

MEHRKRITERIELLE PORTFOLIOENTSCHEIDUNGEN FÜR DIE  
AUSWAHL VON MASSNAHMEN ZUR STEIGERUNG DER  
NACHHALTIGKEIT IN CONTAINERTERMINALS

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,  
Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik  
der  
Universität Duisburg-Essen  
zur Erlangung des akademischen Grades  
eines  
Doktors der Wirtschaftswissenschaften  
Dr. rer. pol.

genehmigte Dissertation  
von  
ERIK POHL  
aus  
Langenhagen

Erstgutachterin: Prof. Dr. Jutta Geldermann  
Lehrstuhl für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre und Produktionsmanagement  
Universität Duisburg-Essen  
Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Dirk Söffker  
Lehrstuhl für Steuerung, Regelung und Systemdynamik  
Universität Duisburg-Essen  
Drittprüferin Prof. Dr. Heike Proff  
Lehrstuhl für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre und  
Internationales Automobilmanagement  
Universität Duisburg-Essen

Einreichung der Dissertationsschrift: 23. November 2022  
Datum der Disputation: 20. März 2023  
(Vorsitzender: Prof. Dr. Sebastian Kaiser)



# VORWORT

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Produktion und Logistik der Georg-August-Universität Göttingen und seit September 2018 am Lehrstuhl für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre und Produktionsmanagement der Universität Duisburg-Essen. Beide Lehrstühle wurden von Frau Prof. Dr. Jutta Geldermann geleitet, die die vorliegende Dissertation betreut und durch ihre Anregungen, zahlreichen Diskussionen und Hinweise maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Die Beschäftigung an beiden Lehrstühlen, die Arbeit in Forschungsprojekten, die Teilnahme an nationalen und internationalen Konferenzen, Summer Schools und Forschungsaufenthalten prägten die Zeit der Promotion. Durch die vielfältigen Tätigkeiten in Forschung und Lehre konnte ich mein Fachwissen vertiefen, neue Forschungsgebiete erschließen und meine Fähigkeiten weiterentwickeln. Dabei hat mich Prof. Dr. Geldermann immer unterstützt und ermutigt, meine Ideen umzusetzen.

An beiden Lehrstühlen durfte ich mit tollen Kolleginnen und Kollegen zusammenarbeiten. Marcel Dumeier, Christina Wüstefeld, Sebastian Schär, Leon Zacharopoulos, Isabel Wiemer, Lars Lauven, Beatriz Beyer und Tobias Witt haben die Mittags- und Kaffeepausen mit interessanten Diskussionen gefüllt, die Zeit an beiden Lehrstühlen bereichert und durch viele wertvolle Anregungen und ihre Hilfsbereitschaft zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Insbesondere möchte ich mich bei Marcel Dumeier, Christina Wüstefeld und Sebastian Schär für die vielen gemeinsamen Stunden bedanken. In unzähligen langen Gesprächen konnten viele Probleme gelöst und andere neu gefunden werden.

Meinen Eltern, Axel, Mechthild und Friederike, sowie meinen Geschwistern möchte ich für ihre Unterstützung in allen Phasen meines Lebens danken. Ohne ihren Rückhalt wäre ich sicher nicht so weit gekommen.

Meiner Freundin Linda danke ich für ihre unendliche Geduld und ihre uneingeschränkte, liebevolle und vielfältige Unterstützung, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Sie hat mich immer wieder bestärkt und ermutigt. Mein Dank gilt auch meinem Sohn Janne, der mit seinem Geburtstermin eine unverschiebbare Deadline für diese Arbeit gesetzt hat.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinem Prüfungsgremium, bestehend aus Prof. Dr. Dirk Söffker, Prof. Dr. Heike Proff und Prof. Dr. Sebastian Kaiser, bedanken. Herrn Prof. Dr. Söffker danke ich für das Zweitgutachten und die vielen wichtigen Hinweise und Anmerkungen zur Arbeit. Prof. Dr. Kaiser und Prof. Dr. Proff danke ich für die Organisation der Disputation und die guten Anmerkungen zu meiner Arbeit.

Ohne die Unterstützung all dieser Personen wäre die Arbeit nicht zustande gekommen.

Wirges, im Juni 2023

Erik Pohl



## ABSTRACT

As an interface of sea and hinterland transportation, container terminals play an important role in global trade, logistics, and supply chains. Environmental protection, sustainability, and energy efficiency are also important issues in port management to reduce the environmental footprint of global trade and ports. Achieving these goals requires specific planning and is by no means straightforward. It is subject to different, company-specific constraints and ideas of the decision makers. Several measures are available to decrease the environmental footprint and improve the sustainability of the terminal. For example, horizontal transport drive trains can be electrified, energy-saving lighting can be used, or the logistics process can be improved. However, what is often missing is not only a precise analysis of the effects, costs, and consequences of the measures for the terminal, but also a methodology for selecting measures. In addition to the economic indicators that are important in the terminal, all dimensions of sustainability must be taken into account in the evaluation.

The area of multi-criteria decision support offers different methods for problem structuring and selection of individual measures and provides a structured process for decision support. To reduce environmental impact and increase sustainability, multiple measures can be implemented simultaneously but may interact in various ways. Selecting multiple measures leads to a multi-criteria portfolio decision that must take into account both the preferences of decision makers in the terminal, operational constraints and reduction targets. The preferences of the decision makers, the reduction targets and the constraints have to be defined for each terminal individually.

In this dissertation, a method for multi-criteria portfolio decisions for the selection of sustainability measures in a real-world case study from the container terminal Tollerort (Hamburg) is presented. In particular, energy and emission abatement measures for the terminal are selected, evaluated and combined into portfolios. The container terminal is represented by a consortium of different stakeholders whose preferences are incorporated into the decision-making process at several points. The developed method is based on the multi-criteria decision support method PROMETHEE. This outranking method is used for both the evaluation of the measures and the portfolios. With the help of the method, sustainability measures in the terminal can be selected on the basis of a criteria hierarchy as well as portfolios can be constructed and evaluated. Using the results of the case study, the Tollerort container terminal manager can make an informed decision when choosing measures. In the context of this work, the PROMETHEE method has been implemented as a web-based solution and is used for all analyses and evaluations of the considered multi-criteria decision problems.

## ZUSAMMENFASSUNG

Als Schnittstelle von See- und Hinterlandtransport spielen Containerterminals eine wichtige Rolle im globalen Handel, in der Logistik und in den weltweiten Lieferketten. Umweltschutz, Nachhaltigkeit und Energieeffizienz sind ebenfalls wichtige Themen im Hafenmanagement, um die potenziellen Umweltwirkung des globalen Handels und der Häfen zu senken. Die Umsetzung dieser Ziele ist konkret zu planen und dabei keinesfalls eindeutig. Sie unterliegt verschiedenen, unternehmensspezifischen Einschränkungen und Vorstellungen der Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen. Um die Nachhaltigkeit zu erhöhen und den ökologischen Fußabdruck des Terminals zu verbessern, stehen verschiedene Maßnahmen zur Verfügung. Zum Beispiel können die Antriebsstränge des Horizontaltransports elektrifiziert, energiesparende Beleuchtungen eingesetzt oder der logistische Ablauf verbessert werden. Oft fehlt jedoch nicht nur eine genaue Analyse der Auswirkungen, Kosten und Folgen der Maßnahmen für das Terminal, sondern auch eine Methodik für die Auswahl von Maßnahmen. Hierbei gilt es, neben den im Terminal wichtigen ökonomischen Kennzahlen, alle Dimensionen der Nachhaltigkeit bei der Bewertung zu berücksichtigen.

Der Bereich der mehrkriteriellen Entscheidungsunterstützung bietet hier verschiedene Methoden zur Problemstrukturierung und Auswahl einzelner Maßnahmen und stellt einen strukturierten Prozess zur Entscheidungsunterstützung zu Verfügung. Zur Reduktion der Umweltwirkung und Steigerung der Nachhaltigkeit können im Containerterminal mehrere Maßnahmen gleichzeitig umgesetzt werden. Diese Maßnahmen können über verschiedene Typen der Interaktion miteinander in Wechselwirkung stehen. Die Auswahl mehrerer Maßnahmen führt zu einer mehrkriteriellen Portfolioentscheidung, bei der sowohl die Präferenzen der Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen im Terminal als auch betriebliche Vorgabe in Form von Einschränkungen und Reduktionszielen berücksichtigt werden müssen. Die Präferenzen der Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen, die Reduktionsziele und Einschränkungen sind individuell für jedes Terminal zu definieren.

In dieser Arbeit wird erstmals eine Methode für mehrkriteriellen Portfolioentscheidungen für die Auswahl von Maßnahmen zur Steigerung der Nachhaltigkeit in Containerterminals vorgestellt. Insbesondere werden Energie- und Emissionsminderungsmaßnahmen in einer realen Fallstudie zum Containerterminal Tollerort (Hamburg) ausgewählt, bewertet und zu Maßnahmenportfolios zusammengefasst. Das Containerterminal wird durch ein Konsortium verschiedener Stakeholder vertreten, deren Präferenzen an mehreren Stellen in den Entscheidungsprozess einfließen. Die entwickelte Methode beruht auf der Methode zur mehrkriteriellen Entscheidungsunterstützung PROMETHEE, die für die Bewertung der Maßnahmen und der Portfolios verwendet wird. Mithilfe dieser Outranking-Methode können Nachhaltigkeitsmaßnahmen im Terminal auf Basis einer Kriterienhierarchie sowohl verglichen als auch Maßnahmenportfolios erstellt und bewertet werden. Mithilfe der Ergebnisse der Fallstudie können die Manager im Containerterminal Tollerort eine fundierte Entscheidung bei der Auswahl der Maßnahmen treffen, von denen bereits einige umgesetzt wurden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Methode PROMETHEE als webbasierte Lösung implementiert und für Analysen und Auswertungen der betrachteten mehrkriteriellen Entscheidungsprobleme verwendet.

# INHALTSVERZEICHNIS

Abbildungsverzeichnis . . . . .	ix
Tabellenverzeichnis . . . . .	xi
Abkürzungen . . . . .	xii
1 Einleitung . . . . .	1
2 Nachhaltigkeit in Containerterminals . . . . .	5
2.1 Die Containerisierung des Handels durch den ISO-Container . . . . .	6
2.2 Aufbau und Logistik von Containerterminals . . . . .	9
2.2.1 Krane . . . . .	11
2.2.2 Horizontaltransport . . . . .	12
2.2.3 Containerterminal-Layout . . . . .	13
2.2.4 Große Energieverbraucher in Containerterminals . . . . .	14
2.3 Nachhaltigkeit und Ziele für nachhaltige Entwicklung . . . . .	16
2.4 Operations Research in Containerterminals . . . . .	19
2.4.1 Planungsprobleme an der Kaikante . . . . .	21
2.4.2 Planungsprobleme des Horizontaltransports und des Containerlagers . . . . .	23
2.4.3 Planungsprobleme der Anbindung ans Hinterland . . . . .	24
2.5 Ansätze zur Steigerung der Nachhaltigkeit durch Emissionsminderung . . . . .	25
2.5.1 Stand der Forschung und Forschungsprojekte . . . . .	25
2.5.2 Mögliche Maßnahmen zur Steigerung der Energienachhaltigkeit . . . . .	28
2.5.3 Kriterien und Methoden zur Bewertung von Nachhaltigkeitsmaßnahmen . . . . .	28
2.6 Notwendigkeit einer Methode für mehrkriterielle Portfolioentscheidungen in Containerterminals . . . . .	30
2.7 Zusammenfassung . . . . .	31
3 Mehrkriterielle Portfolioentscheidungen . . . . .	33
3.1 Mehrkriterielle Entscheidungsprobleme . . . . .	33
3.2 Definition und Abgrenzung mehrkriterieller Portfolioentscheidungen . . . . .	35
3.3 Mehrkriterielle Portfolioentscheidungen im Operations Research . . . . .	38
3.3.1 Allgemeine mehrkriterielle Portfolioentscheidungen . . . . .	38
3.3.2 Bekannte Anwendungen und Methoden für Nachhaltigkeitsportfolios . . . . .	42
3.4 Der strukturierte Ablauf der MCDA . . . . .	43
3.4.1 Definition des Entscheidungsproblems . . . . .	44
3.4.2 Aufstellen der Entscheidungsmatrix . . . . .	46
3.4.3 Ermittlung des subjektiven Ergebnisses . . . . .	49
3.4.4 Durchführung von Sensitivitätsanalysen . . . . .	50
3.5 Formale Definition von mehrkriteriellen Entscheidungsproblemen und MADM-Methoden . . . . .	50
3.6 MADM-Methoden zur Aggregation einer Entscheidungstabelle . . . . .	54
3.6.1 Methoden zur Bestimmung der Kriteriengewichte für MADM-Verfahren . . . . .	55
3.6.2 Klassische Verfahren . . . . .	57

