verknüpfung von produktbezogenen ökologischen und ökonomischen Aspekten mit betrieblichen Zielvorgaben hier einen wichtigen Beitrag zur verbesserten Einbeziehung von ökologischen Aspekten in betriebliche Planungs- und Entscheidungsprozesse liefern.

7 Zusammenfassung

Das Bewusstsein für die Umweltwirkungen wirtschaftlicher Tätigkeiten hat in Politik, Öffentlichkeit und Unternehmen stark zugenommen. Daher hat die Einbeziehung ökologischer Aspekte in betriebliche Planungsprozesse in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen.

Ökologische Aspekte sind in vielen Bereichen zu einem Kriterium bei Kaufentscheidungen geworden. In politischen Entscheidungen spiegelt sich dies durch eine Vielzahl von Gesetzesinitiativen wider. Gleichzeitig zeigt sich auch, dass ökologisch nachhaltig operierende Unternehmen in vielen Fällen wirtschaftlich erfolgreicher sind als ihre weniger umweltbewussten Konkurrenten, da die Reduktion von Umweltwirkungen in vielen Fällen auch zu einer Reduktion des Ressourcenverbrauchs und folglich auch zu spürbaren Kostenreduktionen führt. Gleichzeitig führen ökologische Verbesserungen zu einer positiveren Wahrnehmung von Unternehmen und den von ihnen angebotenen Produkten.

Das Ziel dieser Arbeit ist die verstärkte Einbeziehung von ökologischen Aspekten in betriebliche Entscheidungsprozesse. Insbesondere steht dabei die Frage im Mittelpunkt, wie festgelegte Umweltziele zu minimalen Kosten erreicht werden können. Bisherige Ansätze zur Betrachtung ökologischer und ökonomischer Aspekte umfassen dabei die Monetarisierung von Umweltwirkungen, die ökologische oder soziale Lebenszykluskostenrechnung sowie die Ökoeffizienzanalyse. Die damit verbundene geringe Objektivität und Transparenz der Ergebnisse ist jedoch problematisch. Weiterhin sind die bestehenden Ansätze meist nur auf Produkt- nicht jedoch auf Unternehmensebene anwendbar.

Die entwickelte Methode setzt an diesem Punkt an und verknüpft ökologische und ökonomische Aspekte in einem einheitlichen Betrachtungsrahmen auf Unternehmensebene. Produktbezogene Werte werden dabei mit Zielvorgaben auf Unternehmensebene kombiniert, wodurch ein unternehmensspezifischer Betrachtungsrahmen geschaffen wird. Die im Rahmen der Arbeit entwickelte EcoPlex-Methode ist an die Methode der Ökobilanz anschlussfähig und kombiniert diese mit produktbezogenen ökonomischen Kenngrößen sowie betrieblichen Umweltzielen. Auf dieser Grundlage werden eine Analyse des Gesamtsystems sowie die Optimierung inklusive der Beurteilung von Maßnahmen durchgeführt.

Die EcoPlex-Methode stellt dadurch eine innovative Weiterentwicklung existierender Ansätze zur Einbeziehung ökologischer Aspekte in betriebliche Entscheidungsprozesse dar.

Die Methode basiert auf einem Mischansatz aus bottom-up und top-down Analyse. Die Ökobilanz quantifiziert produktbezogene Umweltwirkungen durch die Abbildung von produktbezogenen Massen- und Energieströmen von der Rohstoffentnahme über die Verarbeitung hin zum fertigen Produkt. Analog dazu werden mit den gleichen Systemgrenzen die Deckungsbeiträge der untersuchten Produkte als ökonomische Kenngrößen quantifiziert. Die Vorgabe von Umweltzielen auf Unternehmensebene stellt den top-down Ansatz dar. Hierbei werden Ober- oder Untergrenzen quantitativ dargestellt. Die Vorgehensweise der EcoPlex-Methode ist an das Vorgehen der Methode der Ökobilanz angelehnt und teilt sich in vier Hauptschritte auf:

Schritt 1: Betrachtungsrahmen

Schritt 2: Berechnung

Schritt 3: Interpretation der Ergebnisse

Schritt 4: Optimierung

Analog zum Vorgehen der Ökobilanz wird im ersten Schritt das Ziel der Untersuchung sowie der Untersuchungsrahmen festgelegt. Dies umfasst die zu untersuchenden Umweltwirkungen, die Festlegung der ökonomischen Kenngrößen, die Auswahl von Restriktionen sowie die geplante Nutzung der Ergebnisse.