3.6.3	Outranking-Verfahren . . . . .	59
3.6.4	Die MADM-Methoden PROMETHEE . . . . .	60
3.7	Methoden für die mehrkriterielle Portfolioerstellung . . . . .	73
3.7.1	MAVT als zugrundeliegende MADM-Methode . . . . .	76
3.7.2	PROMETHEE V zur Erzeugung von mehrkriteriellen Portfolios . . . . .	77
3.7.3	Adaptionsmöglichkeiten von PROMETHEE V . . . . .	80
3.8	Entwicklung einer Methode für Portfolioentscheidungen mit unbestimmbaren Kriterien . . . . .	83
3.9	Der strukturierte Ablauf von Portfolioentscheidungen . . . . .	85
3.10	Zusammenfassung . . . . .	89
4	Portfolioentscheidungen am Containerterminal Tollerort . . . . .	91
4.1	Containerterminal Tollerort in Hamburg . . . . .	92
4.1.1	Entscheidungen zur Energienachhaltigkeit am CTT . . . . .	92
4.1.2	Überblick und aktueller Energiebedarf des CTT . . . . .	94
4.2	Mehrkriterielle Bewertung der Maßnahmen durch PROMETHEE . . . . .	97
4.2.1	Bestimmung der Maßnahmen . . . . .	97
4.2.2	Bestimmung der Kriterienhierarchie und -gewichtung . . . . .	102
4.2.3	Bestimmung der Kriterienausprägungen . . . . .	106
4.2.4	Bewertung der Maßnahmen durch PROMETHEE . . . . .	112
4.3	Portfolioerzeugung . . . . .	119
4.3.1	Mehrkriterielle Bewertung der Portfolios . . . . .	121
4.4	Sensitivitätsanalyse und Diskussion der Ergebnisse . . . . .	127
4.5	Zusammenfassung . . . . .	131
5	Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	133
5.1	Zusammenfassung . . . . .	133
5.2	Beantwortung der Forschungsfragen . . . . .	135
5.3	Schlussfolgerungen . . . . .	138
5.4	Übertragbarkeit der Ergebnisse . . . . .	138
5.5	Weiterer Forschungsbedarf und Ausblick . . . . .	139
	Anhang . . . . .	143
	Literatur . . . . .	145
	Veröffentlichungen . . . . .	173
	Vorträge auf wissenschaftlichen Fachkonferenzen . . . . .	175



## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2.1	Skizze und Maße eines Standardcontainers . . . . .	8
Abbildung 2.2	Weltweites Handelsvolumen über Container von 1996 bis 2020 . . . . .	8
Abbildung 2.3	Containerumschlag der größten Containerterminals . . . . .	9
Abbildung 2.4	Globaler Containerhandel nach Routen . . . . .	10
Abbildung 2.5	Betriebsbereiche eines Containerterminals und Transportströme . . . . .	12
Abbildung 2.6	Energieaktivitätsbereich eines Containerterminals . . . . .	15
Abbildung 2.7	Energiebedarf ausgewählter Umschlaggeräte in Containerterminals . . . . .	16
Abbildung 2.8	Die drei Säulen der Nachhaltigkeit . . . . .	17
Abbildung 2.9	Ziele für nachhaltige Entwicklung . . . . .	18
Abbildung 2.10	Planungsprobleme eines Containerterminals . . . . .	22
Abbildung 3.1	Struktur Kapitel 3 . . . . .	34
Abbildung 3.2	Bekannte Ansätze zur Erzeugung von mehrkriteriellen Portfolios . . . . .	41
Abbildung 3.3	Der strukturierte Ablauf einer <a href="#">MCDA</a> . . . . .	45
Abbildung 3.4	Aufbau der Kriterienhierarchie . . . . .	47
Abbildung 3.5	Lineare Präferenzfunktion mit Indifferenzbereich . . . . .	63
Abbildung 3.6	<a href="#">PROMETHEE I</a> Präordnung mit Unvergleichbarkeiten. . . . .	65
Abbildung 3.7	<a href="#">PROMETHEE-GAIA</a> -Ebene . . . . .	68
Abbildung 3.8	Insensitivitätsintervalle eines Entscheidungsproblems . . . . .	71
Abbildung 3.9	Stabilitätsintervalle eines Entscheidungsproblems . . . . .	72
Abbildung 3.10	Ablauf der Portfolioerzeugung . . . . .	84
Abbildung 3.11	Der strukturierte Ablauf einer Portfolioentscheidung . . . . .	87
Abbildung 4.1	Layout des <a href="#">CTT</a> . . . . .	93
Abbildung 4.2	Energiebedarf und Außentemperatur am <a href="#">CTT</a> . . . . .	95
Abbildung 4.3	Energiebedarf des <a href="#">CTT</a> nach Verbraucher . . . . .	96
Abbildung 4.4	Für <a href="#">PV</a> geeignete Dachfläche des <a href="#">CTT</a> . . . . .	98
Abbildung 4.5	Konzept der Landstromversorgung eines Schiffes . . . . .	100
Abbildung 4.6	Ziele, <a href="#">SDG</a> und Kriterien am <a href="#">CTT</a> . . . . .	103
Abbildung 4.7	Lebenszyklusphasen am Beispiel des <a href="#">SC</a> . . . . .	109
Abbildung 4.8	Emissionen der <a href="#">SC</a> . . . . .	110
Abbildung 4.9	Simulationsergebnisse für die Maßnahme A9: <a href="#">SC</a> Idle Reduction . . . . .	111
Abbildung 4.10	Ökonomische Bewertung der <a href="#">LED</a> und <a href="#">HID</a> . . . . .	111
Abbildung 4.11	Ergebnisse der <a href="#">PROMETHEE</a> -Bewertung der Maßnahmen . . . . .	117
Abbildung 4.12	Ergebnisse der <a href="#">PROMETHEE</a> -Bewertung der Maßnahmen pro Kriterium . . . . .	118
Abbildung 4.13	Ergebnisse der <a href="#">PROMETHEE</a> -Bewertung der Portfolios . . . . .	124
Abbildung 4.14	Partielle Präordnung der Portfolios nach <a href="#">PROMETHEE I</a> . . . . .	125
Abbildung 4.15	Partielle Präordnung der Portfolios nach <a href="#">PROMETHEE I</a> mit Nettofluss . . . . .	125
Abbildung 4.16	Ergebnisse der <a href="#">PROMETHEE</a> -Bewertung der Portfolios pro Kriterium . . . . .	126
Abbildung 4.17	Stabilitätsintervalle der Portfolios . . . . .	128

Abbildung 4.18 Insensitivitätsintervalle für ausgewählte Kriterien der Portfolio-Bewertung 130

Abbildung 4.19 Boxplots des Nettoflusses der Portfolios einer Monte-Carlo-Simulation  
der Kriteriengewichte . . . . . 131

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1	Auswahl von oft eingesetzten Verbrauchern und Energieträgern in Containerterminals . . . . .	15
Tabelle 2.2	Möglichkeiten der Anwendung der <a href="#">SDG</a> des Themas Klima und Energie in Häfen . . . . .	20
Tabelle 2.3	Übersicht aktuelle Projekte und Forschungsprojekte in Häfen . . . . .	27
Tabelle 3.1	Entscheidungstabelle eines endlichen Entscheidungsproblems . . . . .	51
Tabelle 3.2	Überblick der Präferenzfunktionen in <a href="#">PROMETHEE</a> . . . . .	62
Tabelle 3.3	Überblick der Sensitivitätsanalysen in <a href="#">PROMETHEE</a> . . . . .	70
Tabelle 3.4	Softwarelösungen für Entscheidungsunterstützung mit <a href="#">PROMETHEE</a> . . . . .	73
Tabelle 4.1	Überblick der Energienachhaltigkeitsmaßnahmen für das <a href="#">CTT</a> . . . . .	98
Tabelle 4.2	Unterziele und Kriterien des Projektes <a href="#">SuStEnergyPort</a> . . . . .	104
Tabelle 4.3	Durchschnittliche Kriteriengewichtung der Projektpartner des Projektes Simulationsbasierte Bewertung von Maßnahmen zur Steigerung der Energienachhaltigkeit im Hafenebetrieb ( <a href="#">SuStEnergyPort</a> ), Quelle: Pohl u. a. ( <a href="#">2020b</a> ) . . . . .	107
Tabelle 4.4	Entscheidungstabelle der Energienachhaltigkeitsmaßnahmen am <a href="#">CTT</a> (1/2) . . . . .	113
Tabelle 4.5	Entscheidungstabelle der Energienachhaltigkeitsmaßnahmen am <a href="#">CTT</a> (2/2) . . . . .	114
Tabelle 4.6	Präferenzfunktionsparameter der Entscheidungsträger im Projekt <a href="#">SuStEnergyPort</a> . . . . .	115
Tabelle 4.7	Ergebnisse der <a href="#">PROMETHEE</a> -Bewertung der Maßnahmen . . . . .	119
Tabelle 4.8	Die fünf besten Maßnahmenportfolios für das <a href="#">CTT</a> . . . . .	121
Tabelle 4.9	Aggregationsmethode zur Bestimmung der Kriterienausprägungen der Maßnahmenportfolios am <a href="#">CTT</a> . . . . .	122
Tabelle 4.10	Aggregierte Kriterienausprägungen der Nachhaltigkeitsportfolios am <a href="#">CTT</a> . . . . .	124
Tabelle 4.11	Ergebnisse der <a href="#">PROMETHEE</a> -Bewertung der Portfolios . . . . .	125

## ABKÜRZUNGEN

AGV	Fahrerloses Transportfahrzeug, engl. Automated Guided Vehicle
AHP	Analytic Hierarchy Process
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BWL	Betriebswirtschaftslehre
CO <sub>2</sub> e	CO <sub>2</sub> -Äquivalente, engl. CO <sub>2</sub> equivalent
CTA	Containerterminal Altenwerder
CTT	Containerterminal Tollerort
ELECTRE	ÉLimination et Choix Traduisant la REalité
ESPO	European Sea Ports Organisation
EU	Europäische Union
GAIA	Geometrical Analysis for Interactive Assistance
GRI	Global Reporting Initiative
HHLA	Hamburger Hafen und Logistik AG
HID	Natriumdampfampe, engl. High Intensity Discharge Lamp
HPA	Hamburger Hafenbehörde, engl. Hamburg Port Authority
HPC	Hamburg Port Consulting GmbH
IHATEC	Innovative Hafentechnologien
IMO	Internationale Seeschifffahrtsorganisation, engl. International Maritime Organization
IPCC	Weltklimarat, engl. Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	Internationale Organisation für Normung
kWh	Kilowattstunden
LED	Leuchtdiode, engl. light-emitting diode
Lkw	Lastkraftwagen
LNG	Flüssiggas, engl. liquefied natural gas
MADM	Multi-Attribut-Entscheidungsunterstützung, engl. Multi Attribute Decision Making
MAUT	Multi Attribute Utility Theory
MAVT	Multi Attribute Value Theory
MCDA	Mehrkriterielle Entscheidungsunterstützung, engl. multi-criteria decision analysis
NMVOG	Nichtmethankohlenwasserstoffen, engl. non-methane volatile organic compound

OR	Operations Research
PDA	Portfolio-Entscheidungsanalyse, engl. Portfolio Decision Analysis
PIANC	World Association for Waterborne Transport Infrastructure
PROMETHEE	Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations
PV	Photovoltaik
ROI	Return on Investment
RMG	Schienengebundener Stapelkran, engl. Rail Mounted Gantry Crane
ROR	Robust Ordinal Regression
RTG	Gummibereifter Stapelkran, engl. Rubber Tyred Gantry Crane
SC	Portalhubwagen, engl. Straddle Carrier
SDG	Ziele für nachhaltige Entwicklung, engl. Sustainable Development Goal
SMAA	Stochastic Multiobjective Acceptability Analysis
STS	Containerbrücke, engl. Ship to Shore Crane
SuStEnergyPort	Simulationsbasierte Bewertung von Maßnahmen zur Steigerung der Energienachhaltigkeit im Hafenbetrieb
SWOT	Stärken, Schwächen, Chancen, Risiken, engl. Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats
TEU	Zwanzig-Fuß-Standardcontainer, engl. Twenty-foot Equivalent Unit
TTU	Zugmaschine mit Anhänger, engl. Tractor Trailer Unit
UN	Vereinten Nationen, engl. United Nations
UNCTAD	United Nations Conference on Trade and Development
USA	United States of America
UTA	Utilité Additive
WCED	Weltkommission für Umwelt und Entwicklung, engl. World Commission on Environment and Development
WPCI	World Port Climate Initiative
WPSP	World Port Sustainability Program



Umweltschutz, Energie- und Ressourceneffizienz und damit verbundene Planungs- und Investitionsentscheidungen sind aktuell zentrale Themen in der Produktionswirtschaft und Logistik. Auf Ebene der Legislative hat die Bundesregierung die ökologische Nachhaltigkeit, Klima- und Umweltverträglichkeit, Versorgungssicherheit und Bezahlbarkeit als tragende Säulen der Energiepolitik im Erneuerbare-Energien-Gesetz verankert (Bundestag, 2016). Die Europäische Kommission hat das Konzept des *European Green Deal* mit dem Ziel vorgestellt, die Netto-Emissionen von Treibhausgasen bis 2050 auf null zu reduzieren (Europäische Kommission, 2019). Im Jahr 2021 wurden diese Vorgaben von der Bundesregierung erneut verschärft: Das Ziel ist eine Netto-Treibhausgasneutralität in Deutschland bis zum Jahr 2045 und negative Treibhausgasemissionen ab 2050 (BMU, 2021).

Viele Unternehmen stehen somit vor der Herausforderung, die eigenen Umweltwirkungen auf wirtschaftliche Art und Weise zu reduzieren. Für viele Unternehmen ist oft nicht klar, wie und mit welchen Mitteln sie diese Ziele erreichen können. Die Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen eines Unternehmens stehen vor der Frage, ob und in welchem Umfang eine oder mehrere Investitionen zum Umweltschutz sowie zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz getätigt werden sollten. So müssen die Verantwortlichen den Begriff der Nachhaltigkeit auf Unternehmensebene definieren und durch Ziele und über Kriterien operationalisieren. Maßnahmen zum Erreichen der Ziele müssen anschließend definiert und bzgl. der zuvor definierten Kriterien bewertet und verglichen werden. Die Entscheidung hängt hier also von mehreren, teilweise konfligierenden, d. h. zueinander im Zielkonflikt stehenden Zielen ab, was die Erfüllung von Gesetzen oder Selbstverpflichtungen schwierig macht.

An dieser Stelle bieten die Methoden der mehrkriteriellen Entscheidungsunterstützung, engl. Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA), Möglichkeiten, um einzelne Handlungsalternativen anhand mehrerer Kriterien zu bewerten und so den Entscheidungsprozess zu unterstützen (Belton und Stewart, 2002; Dias u. a., 2019; Figueira u. a., 2013; Greco u. a., 2016; Roy, 1990; Zavadskas und Turskis, 2011; Zimmermann und Gutsche, 1991). Für die Bewertung der Nachhaltigkeit werden soziale, ökologische, ökonomische und technische Kriterien herangezogen, die üblicherweise durch unterschiedliche Methoden bestimmt werden. Häufig verwendete Methoden sind die Lebenszyklusanalyse für ökologische Kriterien, dynamische Investitions- und Kostenrechnungsverfahren für ökonomische Kriterien und Simulation für technische Kriterien (vgl. z. B. Behzadian u. a., 2010; Gregory, 2012). Die Durchführung einer MCDA und insbesondere die Anwendung der genannten Methoden ist oft aufwändig und bedarf Fachwissen, das oft nicht im Unternehmen vorhanden ist oder ist sogar noch Teil aktueller Forschungen.

Bei der klassischen MCDA ist das Ziel die Auswahl einer Handlungsalternative, die zur Umsetzung empfohlen wird (Koksalan u. a., 2011). Viele Anwendungsfälle ermöglichen und

erfordern allerdings die Umsetzung und Kombination mehrerer Handlungsalternativen zur schnellen Reduktion der Umweltwirkung. Das Ziel bei vielen Entscheidungsproblemen, vor allem im Kontext der Nachhaltigkeit, ist daher die Erzeugung eines Portfolios aus Maßnahmen unter Berücksichtigung mehrerer Kriterien, das den Entscheidungsträgern und Entscheidungsträgerinnen zur Umsetzung empfohlen werden kann (Lahtinen u. a., 2017).

Betrachtet man das geschilderte Problem aus ökonomischer Perspektive, d. h. als monokriterielle Entscheidung, handelt es sich hier um ein Problem der Investitionsplanung mit dem Ziel, die für das Unternehmen als vorteilhaft bewerteten Maßnahmen bzw. Investitionen zu tätigen. Zu den klassischen Bewertungsmethoden von Investitionen gehören, neben dem Kapitalwert und der internen Zinsrechnung, auch die periodischen Kapitalwertmodelle und Investitionsprogrammplanung (Götze und Bloech, 2002; Hax, 1964; Jacob, 1964; Schleipeters, 2019; Schultmann u. a., 2002). Die vorliegende Entscheidung soll allerdings auch auf Grundlage weiterer Kriterien getroffen werden, die nicht monetär bewertet werden sollen und können. Die Methoden der statischen und dynamischen Investitionsrechnung werden diesen Anforderungen nicht gerecht.

Das Beispiel eines Containerterminals zeigt konkret, wie diese Faktoren zusammenwirken können. So kann eine Reduzierung der Umweltwirkung beispielsweise durch hybride oder batterieelektrische statt dieselektrische Transportsysteme und den Einsatz erneuerbarer Energien erreicht werden. Weitere Maßnahmen sind Änderungen der Betriebsabläufe (z. B. Geschwindigkeitsbegrenzungen), technische Spezifikationen der Betriebseinrichtungen (z. B. Start-Stop-Routinen von Ausrüstungsteilen) und alternative Antriebstechnologien (z. B. hybrid- und vollelektrische Antriebsstränge) handeln.

Mehrere dieser Maßnahmen können zugleich umgesetzt werden und sich gegenseitig beeinflussen. Die Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen müssen daher solche Maßnahmen auswählen, die einerseits einen großen Nutzen für das eingesetzte Budget erzielen und andererseits die Umweltwirkung des Unternehmens reduzieren. Dabei müssen unterschiedliche Zielvorgaben sowie das Zusammenspiel der Maßnahmen untereinander berücksichtigt und darüber hinaus zukünftige Entwicklungen unter Unsicherheit abgewogen werden. Im Kontext einer Entscheidungsunterstützung zur Steigerung der Nachhaltigkeit müssen folglich Bündel aus Maßnahmen oder Projekten gebildet werden, welche die verfolgten Ziele möglichst gemäß den Präferenzen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin adressieren. Bei der Erstellung dieser Portfolios werden mehrere Ziele und Bedingungen berücksichtigt, vielversprechende Maßnahmen identifiziert und die Wechselwirkungen zwischen ihnen untersucht. Hierbei können Abhängigkeiten und Synergien zwischen den Maßnahmen auftreten, welche methodisch berücksichtigt werden sollten.

Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung und Anwendung eines Ansatzes zur Erzeugung und Bewertung mehrkriterieller Portfolios aus Energienachhaltigkeitsmaßnahmen in Containerterminals. Hierbei sollen sowohl Maßnahmen in Containerterminals identifiziert als auch ein Portfolio aus Maßnahmen gefunden werden, das den Präferenzen der Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerinnen und dabei weiteren, betrieblichen Einschränkungen und Zielvorgaben entspricht. Hierdurch ergeben sich vier aufeinander aufbauenden Forschungsfragen.

Zunächst gilt es, den Begriff der Nachhaltigkeit für Containerterminals zu definieren und operationalisieren. Hierbei müssen insbesondere unternehmensspezifische Kriterien und



die Vorstellungen und Präferenzen der Terminalbetreiber berücksichtigt werden. Dies führt zu folgender Forschungsfrage:

1. Wie kann Nachhaltigkeit im Terminalbetrieb charakterisiert und durch welche Kriterien operationalisiert werden?

Zur Erreichung der definierten Ziele und Verbesserung des Terminalbetriebs in den zuvor definierten Kriterien müssen verschiedene Maßnahmen identifiziert werden. Darüber hinaus bedarf es einer Methodik zum Vergleich dieser Maßnahmen, die zusätzlich die Präferenzen der Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen berücksichtigt.

2. Wie können Energienachhaltigkeitsmaßnahmen in Containerterminals identifiziert und miteinander verglichen werden?

Eine parallele Umsetzung verschiedener Maßnahmen kann die Umweltwirkung des Terminals schnell reduzieren und die Nachhaltigkeit steigern. Es bedarf einer Methode zur Erzeugung der Maßnahmenportfolios unter Berücksichtigung aller Kriterien. Hierbei müssen unternehmensspezifische Ziele und Anforderungen der Terminalbetreiber sowie die Interaktionen zwischen den Maßnahmen berücksichtigt werden.

3. Wie können sinnvolle Maßnahmenportfolios identifiziert und erzeugt werden, sodass sie den Anforderungen der Terminalbetreiber genügen?

Das Ziel ist die Umsetzung eines präferierten Portfolios aus Maßnahmen. Die Portfolios sollten also neben den oben genannten Eigenschaften auch den Präferenzen der Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerinnen entsprechen. Dies gilt es methodisch zu berücksichtigen und die Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerinnen am Prozess zu beteiligen.

4. Wie kann das vom Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerin präferierte Maßnahmenportfolio bestimmt werden?

Zur Beantwortung dieser Forschungsfragen wird in der Arbeit wie folgt vorgegangen. In Kapitel 2 werden Containerterminals vorgestellt. Insbesondere werden verschiedene Typen von Terminals sowie das jeweils verwendete Equipment charakterisiert. Darüber hinaus werden aus der Literatur mögliche Bewertungskriterien auf Basis der Säulen der Nachhaltigkeit und der Ziele für nachhaltige Entwicklung, engl. Sustainable Development Goals (SDGs), abgeleitet. Anschließend werden mögliche Maßnahmen zur Reduktion der Umweltwirkung vorgestellt, die aktuell in der wissenschaftlichen Literatur untersucht werden. Es werden sowohl Maßnahmen zur Steigerung der Nachhaltigkeit durch Optimierung des logistischen Ablaufs als auch Maßnahmen, die das Terminalequipment betreffen, untersucht. Anschließend wird eine Charakterisierung der Anforderungen an eine Methode zur mehrkriteriellen Portfolioentscheidung für Nachhaltigkeitsmaßnahmen in Containerterminals abgeleitet.

Zur Erzeugung und Bewertung von Nachhaltigkeitsportfolios in Containerterminals wird in Kapitel 3 zunächst der aktuelle Stand der Wissenschaft zur MCDA und mehrkriteriellen Portfolioentscheidungen dargestellt. Dies beinhaltet den strukturierten Ablauf für mehrkriterielle Entscheidungsprobleme. Darüber hinaus werden verschiedene Ansätze für

mehrkriterielle Portfolioentscheidungen vorgestellt und analysiert. Es wird dargelegt, dass es keine Methode für das im vorherigen Kapitel dargestellt Problem der mehrkriteriellen Portfolioentscheidungen in Containerterminals gibt. Für die vorliegende Fragestellung wird eine geeignete Methode zur Erzeugung und Bewertung mehrkriterieller Portfolios auf Basis der MCDA-Methode Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE) entwickelt und in einen Entscheidungsprozess eingebettet.

In Kapitel 4 wird das theoretisch beschriebene Vorgehen bei mehrkriteriellen Portfolioentscheidungen auf den konkreten Fall des Containerterminal Tollerort (CTT) angewendet. Hier werden insgesamt 14 Maßnahmen unter 13 Kriterien ausgewertet und zu Portfolios zusammengefasst. Auf Basis der Präferenzen des Entscheidungsträgers am CTT wird ein präferiertes Portfolio bestimmt und bewertet. Anschließend wird die Portfolioentscheidung mithilfe verschiedener Sensitivitätsanalysen überprüft.

In Kapitel 5 wird die Arbeit zunächst zusammengefasst und anschließend werden die oben formulierten Forschungsfragen übergreifend beantwortet. Darüber hinaus werden Schlussfolgerungen formuliert und eine mögliche Übertragung der Forschungsergebnisse auf andere Fragestellungen und Kontexte diskutiert. Die Arbeit endet mit einer Darstellung des weiteren Forschungsbedarfs und einem Ausblick.

# 2

## NACHHALTIGKEIT IN CONTAINERTERMINALS

Die Binnen- und Seeschifffahrt spielt eine wichtige Rolle im internationalen Güterverkehr. Auf den Verkehrssektor entfallen etwa 23 % der weltweiten Treibhausgasemissionen, die zur globalen Erwärmung beitragen (Creutzig u. a., 2015). Da mehr als 90 % der weltweiten Fracht in Containern befördert wird, ist die Containerschifffahrt, einschließlich der Schiffsbetreiber, der Betreiber von Containerterminals und des Hinterlandtransports, für einen erheblichen Beitrag der globalen Treibhausgasemissionen verantwortlich. Containerterminals, als zentraler Bestandteil von internationalen Lieferketten und insbesondere des intermodalen Transports, tragen somit direkt zu den Treibhausgasemissionen des Güterverkehrs bei (Levinson, 2016; Protic u. a., 2019).

Initiativen und Maßnahmen zur Verminderung der Treibhausgasemissionen und allgemein zur Reduktion der Umweltwirkung von Häfen und insbesondere Containerterminals werden unter dem Begriff *Green Ports* zusammengefasst, der sich aus dem internationalen Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Schiffe (MARPOL) der Internationale Seeschifffahrtsorganisation, engl. International Maritime Organization (IMO) von 1973 ergab. Als neuere Entwicklung wurden im Jahr 2016 die 17 SDG der Vereinten Nationen, engl. United Nations (UN), veröffentlicht, die als politische Ziele der Sicherung einer weltweit nachhaltigen Entwicklung dienen sollen. Viele dieser Ziele dienen seitdem auch in vielen Containerterminals als Entscheidungsgrundlage (vgl. z. B. Alamoush u. a., 2021; Wang u. a., 2020; Wilmsmeier und Spengler, 2016).

In der wissenschaftlichen Literatur zu Containerterminals und in Forschungsprojekten wurden Planungsansätze und Modelle zur Entscheidungsunterstützung entwickelt, die dem Operations Research (OR) zuzuordnen sind. Viele dieser Planungsansätze verfolgen das Ziel, die Effizienz der Prozesse im Containerterminal zu steigern, und senken damit indirekt auch die Umweltwirkung. Zum Beispiel verfolgen viele Planungsansätze das Ziel, die Strecke eines Containers im Containerterminal oder die Containerbewegungen zu minimieren. Viele dieser Planungsansätze können somit in den Rahmen des Green Port Konzepts und allgemein der Nachhaltigkeit eingeordnet werden. Darüber hinaus wurden in den letzten Jahren viele Maßnahmen vorgeschlagen, die zur Reduktion der Treibhausgasemissionen implementiert werden können.

Im Folgenden wird zunächst die globale Containerisierung in Abschnitt 2.1 dargestellt. Abschnitt 2.2 gibt eine Einführung in den Aufbau, die logistischen Prozesse und Planungsprobleme eines Containerterminals. Darüber hinaus wird aufgezeigt, welche Geräte und Anlagen für Treibhausgasemissionen verantwortlich sind oder einen hohen Energiebedarf haben. Ein Überblick über Maßnahmen zur Steigerung der Nachhaltigkeit und die SDGs in Containerterminals ist in Abschnitt 2.3 zu finden. Da Treibhausgasemissionen durch einen optimalen Einsatz der Geräte reduziert werden können, werden in Abschnitt 2.4 ausgewählte Optimierungsansätze für typische Planungsprobleme in Containerterminals vorgestellt.

In Abschnitt 2.5 werden aktuelle Ansätze zur Steigerung der Nachhaltigkeit durch Emissionsminderung analysiert. In Abschnitt 2.6 wird aus dem aktuellen Stand der Literatur zur Nachhaltigkeit in Containerterminals die Notwendigkeit einer Bewertungsmethode für Maßnahmen und insbesondere einer Methode zur Auswahl von Maßnahmenportfolios zur Steigerung der Nachhaltigkeit abgeleitet.