Im zweiten Schritt werden sowohl die Eingangswerte für die Berechnung als auch die Zielwerte berechnet, in ein einheitliches Gleichungssystem überführt und dieses anschließend gelöst. Die Berechnung der produktbezogenen Umweltwirkungen erfolgt dabei mit der Methode der Ökobilanz. Diese erlaubt die systematische, objektive und transparente Quantifizierung von Umweltwirkungen über den gesamten Lebenszyklus von Produkten oder Dienstleistungen. Basierend auf dem Betrachtungsrahmen der Ökobilanz wird analog der Deckungsbeitrag für die analysierten Produkte berechnet. Die Konsistenz von Betrachtungsrahmen und Systemgrenzen ist dabei Voraussetzung für die nachfolgenden Berechnungen. Durch die Ökobilanz und die Deckungsbeitragsrechnung wird ein ökologisch-ökonomisches Profil der Produkte berechnet. Die berechneten Werte

werden in Verbindung zu den quantifizierten Umweltzielen gesetzt und in ein Gleichungssystem überführt. Mit Hilfe des Simplex-Algorithmus wird dann ein optimales Portfolio der Produkte identifiziert.

Im dritten Schritt werden die Ergebnisse der vorhergehenden Berechnung interpretiert. Dabei werden Schwachstellen, also Produkte mit geringer Ökoeffizienz, identifiziert. Weiterhin wird knappen Ressourcen – hier Umweltwirkungen – ein Schattenpreis zugewiesen, was eine unternehmensspezifische Monetarisierung der Umweltwirkungen darstellt, sowie die minimalen Kosten zur Erreichung der Umweltziele mit den aktuellen Produkten berechnet. Dies erlaubt es Unternehmen, Maßnahmen zur Reduzierung von Umweltwirkungen oder zur Erhöhung des Deckungsbeitrags gezielt für Produkte mit geringer Ökoeffizienz auszuwählen. Darüber hinaus kann aus den Ergebnissen ein Maßnahmenbudget abgeleitet werden.

Im vierten Schritt werden ausgewählte Maßnahmen bezüglich ihrer Wirkung auf das Gesamtsystem hin untersucht. Dazu werden sie auf ihre Auswirkungen auf für die Ökobilanz und die Deckungsbeitragsrechnung relevante Eingangsgrößen hin überprüft. Anschließend wird mit Hilfe der Ökobilanzierung sowie der Deckungsbeitragsrechnung der ökologische und ökonomische Rucksack der Produkte erneut ermittelt. Die Zielfunktion sowie die Gleichungen der Nebenbedingungen werden mit den neuen Werten befüllt und das Gleichungssystem wird mit den neuen Eingangswerten gelöst und der Einfluss der Maßnahmen auf das Gesamtsystem untersucht.

Die Methode wurde am Beispiel des Betriebs von touristischen Resorts angewandt. Für das Basisjahr 2012 wird der Betrieb von acht Resorts mit Fokus auf den Energieverbrauch untersucht. Ziel ist die Analyse der Resorts im betrieblichen Gesamtkontext und die anschließende Beurteilung technischer Maßnahmen. Die Kernaufgabe des Unternehmens ist das „Anbieten von Urlaub“. Die vom Unternehmen angebotene Dienstleistung ist also das Verbringen von Zeit in den Resorts. Als Referenzeinheit wird deshalb eine Gastnacht festgelegt. Der Betrachtungsrahmen umfasst den Energieverbrauch im Basisjahr sowie die daraus resultierenden Kosten und Umweltwirkungen. Die Kosten für Energieträger sind eine der größten Kostenpositionen im Betrieb der Resorts. Aus den Zielvorgaben des betrieblichen Umweltmanagements und historischen Emissionswer-

ten werden Umweltziele abgeleitet. Zunächst werden basierend auf dem Energiebedarf des Basisjahres, den Energiekosten, den Übernachtungszahlen und dem erzielten Erlös die gesamten Umweltwirkungen sowie der erzielte energie-kostenbelastete Gesamtdeckungsbeitrag der betrachteten Resorts R_1 - R_8 berechnet. Aus den Gesamtumweltwirkungen werden die durch Reduktionsziele festgelegten Obergrenzen der Umweltwirkungen festgelegt. Die mittels der EcoPlex-Methode durchgeführten Berechnungen identifizieren die Resorts R_2 und R_5 als nicht ökoeffizient. Auf Grund der hohen Umweltwirkungen wird auch Resort R_3 im Detail analysiert. Weiterhin wird ein Schattenpreis für die betrachteten Umweltwirkungen Treibhauspotential sowie Versauerungspotential berechnet. Zusätzlich wird aus dem durch die Einhaltung der Zielwerte reduzierten Gesamtdeckungsbeitrag ein Budget zur Umsetzung von technischen Maßnahmen ermittelt. Dies ist die Grundlage für eine erste Auswahl von möglichen technischen Maßnahmen.