## 2.1 DIE CONTAINERISIERUNG DES HANDELS DURCH DEN ISO-CONTAINER

Die sogenannte *Containerisierung* des Stückguttransports beschreibt die weltweite Verbreitung des Containers als Transportequipment seit den 1950er Jahren. Sie bietet gegenüber dem bis dahin üblichen Stückguttransport mehrere Vorteile. Zum einen sind die Güter und Waren vor Witterungseinflüssen und unbefugtem Zugriff geschützt, zum anderen führt die Verwendung standardisierter Container zu einer Homogenisierung der heterogenen Ladung. So war vor der Containerisierung die Transportkette vom Versender zum Empfänger charakterisiert durch getrennte Einzelschritte d. h. Umladung, Zwischenlagerung und Transport, die jeweils an das Transportgut angepasst werden mussten (Nuhn, 2010). Die Containerisierung erlaubte eine Standardisierung des Transports, sodass die Akteure der Transportketten nur die für den Containerumschlag benötigten Geräte betreiben mussten.

Die Containerisierung des Stückguttransports setzte im Jahr 1956 ein, als 58 Aluminiumcontainer in Newark, New Jersey, auf die *Ideal-X* geladen wurden. Das Schiff war ein umgebauter Tanker aus dem Zweiten Weltkrieg, das die ersten Container von Newark nach Houston, Texas, transportierte (Levinson, 2020, S. 61f.). Der Transport von Stückgut in Metallboxen war zu dieser Zeit nicht neu. Bereits 1929 transportierte die *Seatrains Lines* Metallboxen, die sowohl auf Zügen als auch auf Schiffen befestigt werden konnten und mit großen Kranen zwischen diesen verladen wurden. Mit dem ersten Aufkommen der Containertransporte auf Schiffen im Jahre 1956 änderte sich die Rolle der Schiffsbetreiber zu Transport- und Logistikdienstleister (Levinson, 2016, S. 71f.). In kurzer Zeit fasste die Idee des Containertransports in den USA Fuß und einige neue Transportrouten wurden eingerichtet. Ein weiterer großer Vorteil des Containertransports bestand aus der Nutzung der Wasserstraßen, die, im Gegensatz zu den Autobahnen in den USA, nicht überlastet waren, und in der Senkung der Frachtraten. Viele Transportunternehmen konnten so Transportdienstleistungen günstig und unabhängig von dem transportierten Gut anbieten (Levinson, 2016).

Die ersten Containerservices in den USA setzten verschiedene Arten Container ein. So war es nicht möglich, Container über mehrere Containerservices zu versenden, ohne die Fracht umzuladen (Levinson, 2016, S. 183). Der Prozess der Standardisierung der Container begann 1958 und endetet drei Jahre später mit dem Ergebnis, dass das Federal Maritime Board der USA nur noch Containerschiffe förderte, die Container der Länge 10-, 20-, 30-, 40- und 50-Fuß<sup>1</sup> transportierten. Erst im Jahr 1964 verabschiedete die Internationale Organisation für Normung (ISO) einen Standard für Container, der neben den oben genannten Längen

<sup>1</sup> Ein englischer Fuß entspricht 1ft = 30,48cm.

auch die kleineren Container der europäischen Bahngesellschaften anerkannte. Das Ergebnis war ein Standard, dem keiner der größten Betreiber von Containerschiffen entsprach (Levinson, 2016, S. 158). Neben den Längen der Container wurden auch die Breite, Höhe und die Aufhängung kontrovers diskutiert. Letztendlich setzte sich der Container mit einer Länge von 20 Fuß (6,096 m) und 40 Fuß (12,192 m), einer Höhe von 8,5 Fuß (2,591 m), einer Breite von 8 Fuß (2,438 m) und einer standardisierten Containerecke zum Stapeln und Verriegeln durch (ISO, 2020). Als gängige Abkürzung spricht man bei einem 20-Fuß Standardcontainer, engl. Twenty-foot Equivalent Unit auch von einem TEU. Abbildung 2.1 zeigt einen Standardcontainer mit Türen.

Der ISO-Container wird durch die ISO-Norm 886 definiert als eine Metallbox, d. h. eine wiederverwendbare und entsprechend resistente Transportausrüstung, die Güter über mehrere Transportmodi transportieren kann, ohne, dass die Güter umgeladen werden müssen. Der Container besitzt Haltevorrichtungen, die einen einfachen Transport ermöglichen. Er ist darüber hinaus einfach zu be- und entladen und hat ein inneres Volumen von 1m<sup>3</sup> oder mehr (ISO, 2020). Weitere Anforderungen an Standardcontainer, wie z. B. der Aufbau, die Haltevorrichtungen, die inneren Abmessungen und Türen, werden in der ISO Norm 1496 definiert (ISO, 2013).

Neben den Standardgrößen, d. h. 20- und 40-Fuß-Container gibt es im ISO-System eine Vielzahl von Sondermaßen, die regional verschieden häufig auftreten. So gibt es weitere Höhenabmessungen, die auch über die im Straßentransport üblichen Höhen reichen, weitere Längenmaße bis zu 58-Fuß, andere Breiten und Sondercontainer ohne Abdeckung für z. B. große Reifen. Daneben gibt es Container für spezielle Anforderungen. In Kühlcontainern, auch *Reefer* genannt, kann gekühlte Ware transportiert werden. Kühlcontainer können mit integrierter Kühleinheit gekühlt werden, dann benötigen sie durchgehend Strom oder sie werden vom Kühlsystem des Schiffs versorgt (ISO, 2020). Ferner gibt es zerlegbare Container, Tankcontainer, belüftete Container etc. Aktuell sind ca. 90 % der Container weltweit Standardcontainer in verschiedenen Größen. Insgesamt sind ca. 80 % der weltweiten Container Standardcontainer mit 20- oder 40-Fuß Länge (UNCTAD, 2008, World Shipping Council, 2015, S. 89f.).

Als Folge der Containerisierung und der immer kleineren Frachtraten für den Stückguttransport wuchs der Containertransport. Abbildung 2.2 zeigt das weltweite Handelsvolumen über Container von 1996 bis 2022. Hierbei sind die Werte für die Jahre 2021 und 2022 nicht bekannt und liegen nur in Form von Prognosen von Hapag-Lloyd (2021) vor.

Die Anzahl der Terminals für den Containerumschlag und die Anzahl sowie die Größe der Containerschiffe nimmt seit der Einführung der ISO-Container stetig zu. Abbildung 2.3 zeigt die Entwicklung des Containerumschlags an den heute zehn größten Containerhäfen. Nur in den Jahren der Finanzkrise (2009) und der Coronavirus-Pandemie (2020) ist das weltweite Handelsvolumen über Container nicht gestiegen.

Im Jahr 2019 wurden nach der United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) schätzungsweise 811 Millionen TEU an Containerhäfen umgesetzt. Das weltweite Handelsvolumen beläuft sich auf 152 Millionen TEU, was bedeutet, dass ein Container innerhalb einer Lieferkette im Schnitt fünfmal umgeschlagen wird (UNCTAD, 2021, S 32). Heutige Containerschiffe laden mehr als 24.000 TEU (Norddeutscher Rundfunk, 4.10.2022).

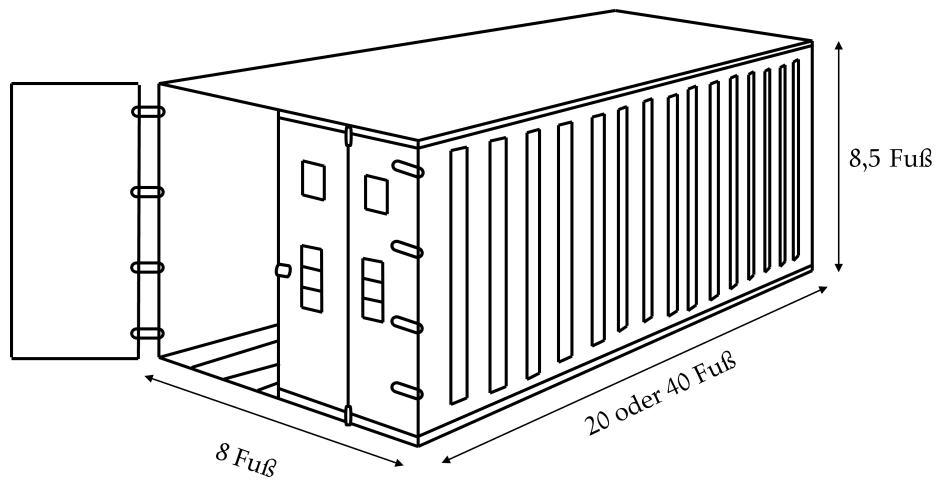


Abbildung 2.1: Skizze und Maße eines Standardcontainers, Quelle: Eigene Darstellung nach (International Organization for Standardization, o. D.[b]; Levinson, 2016)

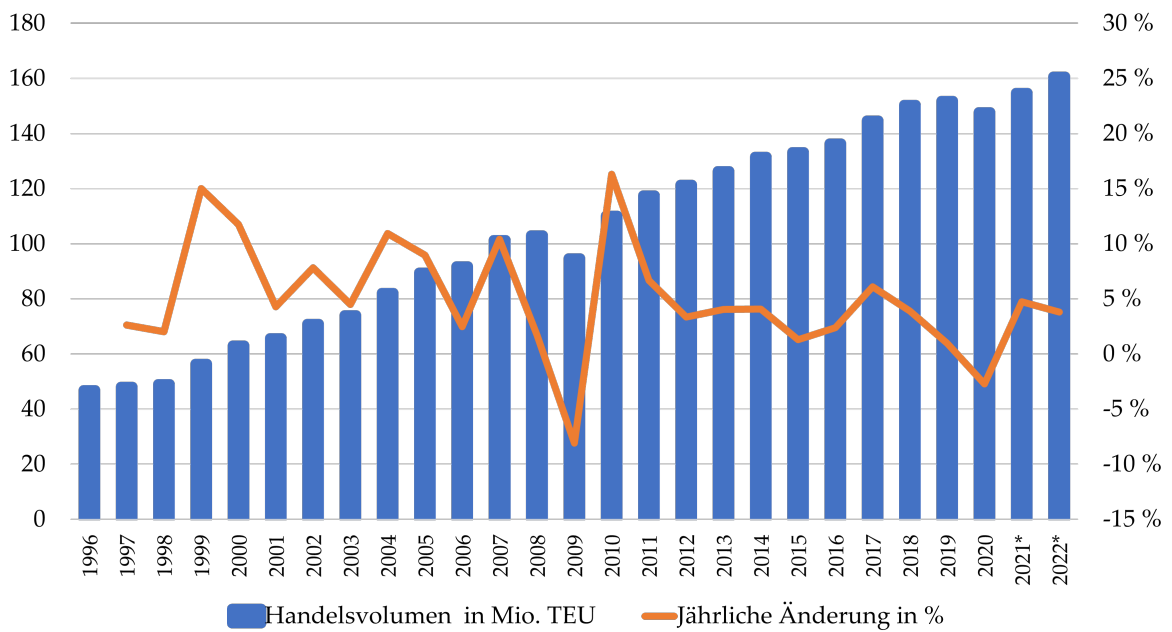


Abbildung 2.2: Weltweites Handelsvolumen über Container von 1996 bis 2022, die Werte für Jahre 2021 und 2022 sind Prognosen. Quelle: eigene Darstellung nach (UNCTAD, 2021), Datenquelle: Jahre 1996 - 2019: (UNCTAD, 2021), Prognose für 2021 und 2022: (Hapag-Lloyd, 2021, S. 95)

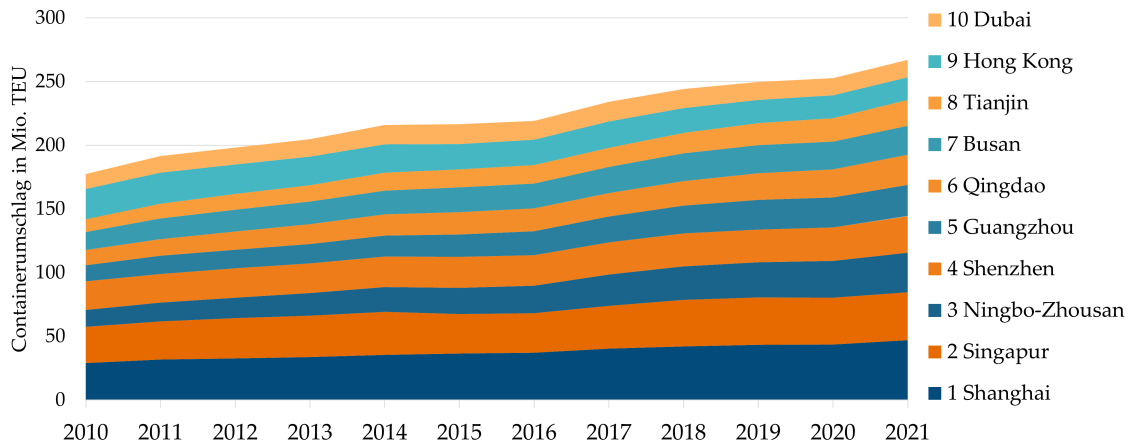


Abbildung 2.3: Containerumschlag der größten Containerterminals von 2010 bis 2021, Quelle: eigene Darstellung, Daten aggregiert aus (Alphaliner, 2022; Marine Department - The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, 2022; Tianjin Port Development Holdings Limited, 2011)

Die Transportmengen der Containerschifffahrt werden sowohl geografisch als auch nach Transportrichtung zusammengefasst. Abbildung 2.4 zeigt den Anteil des weltweiten Handels über Container für die angegebenen Handelsrouten. Es ist zu sehen, dass der Handel zwischen China, Europa und Nordamerika einen Großteil des weltweiten Handels über Container ausmacht. Nach UNCTAD (2022) wurden im Jahr 2012 insgesamt 31,2 Mio. TEU über den Pazifik transportiert, 26,3 Mio. TEU zwischen Asien und Europa und 8 Mio. TEU über den Atlantik.

Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass sich der Welthandel seit der Einführung des ISO-Standardcontainers grundlegend verändert hat und nun fast alle Stückgüter<sup>2</sup> über Container verschifft werden. Als Schnittstelle zwischen dem Transport auf dem Wasser und Land dienen die Containerterminals. Der folgende Abschnitt gibt eine Einführung in den Aufbau und die Prozesse von Containerterminals.

## 2.2 AUFBAU UND LOGISTIK VON CONTAINERTERMINALS

Containerterminals unterscheiden sich im Layout, in der Anzahl und Größe der Krane und im Transportsystem, was sich auf die operative Leistung, den Kraftstoff- und Strombedarf und den Durchsatz auswirkt (Böse, 2011; Gharehgozli u. a., 2020; Roy u. a., 2020).

Die Hauptfunktion eines Containerterminals liegt im Umschlag der per Lastkraftwagen (Lkw), Bahn oder Schiff ankommenden Container und in deren Zwischenlagerung auf dem

<sup>2</sup> In der Logistik wird zwischen Stück- und Massegütern unterschieden. Stückgüter sind alle Güter, die *am Stück* transportiert werden können. Massegüter sind z. B. Erdöl, Getreide und Erze. Sie und werden in spezielle Frachtern transportiert. Massegüter in stückiger Form wie Baumstämme, Papier, Automobile und Stahl werden oft auch als Stückgüter bezeichnet. Sie werden aber insbesondere nicht in großen Mengen in Containern transportiert.

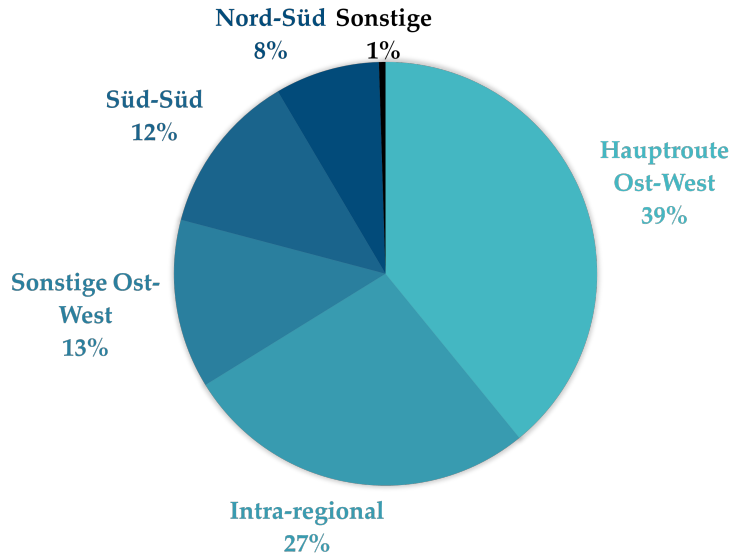


Abbildung 2.4: Globaler Containerhandel nach Routen. Quelle: eigene Darstellung, Daten von (UNCTAD, 2022).

Hauptroute Ost-West: Handel zwischen China, Europa und Nordamerika;  
 Sonstige Ost-West: Handel zwischen Westasien und dem indischen Subkontinent, Europa, Nordamerika und Ostasien;  
 Nord-Süd: Handel zwischen Ozeanien, Afrika südlich der Sahara, Lateinamerika, Europa und Nordamerika;  
 Süd-Süd: Handel zwischen Ozeanien, Westasien, Ostasien, Afrika südlich der Sahara und Lateinamerika;  
 Intra-regional: Handel innerhalb Europas, Afrikas, Asiens, Nordamerikas, Lateinamerikas und Ozeaniens.



Gelände. Ein Containerterminal ist ein offenes und komplexes System, das zwei Schnittstellen zur Außenwelt hat: Zum einen die seewärtige Schnittstelle (Kai) zum Be- und Entladen von Containerschiffen und zum anderen die landseitige Schnittstelle zum Be- und Entladen von Lkws und Zügen. Ein Containerterminal verfügt immer über ein Containerlager, das sogenannten Containerdepot, um Container nach der Ankunft zu lagern. Das Zwischenlager ist notwendig, um die unterschiedlichen Ankunfts- und Abfahrtszeiten von Schiffen und Landfahrzeugen zu bewältigen (Günther und Kim, 2006). Der logistische Prozess in Containerterminals läuft wie folgt ab. Nach der Ankunft im Hafen wird das Containerschiff einem Liegeplatz mit Containerbrücken, engl. Ship to Shore Cranes (STS) zugewiesen, um Container zu entladen oder zu laden. Die entladenen Container werden daraufhin mit dem internen Transportequipment zum Containerdepot transportiert. Innerhalb des Containerdepots werden weitere Bewegungen zur Zwischenlagerung und Bereitstellung durchgeführt, bevor der Container auf ein Fahrzeug verladen wird, um das Terminal zu verlassen. Ein schematischer Aufbau eines Containerterminals ist in Abbildung 2.5 dargestellt (Steenken, 2003; Voß u. a., 2004).

Ein Containerterminal kann in fünf funktionell abgetrennte Bereiche eingeteilt werden, die charakterisiert sind durch verschiedene Funktionen und Planungsaufgaben. Die Planungsaufgaben in einem Terminal werden insbesondere in Abschnitt 2.4 dargestellt. Die Funktionsbereiche bestehen aus der Kaimauer, den STS, dem Horizontaltransport, dem Containerdepot und der Anbindung zum Hinterland. Als Hinterland wird das landseitige, wirtschaftliche Einzugsgebiet eines Hafens bezeichnet. Dies kann je nach Region, Hafentyp und -größe variieren. Die Anlagen und Geräte der Bereiche werden im Abschnitt 2.2.4 näher beschrieben.

### 2.2.1 Krane

Auf einem Containerterminal können verschiedene Arten von Kranen eingesetzt werden. Hierzu gehört der STS zum Be- und Entladen von Containern von Schiffen. Moderne STS können zwei 20-Fuß-Container gleichzeitig umschlagen. Sie bewegen die Container vom Schiff an Land, indem sie sie auf den Kai oder auf ein Fahrzeug stellen, und umgekehrt, indem sie die Container vom Kai oder Fahrzeug auf das Schiff bewegen. STS können durch einen dieselbetriebenen Generator, der sich auf dem Kran befindet, oder durch elektrischen Strom vom Dock angetrieben werden. STS haben daher abhängig von ihrer Energieversorgung unterschiedliche Umweltwirkungen (vgl. z. B. Voß u. a., 2004).

Des Weiteren gibt es im Hinblick auf das Yard-Management zwei verschiedene Arten von Kranen: Die schienengebundenen Stapelkrane, engl. Rail Mounted Gantry Cranes (RMG) und die gummibereiften Stapelkrane, engl. Rubber Tyred Gantry Cranes (RTG) werden ausschließlich im Blocklager eingesetzt. Sie überspannen in der Regel acht bis zwölf Containerreihen in einem Depot-Block und können bis zu zehn Container aufeinander stapeln. Die Portalkrane können Fahrzeuge be- und entladen, die an den Lagerplätzen ankommen. Neben den wasserseitigen Transportfahrzeugen kommen auch landseitige Transportmaschinen an. Das sind in der Regel Lkws, die über die Toranlage des Terminals einfahren und die Verbindung zum Hinterland herstellen. Falls das Terminal über einen Bahnhof

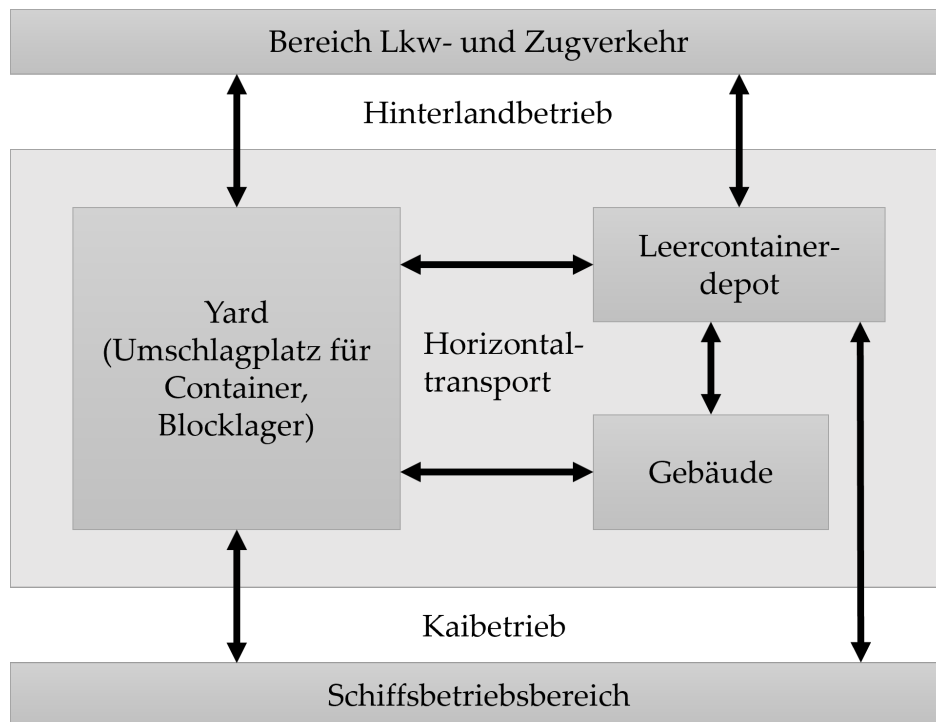


Abbildung 2.5: Betriebsbereiche eines Containerterminals und Transportströme, Quelle: (Voß u. a., 2004)

verfügt, bedienen die Portalkrane im Depot auch auf der Landseite den Horizontaltransport zwischen Depot und Bahnhof. Ein Vorteil der RMG gegenüber den RTG, insbesondere für Länder mit hohen Lohnkosten, ist ihr erwiesenes Potenzial für die Automatisierung (vgl. z. B. Kemme, 2012). Um die Betriebsgeschwindigkeit zu erhöhen, können bis zu drei Portalkrane in einem Depot-Block stehen (vgl. z. B. Voß u. a., 2004).

Die zwei Krantypen werden mit verschiedenen Antriebsarten entwickelt. Sie können entweder durch einen dieselelektrischen Generator oder rein elektrisch per Kabel angetrieben werden. RTGs können zwischen Yard-Blöcken wechseln, da sie nicht auf Schienen verankert sind. Dafür benötigen sie zusätzlich zur statischen Stromversorgung eine Batterie oder einen kleinen Dieselgenerator, um die Strecke zwischen den Blöcken zu überbrücken. Je nach Energieversorgung können die Krane über ihre gesamte Lebensdauer hinweg unterschiedliche Umweltwirkungen haben (Yang und Chang, 2013).

### 2.2.2 Horizontaltransport

Fahrzeuge für den horizontalen Transport lassen sich in zwei Kategorien einteilen: passive Fahrzeuge und aktive Fahrzeuge. Passive Fahrzeuge sind nicht in der Lage, Container selbstständig zu heben. Typische Fahrzeuge dieser Kategorie sind Lkw mit Anhängern, Multitrailer und fahrerlose Transportfahrzeuge, engl. Automated Guided Vehicle (AGV). AGVs ermöglichen einen autonomen bzw. automatischen Horizontaltransport. Sie werden

üblicherweise dieselelektrisch betrieben. Batterieelektrische AGVs werden in den letzten Jahren vermehrt eingesetzt. Containerterminals mit autonomem Horizontaltransport sind z. B. das Containerterminal Altenwerder (CTA) in Hamburg oder das Terminal ECT in Rotterdam (Yang und Li, 2017).

Aktive Transportfahrzeuge sind in der Lage, Container selbstständig anzuheben, zu bewegen und zu stapeln. Typische Fahrzeuge dieser Klasse sind Gabelstapler, Reach Stacker und Portalhubwagen, engl. Straddle Carrier (SC). Der SC ist ein Transportfahrzeug, das seine Fracht unter sich trägt (engl. straddling), anstatt sie oben zu transportieren. In Bezug auf Containerterminals können SCs als Krane betrachtet werden, die nicht fest einem Lager-Block oder der Kaikante zugeordnet sind, sondern sich frei auf dem Terminal bewegen. Beim Einsatz von SCs benötigt das Containerterminal keine RTGs, RMGs oder andere Transportfahrzeuge, da die SC die Container im Terminal bewegen, stapeln und verwalten können. Mit Blick auf die Energieversorgung gibt es SCs mit Dieselantrieb, dieselelektrischem Antrieb und batterieelektrischen Antrieb, was zu unterschiedlichen Umweltwirkungen für jeden Typ von SCs führt (vgl. z. B. Nellen u. a., 2020; Steenken, 2003).

### 2.2.3 Containerterminal-Layout

Im Allgemeinen wird, je nachdem, wie die Lage der Containerdepots angeordnet ist, bei einem passiven Horizontaltransport zwischen zwei Terminal-Layouts unterschieden: das rechtwinklige oder das parallele Layout. Hierbei stammt der Name von der Ausrichtung des Depots zum Kai. Beim parallelen Layout liegt das Depot parallel zum Kai; beim rechtwinkligen Layout liegt es entsprechend rechtwinklig zum Kai. Das Layout variiert darüber hinaus je nach örtlicher Lage, Region und Größe des Terminals (Gharehgozli u. a., 2020). Viele voll-automatisierte Terminals, wie das CTA in Hamburg, verwenden das rechtwinklige Layout, da sich dadurch der Horizontaltransport einfach regeln lässt. Nichtsdestotrotz verwenden viele Containerterminals in Asien, z. B. in Hongkong, das parallele Layout (Li u. a., 2021). Das parallele Terminal-Layout ist charakterisiert durch

- Das Depot ist parallel zum Kai.
- Yard-Krane können zwischen den Blöcken wechseln.
- Die Übergabestellen für die Container sind entlang der Blocklager. Der Horizontaltransport und Lkw fahren in die Gänge, um Container aufzuladen oder abzuladen.
- Ein Blocklager enthält entweder nur ausgehende oder nur ankommende Container. Ein Blocklager enthält nie beide Typen Container.