Im Rahmen der Optimierung wird in den Resorts R_2 und R_5 jeweils der Austausch der Kälteanlage analysiert. In Resort R_3 wird der Austausch der Beleuchtung, der Einsatz einer solarthermischen Anlage zur Deckung des Warmwasserbedarfs, eine verbesserte Wärmedämmung der Gebäudehülle sowie der Austausch der aktuell verwendeten Dieselmotoren und Generatoren zur Stromerzeugung durch ein BHKW in Verbindung mit einem Nahkältenetz und einer Absorptionskälteanlage untersucht.

Die ausgewählten Maßnahmen werden anschließend auf ihre technischen, ökologischen und ökonomischen Auswirkungen hin untersucht und mit Hilfe der EcoPlex-Methode auf ihre Wirkung auf das Gesamtsystem hin beurteilt. Dabei zeigen sich deutliche Unterschiede in Bezug auf den Umfang der Reduktion der Umweltwirkungen und die Rentabilität. Der Einsatz des BHKW in Resort R_3 führt zwar zu den größten absoluten Reduktionen der Umweltwirkungen. Durch die Übererfüllung der ökologischen Ziele greifen jedoch die Beschränkungen der Übernachtungszahlen in den einzelnen Resorts. Der Austausch der Kälteanlagen in den Resorts R_2 und R_5 führt zwar zu geringeren Reduktionen der Umweltwirkungen, trägt aber bei geringeren Investitionskosten mehr zur Zielerfüllung bei. Die größte Wirkung auf das Gesamtsystem im Verhältnis zu den Investitionskosten hat der Austausch der Kälteanlage in Resort R_2 ; je investiertem

Euro wird der Gesamtdeckungsbeitrag um 19,49 € gesteigert. Durch Investition von 235.000 € werden die Betriebskosten in Resort R₂ um 142.600 € reduziert. Durch die aus der Maßnahme resultierende Reduktion der Umweltwirkungen steigt der Gesamtdeckungsbeitrags durch die Steigerung der Ausbringungsmenge um 4.582.000 €.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die entwickelte EcoPlex-Methode entscheidungsrelevante Informationen für Unternehmen liefert. Insbesondere die Beurteilung der Maßnahmen auf ihren Beitrag zur Erreichung der Umweltziele und die zum Teil erheblichen Steigerungen des erreichten Gesamtdeckungsbeitrags stellt dabei eine leistungsstarke Erweiterung bestehender Ansätze zur Beurteilung technischer Maßnahmen dar.

Die EcoPlex-Methode stellt durch die Analyse von ökologischen und ökonomischen Aspekten in einem einheitlichen Betrachtungsrahmen eine innovative Weiterentwicklung aktueller Ansätze zur Einbeziehung von ökologischen Aspekten in betriebliche Entscheidungsprozesse dar. Die EcoPlex-Methode ist ein effizientes Werkzeug zur Beurteilung und Steuerung von nachhaltigen Unternehmensstrategien.

8 Ausblick

Die in dieser Arbeit entwickelte EcoPlex-Methode erlaubt die Analyse von ökologischen und ökonomischen Aspekten in einem einheitlichen Betrachtungsrahmen. Sie lässt sich auf eine Vielzahl von Fragestellungen anwenden und liefert relevante Informationen zur Entscheidungsunterstützung.

Einschränkungen der Anwendbarkeit der Methode treten bei sich ändernden Systemen auf. Dies kann beispielsweise bei Logistikprozessen der Fall sein, wo sich das Gewicht und somit auch Kraftstoffverbrauch und Umweltwirkungen eines Lastkraftwagens durch das sukzessive Ab- oder Zuladen von Ladung ständig ändern. Diese Problematik kann durch die Bildung von Mittelwerten gelöst werden. Eine weitere praktische Einschränkung tritt bei extrem komplexen Systemen auf. Dies könnte beispielsweise die Analyse des europäischen Strommixes sein, bei dem jedes Kraftwerk und jeder Energieerzeuger mit eigenem Umweltprofil und eigenen Kostenstrukturen in die Analyse eingeht. Dies würde die Erstellung tausender Ökobilanzen und Deckungsbeitragsrechnungen nötig machen. Der Arbeitsaufwand für die Errechnung der Eingangswerte ist somit entsprechend höher. Der Berechnungsaufwand für den Simplex-Algorithmus steigt mit zunehmender Anzahl von Produkten und Restriktionen ebenfalls an. Die praktische Handhabbarkeit von solch komplexen Systemen ist derzeit insbesondere durch den extrem hohen manuellen Arbeitsaufwand als schwierig zu beurteilen. Durch die Automatisierung der Erstellung von Ökobilanzen und den Einsatz von geeigneten Computerprogrammen wird zukünftig eine deutliche Senkung des manuellen Arbeitsaufwands erwartet. Die Verknüpfung von ökologischen Aspekten auf Produkt- und Unternehmensebene ist ein großes Forschungsthema im Bereich der Ökobilanzierung. Dies zeigt sich an der geplanten Einführung von ISO/TS 14072 [57] zur Ökobilanzierung von Unternehmen in Kombination mit Produktökobilanzen. Auch die Einbeziehung weiterer Aspekte wie Landnutzung [6] oder Biodiversität [64] kann in kommenden Weiterentwicklungen der EcoPlex-Methode betrachtet werden. Bei Erweiterung des Betrachtungsrahmens können grundsätzlich alle aus ökologischer und ökonomischer Sicht relevanten Produkte und Prozesse eines Unternehmens einbezogen werden, um die Aussagekraft der Analyse weiter zu steigern und die EcoPlex-Methode als ein zentrales Instrument der Unternehmenssteuerung zu etablieren.