Das rechtwinklige Terminal-Layout ist durch folgende Eigenschaften charakterisiert:

- Das Depot ist rechtwinklig zum Kai angelegt.
- Jedem Blocklager ist eine feste Anzahl von Yard-Kranen zugeordnet. Die Krane haben dann unterschiedliche Höhen, sodass sie sich unabhängig voneinander bewegen können.

- Der Horizontaltransport und die Lkw können das Blocklager nicht befahren. Es gibt vorgegebene Übergabepunkte am Anfang und Ende eines jeden Lagers für die Container.
- Ankommende und ausgehende Container werden im gleichen Blocklager gelagert.

Bei einem aktiven Horizontaltransport, wie zum Beispiel beim CTT in Hamburg, werden die Container nicht in Blöcken gelagert und der gesamte Container-Yard kann als Depot verwendet werden. Hier wird die Art der Einteilung nicht vorgenommen.

Die Art des eingesetzten Umschlaggeräts in einem Terminal wird durch das Containerumschlagsystem und das Layout des Terminals bestimmt (Brinkmann, 2011; Spengler und Wilmsmeier, 2016). Allen Containerterminals gemeinsam sind die STS, die die Container über die Kaimauer heben. Darüber hinaus unterscheidet Brinkmann (2011) zwischen vier verschiedenen Systemen: einem Reach-Stacker-System mit Zugmaschine mit Anhänger, engl. Tractor Trailer Units (TTUs), ein SC-System ohne Container-Yard-Krane, ein RTG-System mit TTUs oder AGVs und ein RMG-System mit TTU oder AGVs.

#### 2.2.4 Große Energieverbraucher in Containerterminals

Abhängig vom eingesetzten Umschlaggerät und dessen Antrieb fallen in einem Containerterminal verschiedene Energiebedarfe an, die den verschiedenen Bereichen des Terminals zugeordnet werden können. In Abbildung 2.6 werden die Bewegungen eines Containers durch das Terminal zusammen mit den möglichen Umschlaggeräten dargestellt. Die Einteilung in der Abbildung wird von Wilmsmeier und Spengler (2016) als Energieaktivitätsbereich bezeichnet.

Weiterhin ist der Energiebedarf abhängig vom Antriebssystem der Umschlaggeräte und weiteren Verbrauchern auf dem Terminal. Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die oft im Hafen eingesetzten Geräte und Verbraucher zusammen mit den möglichen Energieträgern. Viele Umschlaggeräte werden mit Diesel betrieben, wie z. B. AGVs und SCs. Aktuelle Geräte werden auch mit batterieelektrischen oder hybriden Antrieb angeboten. Bei einem hybriden Antrieb handelt es sich um einen dieselelektrischen Antrieb, der durch Rekuperation elektrische Energie in einer Batterie speichert, die für zukünftige Bewegungen verwendet werden kann. In der wissenschaftlichen Literatur gibt es nur wenige Analysen und Angaben zu Verbrauchsdaten von Containerterminals (Spengler und Wilmsmeier, 2016; Wilmsmeier und Spengler, 2016).

Abbildung 2.7 zeigt beispielhaft den Energiebedarf und Dieselverbrauch einiger Umschlaggeräte in Containerterminals. Die Daten stammen von Protic u. a. (2019) und basieren auf Herstellerangaben und Erfahrungswerten. Insbesondere ist der Energiebedarf pro Containerbewegung abhängig von der zurückzulegenden Strecke, d. h. von der Größe des Terminals sowie vom durchschnittlichen Gewicht der Container.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der größte Teil der Energie von Containerterminals für die Umschlaggeräte während der oben beschriebenen Prozesse benötigt wird (Geerlings und van Duin, 2011). Zusätzlich zu den Umweltauswirkungen, die sich aus dem Energiebedarf ergeben, erzeugt auch die Produktion der Ausrüstung eine Umweltbelastung.

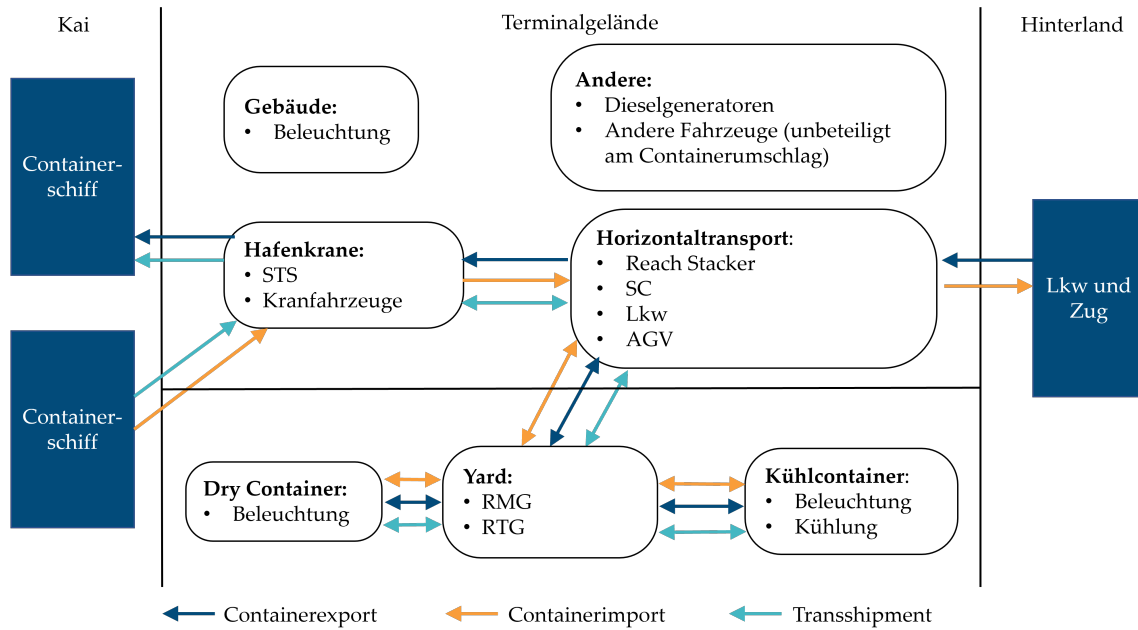
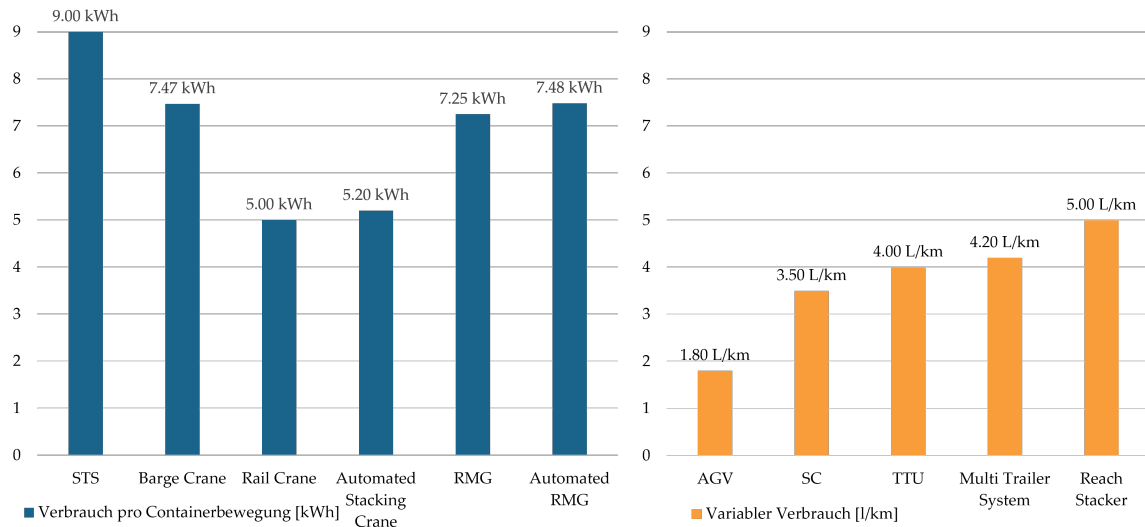


Abbildung 2.6: Energieaktivitätsbereich eines Containerterminals. Quelle: Darstellung nach (Spengler und Wilmsmeier, 2016; Wilmsmeier und Spengler, 2016)

Tabelle 2.1: Auswahl von oft eingesetzten Verbrauchern und Energieträgern in Containerterminals. Quelle: In Anlehnung an (Spengler und Wilmsmeier, 2016; Wilmsmeier und Spengler, 2016)

Bereich	Verbraucher	Energieträger		
		Diesel	LNG	Elektrizität
Kai	STS	✓		✓
	Mobile Krane	✓		✓
	Landstrom		✓	✓
Horizontaltransport	SC	✓		✓
	Reachstacker	✓		✓
	AGV	✓		✓
	Lkw & TTU	✓		✓
Yard	RMG	✓		✓
	RTG	✓		✓
	Reefer			✓
Terminal	Beleuchtung			✓
	Gebäude		✓	✓



**Abbildung 2.7:** Energiebedarf ausgewählter Umschlaggeräte in Containerterminals. Dargestellt ist auf der linken Seite der Energiebedarf pro Containerbewegung; auf der rechten Seite der Dieselverbrauch pro Stunde verschiedener Geräte. Quelle: eigene Darstellung. Daten von Protic u. a. (2019)

In einer ganzheitlichen Betrachtung und Analyse sollten auch diese vor- und nachgelagerten Umweltwirkungen berücksichtigt werden. Eine Entscheidung über die Auswahl oder den Austausch von Ausrüstung wird durch die Tatsache erschwert, dass in Containerterminals mehrere verschiedene Arten von Ausrüstung für dieselben Vorgänge verwendet werden können.

### 2.3 NACHHALTIGKEIT UND ZIELE FÜR NACHHALTIGE ENTWICKLUNG

Zeitgleich mit dem Wachstum der Containerterminals und allgemein des Logistiksektors in den letzten Jahrzehnten wuchsen auch die Umweltbelastung und negativen Auswirkungen auf die Umgebung der Terminals. Das Konzept der nachhaltigen Entwicklung, das im Jahr 1987 von der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung, engl. World Commission on Environment and Development (WCED) im *Brundtland Bericht* definiert wurde, adressiert dieses Problem. In dem Bericht wird eine nachhaltige Entwicklung als eine *Entwicklung, die den Bedürfnissen der jetzigen Generation dient, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre Bedürfnisse zu befriedigen* beschrieben (Brundtland, 1987).

Nachhaltigkeit ist demnach ein Konzept, das sich sowohl auf große, generationsübergreifende Zeithorizonte als auch auf die Bedürfnisse der Gegenwart und Zukunft bezieht. Damit ist die Nachhaltigkeit von sich aus ein kontextspezifischer und subjektiver Begriff, der darüber hinaus nicht ohne Weiteres für verschiedene Kontexte definiert werden kann. Die Autoren Elkington und John (1999) charakterisieren das Konzept über die drei Säulen der Nachhaltigkeit: die ökologische Säule, die sich auf die Umweltwirkungen beschränkt; die ökonomische Säule, die sich auf die finanziellen Aspekte begrenzt, und die soziale Säule,



**Abbildung 2.8:** Die drei Säulen der Nachhaltigkeit. Quelle: eigene Darstellung nach Elkington und John (1999) und Slapper und Hall (2011)

die sich auf soziale und kulturellen Aspekte bezieht. Die drei Säulen der Nachhaltigkeit werden seitdem stellvertretend für nachhaltige Entwicklung verwendet und ermöglichen die Zusammenarbeit verschiedener Akteure unter einem gemeinsamen Ziel.

Aus politischer Sicht bieten die von der UN im Jahr 2016 definierten **SDGs** eine Charakterisierung der Nachhaltigkeit für die Jahre bis 2030 (Dang und Serajuddin, 2020; Le Blanc, 2015). Sie untermauern, neben anderen Zielen, die Notwendigkeit, den Klimawandel und seine Auswirkungen zu bekämpfen und resiliente Infrastruktur zu errichten. Darüber hinaus soll der Verlust der biologischen Vielfalt sowie die Gesundheit und soziales Wohlergehen gefördert werden (United Nations Sustainable Development, 19.09.2020). Insgesamt werden von der UN 17 **SDGs** definiert, deren übergeordnete Ziele in Abbildung 2.9 dargestellt sind. Die **SDGs** werden auf nationaler Ebene über Indikatoren messbar gemacht (United Nations, 2017).

Die **SDGs** werden auch verwendet, um die Unternehmensziele mit den Zielen der Nachhaltigkeit abzugleichen, Strategien zur Erreichung der Ziele zu priorisieren und an bestimmten Zielen auszurichten (vgl. z. B. Gómez-Bezares u. a., 2017; Ike u. a., 2019; Sullivan u. a., 2018). Nichtsdestotrotz gestaltet sich die Definition der Ziele und deren konkrete Umsetzung auf Unternehmensebene oftmals schwierig. So beziehen sich nur 40 % aus 250 Nachhaltigkeitsberichten der größten Unternehmen weltweit auf die **SDGs** (KPMG, 2018). Unternehmen wählen hierbei vor allem Ziele, die vollständig durch die interne Wertschöpfungskette abgebildet und umgesetzt werden können (vgl. z. B. van Zanten und van Tulder, 2018). Viele Nachhaltigkeitsberichte werden anhand des Global Reporting Initiative (**GRI**)-Standards erstellt und veröffentlicht, der Vorgaben zur Bewertung der **SDGs** auf Unternehmensebene macht (Bebbington und Unerman, 2018).