Literaturverzeichnis

- [1] Albrecht, S.: Systematischer Ansatz zur Analyse der Energiekostensensitivität von Produktsystemen unter Berücksichtigung der Wertschöpfungskette im Rahmen der Ganzheitlichen Bilanzierung. Dissertation, Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Bauphysik (2014).
- [2] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.: BHKW-Kenndaten 2014/2015 Module, Anbieter, Kosten. Frankfurt am Main (2014).
- [3] Atmosfair: Klimabewusst reisen.
<https://www.atmosfair.de/kompensieren/flug>. Stand 04.03.2015.
- [4] BASF: Dämmen in den Tropen. http://worldaccount.basf.com/wa/plasticsEU~de_DE/portal/show/common/content/literature/plastics/0209/plastics_0209_focus_asia_isulation_tropics. Stand 04.03.2015.
- [5] Baulinks Studie: Über 80% Energieeinsparung durch LED-Lichtlinien im Korridor. <http://www.baulinks.de/webplugin/2012/1350.php4>. Stand 04.03.2015.
- [6] Beck, T.; Bos, U.; Wittstock, B.; Baitz, M.; Fischer, M.; Sedlbauer, K: LANCA®: Land Use Indicator Value Calculation in Life Cycle Assessment. Fraunhofer Verlag, Stuttgart (2010).
- [7] Beckenbach, F.; Hampicke, U.; Schulz, W.: Möglichkeiten und Grenzen der Monetarisierung von Natur und Umwelt. Schriftenreihe des IÖW 20/88, Berlin (1989), S. 3-18.
- [8] Bez, A: Kälte durch Wärme erzeugen. Möglichkeiten der mit Kraft-Wärme-Kopplung beheizten Absorptionskältemaschine im Vergleich zur Kompressionskältemaschine unter wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten. Bachelorarbeit, Hochschule Hamburg (2012).
- [9] Bixby, R.: Solving real-world linear programs: A decade and more of progress. Operations Research 50, (2002), Heft Nr. 1, S. 3-15.
- [10] Blase, F.: Optimierung der Energieeffizienz des ROBINSON CLUBS „Club Maledives“. Ein nüchterner Blick auf ein Paradies. Bachelorarbeit, Fachhochschule Hannover (2010).

- [11] BMVBS: Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden. BMVBS-Online-Publikation Nr. 07/2012. http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Online/2012/DL_ON072012.pdf?__blob=publicationFile&v=2. Stand 04.03.2015.
- [12] Bockstael, N. E.; Freemann, A. M.; Kopp, R. J.; Portney, P. R., Smith, V.K.: On Measuring Economic Values for Nature. *Environmental Science & Technology* 34 (2000), Heft Nr. 8, S. 1384-1389.
- [13] Burckhardt, G (Hrsg.): *Corporate Social Responsibility – Mythen und Maßnahmen*. Springer Gabler, Wiesbaden (2013).
- [14] Burkard, R. E.: Einführung in die mathematische Optimierung. Vorlesungsmanuskript TU Graz. www.opt.math.tu-graz.ac.at/%7Ehatzl/Vorlesungen/MathoptSS09/Opt.pdf. Stand 24.08.2016.
- [15] Carlowitz, H. C.: *Sylvicultura oeconomica oder Haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur Wilden Baum-Zucht*. oekom-Verlag, München (2013).
- [16] Cezanne, W.: *Allgemeine Volkswirtschaftslehre*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, Wien (2005).
- [17] Climatedps. Sunshine & Daylight Hours in Cairo, Egypt. <http://www.cairo.climatedps.com/sunlight.php>. Stand 04.03.2015.
- [18] Climatedps. Sunshine & Daylight Hours in Cape Town, South Africa. <http://www.cape-town.climatedps.com/sunlight.php>. Stand 04.03.2015.
- [19] Climatedps. Sunshine & Daylight Hours in Marrakech, Morocco. <http://www.marrakech.climatedps.com/sunlight.php>. Stand 04.03.2015.
- [20] Coase, R. H.: The problem of social cost. *Journal of Law and Economics* 3 (1960), Heft Nr. 1, S. 1-44.
- [21] Dantzig, G.: *Programming in a linear structure*. U.S. Air Force Comptroller, USAF, Washington D.C. (1948).
- [22] Demsetz, H.: Toward a Theory of Property Rights. *American Economic Review* 57 (1967), Heft Nr. 2, S. 347-359.

- [23] DIN EN ISO 14001. Umweltmanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung (ISO14001:2004 + Cor 1:2009); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14001:2004 + AC:2009.
- [24] DIN EN ISO 14025. Umweltkennzeichnungen und –deklarationen – Typ III Umweltdeklarationen – Grundsätze und Verfahren (ISO 14025:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14025:2011.
- [25] DIN EN ISO 14040. Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006.
- [26] DIN EN ISO 14044. Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14044:2006.
- [27] DIN EN ISO 14045. Umweltmanagement – Ökoeffizienzbewertung von Produktsystemen – Prinzipien, Anforderungen und Leitlinien (ISO 14045:2012). Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14045:2012.
- [28] EcoBalance 2014: Closing Ceremony. 30. Oktober 2014. Tsukaba, Japan (2014).
- [29] Endres, A.; Martiensen, J.: Mikroökonomik. Eine integrierte Darstellung traditioneller und moderner Konzepte in Theorie und Praxis. Kohlhammer-Verlag, Stuttgart (2007).
- [30] EU Emission Trading System (EU ETS). http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/index_en.htm. Stand 04.03.2015.
- [31] European Commission: Joint Research Centre. Institute for Energy and Transport. Solar radiation map Africa. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=en&map=africa>. Stand 04.03.2015.
- [32] European Commission: Carbon leakage. http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/cap/leakage/index_en.htm. Stand 04.03.2015.
- [33] European Commission: Reducing emissions from aviation. http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/aviation/index_en.htm. Stand 04.03.2015.
- [34] European Energy Exchange (EEX): Aktuelle Kurse von Emissionszertifikaten. <https://www.eex.com/de/>. Stand 08.06.2015.

- [35] European Voice: Energy intensive industries benefitting from ETS, says Commission. <http://www.europeanvoice.com/article/energy-intensive-industries-benefitting-from-ets-says-commission/>. Stand 04.03.2015.
- [36] Eyerer, P.: Ganzheitliche Bilanzierung. Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen. Springer, Berlin (1996).
- [37] Faltenbacher, M.: Modell zur ökologisch-technischen Lebenszyklusanalyse von Nahverkehrsbusssystemen. Dissertation. Universität Stuttgart, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde (IKP) (2006).
- [38] Faucheux, S.; Noël, J.-F.: Ökonomie natürlicher Ressourcen und der Umwelt. Metropolis-Verlag, Marburg (2001).
- [39] Förtsch, G.; Meinholz, H.: Handbuch Betriebliches Umweltmanagement. Springer Spektrum, Wiesbaden (2014).
- [40] Franzeck, J.: Methodik der Lebenszykluskostenanalyse und –planung (Life Cycle Costing) für die Entwicklung technischer Produktsysteme unter Berücksichtigung umweltlicher Effekte. Dissertation. Universität Stuttgart, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde (IKP) (1997).
- [41] GaBi 6. Software System and Databases for Life Cycle Engineering. Copyright, TM. Stuttgart, Echterdingen (1992-2015).
- [42] Geiger, C.; Kanzow, C.: Theorie und Numerik restringierter Optimierungsaufgaben. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg (2002).
- [43] Goedkopp, M; Spriensma, R. d.: The Eco-indicator 99 – A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. PRé Consultants, Amersfoort (2001).
- [44] Guinée, J.B.; Lindeijer, E.: Handbook on Life Cycle Assessment – Handbook on Life Cycle Management. Operational guide to the ISO standards. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (2002).
- [45] Hardin, G.: The Tragedy of the Commons. Science, Vol. 162 (1968), Heft Nr. 3859, S. 1243-1248.
- [46] Hauff, V.: Unsere gemeinsame Zukunft. Der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung. Eggenkamp Verlag, Greven (1987).