Abbildung 2.9: Ziele für nachhaltige Entwicklung, Quelle: (Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, 08.06.2022)



Das Berücksichtigen der **SDGs** in Nachhaltigkeitsberichten wurde auch in der wissenschaftlichen Literatur vielfach diskutiert (vgl. z. B. van der Waal und Thijssens, 2020). Nichtsdestotrotz merken einige Autoren an, dass in vielen Unternehmen ein geeignetes Framework oder Vorgehen zur Bewertung der **SDGs** fehlt (z. B. Calabrese u. a., 2021) und dass das Berichtswesen oft nur einen symbolischen Charakter hat (z. B. Rosati und Faria, 2019; Silva, 2021). Im Bereich der Privatwirtschaft gestaltet sich der Umgang mit den **SDG** daher schwierig und erlaubt insbesondere keine einfache Ableitung von Maßnahmen und Strategien zur Verbesserung eines Unternehmens in den **SDGs**. Maßnahmen und Strategien müssen daher unternehmensspezifisch definiert und umgesetzt werden. Die Bewertung und Auswahl von Maßnahmen ist somit abhängig von den Entscheidungsträgern und Entscheidungsträgerinnen in Unternehmen und deren Präferenzen.

Für Containerterminals und allgemein Häfen werden die **SDGs** durch die World Port Sustainability Program (**WPSP**) in die fünf Themen *Resiliente Infrastruktur, Klima und Energie, Hafen-Stadt Dialog, Sicherheit und Unfallvermeidung* und *Unternehmensführung und Ethik* eingeteilt (**WPSP**, 2020). Aufgrund des Übereinkommens von Paris (vgl. Klein u. a., 2017) steht das Thema Klima und Energie in viele Häfen im Vordergrund. Das Übereinkommen, das als völkerrechtliches Abkommen im Jahr 2015 von 195 Ländern ratifiziert wurde, soll die menschengemachte globale Erwärmung auf deutlich unter 2° C gegenüber vorindustriellen Werten reduzieren (vgl. Klein u. a., 2017, S. 126).

Viele Containerterminals versuchen demnach zuallererst die Emissionen und Umweltwirkungen im Bereich Klima und Energie zu reduzieren (vgl. z. B. Alamoush u. a., 2020; Ballini u. a., 2022; Protic u. a., 2019). Die hier zugeordneten **SDG** sind nach **WPSP** (2020) **SDG** 7, 9, 12 und 13. Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über Möglichkeiten der Umsetzung der **SDGs** in Häfen.

Die in Tabelle 2.2 dargestellten Möglichkeiten zur Umsetzung ausgewählter **SDG** in Häfen umfassen neben Änderungen der Infrastruktur, wie z. B. das Errichten einer Landstromversorgung, vielfach die Optimierung der Hafenprozesse. Hierzu zählen die Verbesserung der Energieeffizienz von Abläufen und Dienstleistungen, wie auch die Optimierung der Prozesse, um durch eine Reduktion des Energiebedarfs die Umweltwirkung und Betriebskosten des Hafens zu senken.

Vor allem in Containerterminals wurden viele Optimierungsmodelle und Anwendungen des **OR** in der wissenschaftlichen Literatur vorgeschlagen und untersucht. Der folgende Abschnitt 2.4 gibt einen Überblick über untersuchte Planungsprobleme und -modelle in Containerterminals vor dem Hintergrund des effizienten Einsatzes vorhandener Geräte.

In Abschnitt 2.5 werden daraufhin allgemein Möglichkeiten zur Steigerung der Nachhaltigkeit in Containerterminals anhand von Literatur und Forschungsprojekten sowie mögliche Bewertungskriterien und Methoden zur Bewertung dargestellt.

## 2.4 OPERATIONS RESEARCH IN CONTAINERTERMINALS

Methoden des **OR** dienen der Optimierung von Prozessen und der Entscheidungsunterstützung in vielen Bereichen der Betriebswirtschaftslehre (**BWL**). So werden sie vielfach im Bereich der Telekommunikation, Steuerungssystemen, der Produktion und Ablaufplanung

Tabelle 2.2: Möglichkeiten der Anwendung der SDGs des Themas Klima und Energie in Häfen.  
Quelle: eigene Darstellung nach (WPSF, 2020)



- Lokale Erzeugung und/oder Beschaffung erneuerbarer Energie.
- Investitionen in energieeffiziente Geräte (Horizontaltransport, Krane, Beleuchtung)
- Bereitstellung einer Landstromversorgung für Schiffe aus erneuerbaren Quellen.
- Optimierung von Hafenbetrieb und -prozesse



- Ausarbeitung einer nachhaltigen Hafenentwicklung auf Basis von Performanceindikatoren.
- Optimierung von Infrastruktur und Hafenbetrieb und -prozessen
- Pilotierung, Erprobung und Umsetzung innovativer IT- und digitaler Technologien im Hafen.
- Anpassung der Hafeninfrastruktur und des Hafenbetriebs an den Klimawandel.
- Durchführung von Projekten zur nachhaltigen Hafenentwicklung.
- Minimierung der Umweltwirkung aller Hafenprozesse und -aktivitäten.



- Nachhaltiger Umgang mit Ressourcen, Chemikalien und Abfall.
- Umsetzung einer verantwortungsvollen Beschaffung und nachhaltiger Investitionen in das Hafenmanagement und die Hafenentwicklung.
- Förderung der Kreislaufwirtschaft und industrielle Wiederverwendung.
- Optimierung von Hafenbetrieb und -prozesse.



- Verbesserung der Energieeffizienz von Hafenbetrieben, -prozessen und -dienstleistungen.
- Reduzierung von Kohlenstoff- und Treibhausgasemissionen innerhalb des Hafengebiets.
- Anpassung der Hafeninfrastruktur und des Hafenbetriebs an den Klimawandel.
- Erzeugung und/oder Beschaffung von erneuerbarer Energie.

und insbesondere in der Logistik eingesetzt (Haidar, 2016). Durch eine mathematische Modellierung, Simulation und Optimierung von logistischen Prozessen kann auch die zunehmende Komplexität dieser Prozesse abgebildet und kontrolliert werden. Vor allem in den immer größer werdenden Containerterminals ist der Einsatz von OR-Methoden seit vielen Jahren fest etabliert (vgl. z. B. Bierwirth und Meisel, 2010; Voß u. a., 2004).

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über Anwendungen des OR in Containerterminals mit Blick auf Nachhaltigkeit allgemein und Energienachhaltigkeit und -effizienz im Kontext von Planungsaufgaben. Das Ziel dieser Modelle ist oftmals die Steigerung der Effizienz und der optimale Einsatz der vorhandenen Geräte auf dem Terminal (vgl. z. B. Gharehgozli u. a., 2016). Ein Überblick über die Planungsprobleme ist in Abbildung 2.10 dargestellt. Da die Planungsprobleme in Containerterminals oft kombinatorischen Charakter haben, werden sie vielfach in der wissenschaftlichen Literatur untersucht und analysiert. Die folgenden Abschnitte fassen die wesentlichen Planungsprobleme zusammen und charakterisieren Ansätze zur Integration der Nachhaltigkeit in ausgewählten, aktuellen Veröffentlichungen.

#### 2.4.1 Planungsprobleme an der Kaikante

Die Planungsprobleme der Kaikante von Containerterminals bestehen aus der Kaibelegung, der Zuordnung der STS zu den Schiffen und die Reihenfolgeplanung auf den STS (Bierwirth und Meisel, 2010). Die drei Probleme wurden in der wissenschaftlichen Literatur meist unabhängig voneinander untersucht. Da sie allerdings alle einen großen Einfluss auf die Abfertigung der Schiffe haben, werden in neueren Veröffentlichungen integrierte Modelle verwendet (Bierwirth und Meisel, 2015). Eine allgemeine Übersicht der Planungsprobleme an der Kaikante in Containerterminals wurde von Bierwirth und Meisel (2015), Carlo u. a. (2015) und Rodrigues und Agra (2022) erstellt. Die im Folgenden dargestellten Planungsprobleme an der Kaikante haben einen Bezug zur Nachhaltigkeit, der in aktuellen Übersichten nicht zu finden ist.

Bei der **Kaibelegung** besteht das Planungsproblem in der Zuordnung der ankommenden Containerschiffe zu den Abschnitten des gegebenen Kais, sodass es zu keinen zeitlichen Überschneidungen kommt. Hierbei werden verschiedene Typen von Kais und zeitliche Restriktionen der Schiffe unterschieden, was zu verschiedenen Problemformulierungen führt. Das Ziel der in der Literatur vorgeschlagenen Modelle ist meistens die Minimierung der Zeit der Schiffe am Hafen. Diese setzt sich üblicherweise aus der Wartezeit vor dem Hafen und der Liegezeit zusammen. Einige Modelle berücksichtigen darüber hinaus die Verspätungen (Bierwirth und Meisel, 2015).

Neben den genannten Zielen, die auf ökonomische Aspekte abzielen, gibt es auch Veröffentlichungen, die bei der Kaibelegung weitere Ziele berücksichtigen. So wird in einigen Veröffentlichungen die Ressourcennutzung des Terminals, d. h. die Verwendung des Horizontaltransports und der STS (vgl. z. B. Guo u. a., 2021; Hendriks u. a., 2013; Ilati u. a., 2014; Robenek u. a., 2014) oder die Entfernungen zwischen Schiff und Containerlager (vgl. z. B. Karakas u. a., 2021; Wang u. a., 2018a) berücksichtigt. Durch die Optimierung nach den genannten Zielen werden auch die lokalen Emissionen des Horizontaltransports gesenkt.

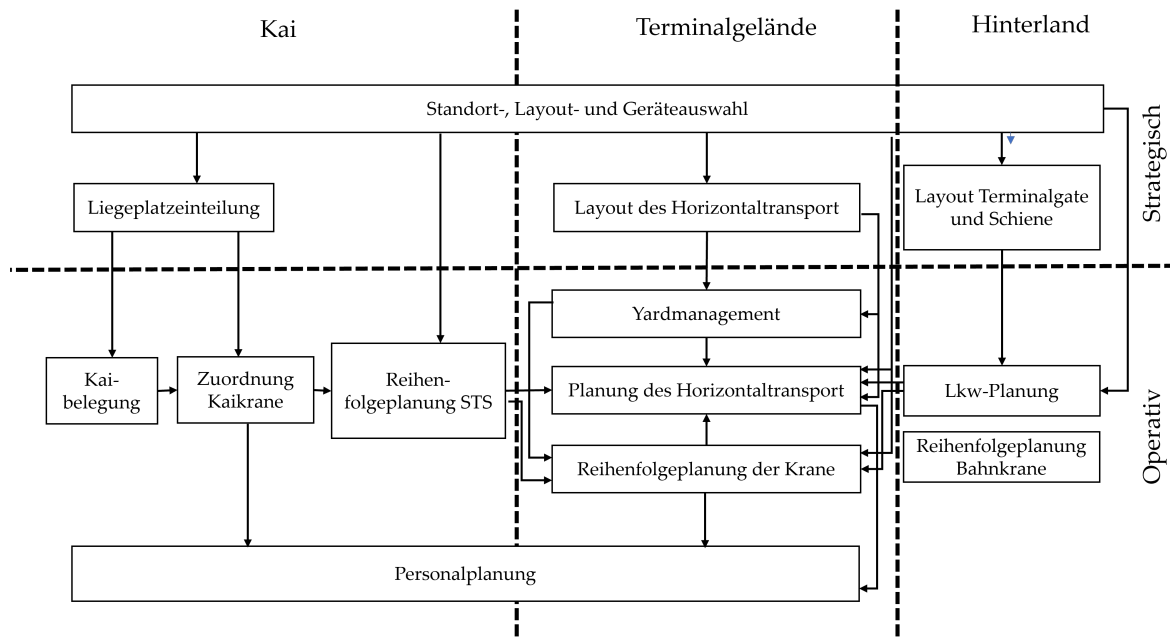


Abbildung 2.10: Planungsprobleme eines Containerterminals. Quelle: Darstellung nach (Bierwirth und Meisel, 2010)

Weiterhin gibt es einige Veröffentlichungen, die bei der Kaibelegung die Emissionen oder den Kraftstoffverbrauch der ankommenden Schiffe betrachten (z. B. Yu u. a., 2022a) oder eine integrierte Planung unter Berücksichtigung des Strombedarfs des Terminals durchführen (Yu u. a., 2022b). Weiterhin untersuchen Wang u. a. (2018b) die Auswirkungen unterschiedlicher Emissionsbepreisung auf die optimale Kaibelegung in Terminals.

Die **Zuordnung der STS** zu den Schiffen baut auf der Kaibelegung auf. Darüber hinaus ist für jedes Schiff die Anzahl der ankommenden und ausgehenden Container und die Anzahl der **STS** bekannt, die das Schiff abfertigen können. Das Planungsproblem besteht nun aus der optimalen Zuordnung der **STS** zu den Schiffen, sodass alle Containerbewegungen in der vorgegebenen Zeit durchgeführt werden können (Bierwirth und Meisel, 2010). In der Praxis ist das Zuordnungsproblem der **STS** kein schwieriges Problem, allerdings ist es stark mit der Kaibelegung verknüpft und wird von vielen Autoren simultan gelöst (Bierwirth und Meisel, 2015).