- [47] Heijungs, R.: Environmental life cycle assessment of products. Study carried out under the auspices of the National Reuse of Waste Research Programme (NOH). Centrum voor Milieukunde, Leyden (1992).
- [48] Heilbronner, R. L.: An Inquiry Into the Human Prospect. Norton, New York (1974).
- [49] Held, M.: Methodischer Ansatz und Systemmodell zur ökologisch-technischen Analyse zukünftiger Elektrofahrzeugkonzepte. Dissertation. Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Bauphysik (2014).
- [50] Herrmann, C.: Ökologische und ökonomische Bewertung des Materialrecyclings komplexer Abfallströme am Beispiel von Elektronikschrott. Eine Erweiterung zur Ganzheitlichen Bilanzierung. Dissertation. Shaker, Aachen (2004).
- [51] Horn, R.: Erstellung eines Modells zur ökologischen und ökonomischen Bilanzierung energetischer Sanierungsvorhaben für Bestandsquartiere. Masterarbeit, Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Bauphysik (2014).
- [52] Hunkeler, D.; Lichtenwort, K.; Rebitzer, G.: Environmental Life Cycle Costing. SETAC Press, Pensacola (2008).
- [53] Hunsager, E.A.; Bach, M.; Breuer, L.: An institutional analysis of EPD programs and a global PCR registry. International Journal of Life Cycle Assessment 19 (2014), Heft Nr. 4, S. 786-795.
- [54] International Energy Agency (IEA): Energy Balances of Non-OECD countries, 2014 edition. http://www.iea.org/bookshop/642-Energy_Balances_of_Non-OECD_Countries. Stand 04.03.2015.
- [55] International Energy Agency (IEA): Energy Statistics of Non-OECD countries, 2014 edition. http://www.oecd-ilibrary.org/energy/energy-statistics-of-non-oecd-countries_19962851-en. Stand 04.03.2015.
- [56] ISO 26000:2010. Guidance on social responsibility (2010).
- [57] ISO/TS 14072: Environmental management – Life Cycle Assessment – Requirements and guidelines for organizational life cycle assessment (under development) (2014).

- [58] Kicherer, A.; Schaltegger, S.; Tschochohei, H.; Ferreira Pozo, B.: Eco-Efficiency. Combining Life Cycle Assessment and Life Cycle Costs via Normalization. *International Journal of Life Cycle Assessment* 12 (2007), Heft Nr. 7, S. 537 – 543.
- [59] Kirchgässner, G.: *Homo oeconomicus: das ökonomische Modell individuellen Verhaltens und seine Anwendung in den Wirtschafts- und Sozialwissenschaften*. Mohr Siebeck, Tübingen (2008).
- [60] Klöpffer, W.; Grahl, B.: *Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*. Wiley-VCH, Weinheim (2009).
- [61] Krieg, H.; Albrecht, S.; Jäger, M.: *Systematic Monetisation of Environmental Impacts*. *WIT Transaction on Ecology and the Environment*, 173. WIT Press, Wessex (2013), S. 513-524.
- [62] Kupfer, T.: *Prognose von Umweltauswirkungen bei der Entwicklung chemischer Anlagen. Ein Beitrag zur ganzheitlichen Bilanzierung*. Dissertation. Universität Stuttgart, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde (IKP) (2005).
- [63] Lampenwelt.de: LED-Beleuchtung. Preisübersicht. <http://www.lampenwelt.de/LED/LED-Lampen/GU10-LED-Lampen>. Stand 04.03.2015.
- [64] Lindner, J.P.: *Proposal of a unified biodiversity impact assessment method*. Presentation, Yokohama (2012).
- [65] Mahler, D.; Barker, J.; Belsand, L.; Schulz, O.: *Green Winners*. http://www.atkearney.com/documents/10192/178350/green_winners.pdf/8a608fc4-a799-4972-b524-975814df1a0e. Stand 04.03.2015.
- [66] Makishi Colodel, C. T.: *Systematischer Ansatz zur Abschätzung von länderspezifischen Sachbilanzdaten im Rahmen der Ökobilanz*. Dissertation. Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Bauphysik (2010).
- [67] Meadows, D.L.; Meadows, D.H.: *Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit*. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart (1972).
- [68] Meffert, H.; Kirchgeorg, M.: *Marktorientiertes Umweltmanagement. Konzeption, Strategie, Implementierung*. Schäffer-Poeschel, Stuttgart (1998).

- [69] MyClimate: Nachhaltiger Klimaschutz mit myclimate. <http://www.myclimate.org/de/>. Stand 04.03.2015.
- [70] Nobelprize.org - The Official Website of the Nobel Prize: Elinor Ostrom – Facts. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/economic-sciences/laureates/2009/ostrom-facts.html. Stand 04.03.2015.
- [71] Oberhuber, N.: Die Umwelt muss warten. <http://www.zeit.de/2013/35/gruene-aktienfonds-esg-kriterien>. Stand 04.03.2015.
- [72] Ostrom, E.: Governing the Commons. Cambridge University Press, Cambridge (1990).
- [73] PE International: GaBi Energy data has the best quality. <http://www.pe-international.com/company/newsroom/news-detail/article/european-commission-gabi-energy-data-has-the-best-quality/>. Stand 04.03.2015.
- [74] PE International: Übersicht Kunden. <http://www.pe-inter-national.com/deutsch/kunden/uebersicht-kunden/>. Stand 04.03.2015.
- [75] Pigou, A. C.: Economics of welfare. MacMillan, London (1962).
- [76] Reap, J.; Roman, F.; Duncan, S.; Bras, B.: A survey of unresolved problems in Life Cycle Assessment – part 2: impact assessment and interpretation. International Journal of Life Cycle Assessment 13 (2008), Heft Nr. 9, S. 374-388.
- [77] RED Eléctrica de España: The Spanish Electricity System. Preliminary Report 2013. <http://www.ree.es/en/publications/spanish-electrical-system/spanish-electricity-system-preliminary-report-2013>. Stand 04.03.2015.
- [78] Robinson Club GmbH: Persönliche Kommunikation (Herr Ingo Woltmann) (2013).
- [79] Robinson Club GmbH: Energie- und Wasserverbrauch. Interner Bericht (2013).
- [80] Robinson Club GmbH: Energy-Audit. Interner Bericht (2014).
- [81] Robinson Club GmbH: Instandhaltungs-Controlling. Interner Bericht (2013).

- [82] Robinson Club GmbH: Proyecto para la mejora de la eficiencia energética del Robinson Club Cala Serena (Projekt zur Steigerung der Energieeffizienz des Robinson Clubs Cala Serena). Interner Bericht (2012).
- [83] Robinson Club GmbH: Technikkosten. Interner Bericht (2013).
- [84] Schatsky, D: Surge in take up of life cycle assessment tools to improve sustainability. <http://www.theguardian.com/sustainable-business/life-cycle-assessment-sustainability>. Stand 04.03.2015.
- [85] Schmidheiny, S.: Kurswechsel. Globale unternehmerische Perspektiven für Entwicklung und Umwelt. Artemis und Winkler, München (1992).
- [86] Schuckert, M.: Ganzheitliche Bilanzierung – vom Bauteil zum System am Beispiel von Verkehrsträgern. Dissertation. Universität Stuttgart, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde (IKP) (1996).
- [87] Schuller, O.: Methode zur Bestimmung von Umweltprofilen der zukünftigen Erdölversorgung und erdölbasierten Kraftstoffbereitstellung. Dissertation. Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Bauphysik (2010).
- [88] Shibasaki, M.: Methode zur Prognose der Ökobilanz einer Großanlage auf Basis einer Pilotanlage in der Verfahrenstechnik. Ein Beitrag zur Ganzheitlichen Bilanzierung. Dissertation. Universität Stuttgart, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde (IKP) (2009).
- [89] Smith R. J.: Resolving the Tragedy of the Commons by Creating Private Property Rights in Wildlife. CATO Journal 1, (1981), Heft Nr. 2, S. 439-468.
- [90] Spiegel Online. Nachhaltiges Reisen: Wie Öko-Angebote die Reisebranche verändern. <http://www.spiegel.de/reise/aktuell/-nachhaltiges-reisen-wie-oeko-angebote-die-reisebranche-veraendern-a-786037.html>. Stand 04.03.2015.
- [91] Spiegel: Emissionshandel: EU-Kommission fordert Mindestpreis für Verschmutzungsrechte. <http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/-eu-kommission-fordert-mindestpreis-fuer-verschmutzungsrechte-a-943999.html>. Stand 04.03.2015.

- [92] Stiefel, E.: Einführung in die numerische Mathematik. Teubner, Stuttgart (1970).
- [93] Swarr, T. E.; Hunkeler, D.; Klöpffer, W.; Pesonen, H.-L.; Citroth, A.; Brent, A. C.; Pagan, R.: Environmental Life Cycle Costing: A code of Practice. SETAC Press, Pensacola (2011).
- [94] The Guardian: Disney, Microsoft and Shell opt for self-imposed carbon emission taxes. <http://www.theguardian.com/sustainable-business/carbon-emissions-tax-microsoft-disney-shell>. Stand 04.03.2015.
- [95] TUI: Destination Sustainability. Sustainable Development Report 2011/2012. https://www.tui-group.com/en/sustainability/sust_management/reporting/sdreport2012. Stand 04.03.2015.
- [96] Umweltbundesamt: Glossar zum Ressourcenschutz. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/glossar-ressourcenschutz>. Stand 04.03.2015.
- [97] Umweltbundesamt: Ökonomische Bewertung von Umweltschäden – Methodenkonvention zur Schätzung externer Umweltkosten. <http://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/oekonomische-bewertung-von-umweltschaeden>. Stand 04.03.2015.
- [98] Umweltbundesamt: Systemanalyse. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/strategische-zukunftsforschung/systemanalyse>. Stand 27.06.2016.
- [99] VDI 2884: Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC). VDI Richtlinie (2005).
- [100] Verordnung (EG) Nr. 1221/2009 vom 25. November 2009 über die freiwillige Teilnahme von Organisationen an einem Gemeinschaftssystem für Umweltmanagement und Umweltbetriebsprüfung und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 761/2001, sowie der Beschlüsse der Kommission 2001/681/EG und 2006/193/EG (2009).

- [101] Volz, T.: Integration systematischer Analyse und Prognose in die Ganzheitliche Bilanzierung. Instrumentarium zur rechnergestützten Modellierung. Dissertation. Universität Stuttgart, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde (IKP) (1999).
- [102] Weber, W., Kabst, R.: Einführung in die Betriebswirtschaftslehre. Gabler, Wiesbaden (2012).
- [103] Weidema, B. P.: Using the budget constraint to monetarise impact assessment results. *Ecological Economics* 68, (2009), Heft Nr. 6, S. 1591-1598.
- [104] Wesselak, V: Regenerative Energietechnik. Springer, Berlin, Heidelberg (2013).
- [105] Winter, E. (Hrsg.): Gabler Wirtschaftslexikon. Springer Gabler, Wiesbaden (2013).
- [106] Wirtschaftslexikon 24, Stichwort: Schlupfvariable. <http://www.wirtschaftslexikon24.com/d/schlupfvariable/schlupfvariable.htm>. Stand 04.03.2015.
- [107] Wirtschaftslexikon 24, Stichwort: Ausbringungsmenge. <http://www.wirtschaftslexikon24.com/d/ausbringung-ausbringungsmenge/-ausbringung-ausbringungsmenge.htm>. Stand 04.03.2015.
- [108] Wittstock, B.: Methode zur Analyse und Beurteilung des Einflusses von Bauprodukteigenschaften auf die Nachhaltigkeitsbewertung im Rahmen der Zertifizierung von Gebäuden. Dissertation. Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Bauphysik (2012).
- [109] Wöhe, G.; Döring, U.: Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Vahlen-Verlag, München (2005).
- [110] Ziesing, H.-J.: Externe Kosten in der Stromerzeugung. Energie im Dialog. Band 4, VEWE Energieverlag, Frankfurt am Main (2004).
- [111] Zimmermann, W.: Operations-Research: quantitative Methoden zur Entscheidungsvorbereitung, R. Oldenbourg Verlag GmbH, München (1995).

Lebenslauf

Persönliche Daten

Geburtsdatum: 23.11.1982

Familienstand: Verheiratet

Geburtsort: Stuttgart

Berufliche Tätigkeiten

Seit 03/2010 Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung, Institut für Akustik und Bauphysik (ehemals Lehrstuhl für Bauphysik), Universität Stuttgart

Schulbildung und Studium

2009 Diplom Wirtschaftswissenschaften, Universität Hohenheim

10/2004 – 12/2009 Studium der Wirtschaftswissenschaften an der Universität Hohenheim. Vertiefungsrichtungen: Umweltmanagement, Entrepreneurship, Produktion & Logistik

06/2002 – 05/2003 Zivildienst, Klinik Dr. Römer, Calw-Hirsau

2002 Abitur, Hermann Hesse-Gymnasium, Calw

Konzepte zur Minimierung der ökologischen Auswirkungen betrieblicher Aktivitäten sind von zentraler Bedeutung für Unternehmen, insbesondere aufgrund verschärfter Umweltauflagen sowie eines zunehmenden Umwelt- und Nachhaltigkeitsbewusstseins vieler Verbraucher. Die Einbeziehung von ökologischen Aspekten in betriebliche Planungsprozesse erweist sich in der Praxis jedoch häufig als schwierig. Die vorliegende Arbeit liefert die methodische Grundlage für die systematische Verknüpfung von Ökologie und Ökonomie im betrieblichen Kontext. Durch die Zusammenführung von Ökobilanzergebnissen und ökonomischen Produktinformationen mit übergeordneten betrieblichen Umweltzielen erlaubt die hier entwickelte EcoPlex-Methode die Identifikation von Kosten zur Erreichung betrieblicher Umweltziele. Es werden Maßnahmenbudgets abgeleitet, Produkte mit geringer Ökoeffizienz identifiziert und knappe Umweltfaktoren monetarisiert. Dadurch stellt die Arbeit eine innovative methodische Weiterentwicklung der Nutzung von Ökobilanzergebnissen im betrieblichen Kontext dar.

ISBN 978-3-8396-1260-6



9 783839 612606