Das Ziel der **Reihenfolgeplanung auf den STS** besteht in der Planung der Be- und Entladung der Schiffe mithilfe der **STS**. Für jeden Vorgang kann es hier bestimmte Vorgaben (z. B. die Position des Containers auf dem Schiff) geben, die es in der Planung zu berücksichtigen gilt. Ein gültiger Be- und Entladeplan enthält für jeden Container eine Start- und Endposition sowie eine Startzeit. Das Ziel ist üblicherweise die Minimierung der Abfertigungszeit des Schiffes, d. h. die Zeit, die für die Be- und Entladung benötigt wird (Bierwirth und Meisel, 2010, 2015).

Durch die Minimierung der Liegezeit werden die lokalen Emissionen des Schiffs im Hafen minimiert. Darüber hinaus gibt es weitere Ansätze, um die Reihenfolgeplanung der **STS** nachhaltig zu gestalten. So untersuchen Tan u. a. (2021) den Kompromiss zwischen

Abfertigungszeit und Effizienz des Horizontaltransports und Containerlager mit Blick auf den Gesamtenergiebedarf. Da die STS zu den größten Energieverbrauchern in einem Terminal gehören, können durch die Reihenfolgeplanung Lastspitzen des Stromnetzes abgefangen werden (Tang u. a., 2020). Darüber hinaus werden diese Modelle verwendet, um den Anteil der fluktuierenden regenerativen Energien zu erhöhen (vgl. z. B. Schmidt u. a., 2015a; Steurer, 2017).

Eine integrierte Planung der genannten Probleme wird von He u. a. (2015) durchgeführt. Hier wird vor allem der Energiebedarf des Terminals berücksichtigt, was sich direkt auf die Emissionen des Terminals auswirkt. Daneben gibt es auch Veröffentlichungen, die die Emissionen der Reihenfolgeplanung direkt einbeziehen (z. B. Liu und Ge, 2018).

#### 2.4.2 Planungsprobleme des Horizontaltransports und des Containerlagers

Die Planungsprobleme des Horizontaltransports und des Containerlagers sind abhängig vom Aufbau des Terminals. Wie eingangs in Abschnitt 2.2.3 dargestellt, verwenden Terminals mit SCs keine Blocklager, sondern lagern die Container auf der zur Verfügung stehenden Fläche des Terminals. Verwendet das Terminal für den Horizontaltransport AGVs, werden Blocklager benötigt. Ein Überblick über die Planungsansätze für den Horizontaltransport wurde von Carlo u. a. (2014b) erstellt. Im Folgenden werden Planungsansätze mit Bezug zur Nachhaltigkeit vorgestellt.

Viele **Planungsansätze in Containerterminals mit AGVs und Blocklager** schlagen integrierte Optimierungskonzepte für das Routing der AGVs und die Reihenfolgeplanung auf den RMG oder RTG vor (Zhuang u. a., 2022). Darüber hinaus gibt es verschiedene Modelle zum Routing und zur Bereitstellung von AGVs (Carlo u. a., 2014b). Das Ziel dieser Planungen ist die Minimierung der gefahrenen Strecke der AGVs und der Krane, um die Effizienz des Terminalsbetriebs zu steigern. In neueren Veröffentlichungen werden vor allem batterieelektrische AGVs betrachtet, bei denen zusätzlich noch Ladezeiten berücksichtigt werden müssen (z. B. Dang u. a., 2021; Singh u. a., 2022). Des Weiteren können die Batterien der AGVs für die Stabilisierung des Stromnetzes eingesetzt werden und so die Verwendung von Energie aus erneuerbaren Quellen fördern (Schmidt u. a., 2015a).

Aktuelle Veröffentlichungen zum Routing der AGVs minimieren den Strombedarf und die Emissionen durch gezielte Anpassung der Fahrgeschwindigkeit (z. B. Blondin u. a., 2022) oder gezielte Integration der Depotkrane in das Routing (Chen und Zeng, 2021).

Für die Lagerung der Container in Blocklager wird eine Reihenfolgeplanung der Depotkrane durchgeführt. Das Ziel ist die Minimierung des zurückgelegten Weges und die zeitgerechte Bedienung aller Anfragen. Da die Container in den Depots auf Stapeln gelagert werden und die Krane nur den obersten Container vom Stapel heben können, wird die Planung meist in zwei Schritten durchgeführt: Zunächst die Reihenfolgeplanung des Krans, sodass möglichst wenig Container umgestapelt werden müssen. Darauf aufbauend die Planung zur zeitgerechten Bedienung der Anfragen. Die Reihenfolgeplanung auf Depotkranen wurde in der wissenschaftlichen Literatur intensiv diskutiert was anhand der Übersichtsartikel von Boysen u. a. (2017), Carlo u. a. (2014a) und Luo u. a. (2011) nachvollzogen werden kann.

Die Planungsprobleme in Containerterminals mit SC-Transport betreffen das Routing. Hier werden Modelle entwickelt, die alle Container in einem gegebenen Zeitfenster von und zu den STS transportieren (vgl. z. B. Kress u. a., 2019). Neben den Routingmodellen können die SCs effizienter durch den Einsatz von Twin-Spreadern, d. h. Spreader, die zwei Container heben können, betrieben werden (Eisenberg u. a., 2020).

### 2.4.3 Planungsprobleme der Anbindung ans Hinterland

Die Anbindung an das Hinterland besteht bei Containerterminals zum einen über Lkws, die Container anliefern und abholen, zum anderen über Züge. Hier werden Container mithilfe der Bahnkrane auf und vom Zug geladen. Bei der Anbindung an das Hinterland gilt es verschiedene Planungsprobleme zu lösen. Diese betreffen zum einen die Abfertigung der Lkw, zum anderen die Reihenfolgeplanung und Anbindung an den Horizontaltransport.

Bei der Anbindung über Lkw werden von vielen Terminals Liefertermine und Abholtermine für Container gegeben. Bei dem sogenannten *Truck Appointment Scheduling* werden diese Termine so geplant, dass Container möglichst kurz im Terminal verbleiben und die Lkw das Terminal schnell wieder verlassen können (vgl. z. B. Abdelmagid u. a., 2022). Eine gezielte Koordination zwischen den Lkw und Terminalprozessen kann den gesamten Containerfluss im Terminal beschleunigen. Eine integrierte Planung der Lkw und einem SC-Terminal wird z. B. von Zehendner und Feillet (2014) durchgeführt.

Andere berücksichtigen und minimieren explizit die Emissionen der Lkw in Terminals. So analysieren Giuliano und O'Brien (2007) die Minimierung der Lkw-Emissionen in Containerterminals in Los Angeles und Long Beach, United States of America (USA), und Schulte u. a. (2017) stellen ein Optimierungsmodell als kollaboratives Planungsmodell zur Emissionsminderung für Lkw und das Terminal vor.

Das Ziel vieler Planungsmodelle für die Reihenfolgeplanung für Bahnkrane besteht in der Minimierung der Bearbeitungsdauer und die Minimierung der Auslastung des Krans. Die Aufgabe der Bahnkrane im Umschlagbahnhof eines Terminals besteht im Be- und Entladen von Zügen. Neben der Reihenfolgeplanung spielt auch die Allokation der Krane zu Gleisabschnitten eine wichtige Rolle. Übersichten zu bekannten Modellen und Ansätzen wurden von Boysen und Fliedner (2010) und Boysen u. a. (2013) angefertigt.

Die Abfertigung der Container am Bahnkran ist in vielen Fällen nicht zeitkritisch, da die Züge einen fest vorgegebenen Zeitplan verfolgen, der ausreichend Puffer beinhaltet. Neuere Veröffentlichungen zu Bahnkranen verfolgen das Ziel, diesen Puffer für die Glättung der Stromlastkurven des Terminals auszunutzen und so zum einen zur Netzstabilität einzutragen, als auch eine höhere Verwendung erneuerbarer Energien zu fördern (vgl. z. B. Pohl u. a., 2019).

Immer mehr Aufmerksamkeit des OR richtet sich auf den Bereich Optimierung verschiedener Prozesse in Containerterminals, die zunehmend auch kombiniert gelöst werden. Das verwendete Zielsystem beruht allerdings meist noch auf der klassischen Minimierung der Kosten durch Effizienzsteigerung in den Prozessen und ist damit nicht direkt auf das Erreichen von Nachhaltigkeitszielen oder an den SDGs ausgerichtet. Nichtsdestotrotz gibt es bereits einige Untersuchungen zur Integration von Zielen der Nachhaltigkeit in bestehende

Planungsprobleme. Ein aktuell viel verwendeter Ansatz ist die klassische Optimierung der Prozesse und die spätere Berücksichtigung der Nachhaltigkeitsziele. Dies erlaubt dann insgesamt einen einfachen Vergleich der Alternativen (vgl. z. B. Raeesi u. a., 2022).

## 2.5 ANSÄTZE ZUR STEIGERUNG DER NACHHALTIGKEIT DURCH EMISSIONSMINDERUNG

In vielen Containerterminals wird eine Reduktion der Treibhausgasemissionen angestrebt. Sinnvolle Ansätze orientieren sich an den großen Energieverbrauchern in Terminals, d. h. den Geräten zur Containerlogistik, Bürogebäude, Kühlcontainer und Beleuchtung (Buhl u. a., 2014; Protic u. a., 2019). Die Containerlogistik ist abhängig vom Durchsatz des Terminals und somit ein sehr variabler Verbraucher. Die anderen Verbraucher zählen zu den fixen Verbrauchern, die unabhängig vom Durchsatz sind. Nach Buhl u. a. (2014) setzen viele Strategien zur Verbesserung der Energieeffizienz in Terminals am Layout des Terminals, am verwendete Transportequipment sowie die Antriebsarten und an der Auslastung sowie am Durchsatz an. Nach Protic u. a. (2019) können die Treibhausgasemissionen eines Terminals aus theoretischer Sicht durch folgende Ansätze reduziert werden:

- Reduktion von Transportprozessen, d. h. durch das Terminallayout (z. B. Budiyanto u. a., 2021; Gharehgozli u. a., 2020) und Optimierung der logistischen Prozesse (vgl. Abschnitt 2.4).
- Steigerung der Energieeffizienz und Verringerung der negativen Umweltauswirkungen des Energiebedarfs durch emissionsarme Geräte und neue Technologie, z. B. Fahrzeugdesign, Hybridfahrzeuge, Motorentechnik, Verwendung erneuerbarer Energien (z. B. Alamoush u. a., 2020; Martínez-Moya u. a., 2019).
- Verwendung emissionsarmer Verkehrsmittel und alternative Verhaltensweisen, z. B. alternative Kraftstoffe, Fahrstil (Alamoush u. a., 2020; Protic u. a., 2019).

Jeder hier genannte Ansatz hat umfangreiche Prozessänderungen im Terminal oder hohe Investitionen in neue Geräte zur Folge und ist entsprechend schwer umzusetzen. Eine fundierte Bewertung und Auswahl von Ansätzen oder Maßnahmen ist somit nötig, um Containerterminals nachhaltig weiterzuentwickeln. Für eine genauere Charakterisierung der Ansätze und Maßnahmen werden im folgenden Abschnitt Kategorien eingeführt, die die Ansätze mit Bezug zum Energiebedarfs einteilen.

### 2.5.1 Stand der Forschung und Forschungsprojekte

Strategien zur Emissionsminderung von Häfen und Terminals wurden in vielen Studien mit unterschiedlichen Blickwinkeln untersucht (Alamoush u. a., 2020). So untersuchen Jonathan und Kader (2018) Maßnahmen aus technischer Sicht, Peng u. a. (2016) aus operativer Sicht, Tsai u. a. (2018) aus Sicht des Managements, Martínez-Moya u. a. (2019) aus Sicht der Energieeffizienz, Acciaro und Wilmsmeier (2015) aus Sicht der Kaikante (vgl. auch

Abschnitt 2.4) und Bishop u. a. (2012) aus Sicht des Hinterlands. Strategien zur Steigerung der Nachhaltigkeit durch Emissionsminderung können in die Kategorien *Energieversorgung*, *Energiebedarf* und *Energiemanagement* eines Terminals eingeteilt werden und werden im Folgenden weiter charakterisiert (Acciaro u. a., 2014).

Die **Energieversorgung** betrifft vor allem die Antriebsarten der Umschlaggeräte. Viele Krane und Geräte für den Horizontaltransport werden mit Dieselgeneratoren betrieben, die durch ihren Wirkungsgrad wenig effizient Energie liefern und darüber hinaus zu vielen lokalen Emissionen führen. Durch eine Elektrifizierung des Umschlaggeräts kann eine deutliche Reduktion der Emissionen erreicht werden. Die Beschaffung neuer Umschlaggeräte ist mit sehr hohen Investitionen verbunden und sie können viele Jahre in den Terminals verwendet werden (Alamouh u. a., 2020). Neben batterieelektrischen Horizontaltransporten gibt es auch viele Ansätze, hybride Transportgeräte einzusetzen. Hybride SC können z. B. durch Rekuperation Energie von Brems- und Senkvorgängen in einer Batterie speichern und später wieder verwenden (Martínez-Moya u. a., 2019).

Durch die Verwendung von Strom aus erneuerbaren Quellen (z. B. Windenergie, Photovoltaik, Geothermie, Gezeitenenergie) können die Emissionen der Stromversorgung weiterhin gesenkt werden. Viele Terminalbetreiber installieren aus diesem Grund eigene Windenergie-, Gezeitenenergie- und Photovoltaikanlagen auf ihrem Gelände (Sadek und Elgohary, 2020).

Der **Energiebedarf** des Terminals kann zum einen durch eine Optimierung des Einsatzes der Umschlaggeräte und deren Elektrifizierung gesenkt, zum anderen können weitere Maßnahmen auf dem Terminal umgesetzt werden. Hierzu gehören die Dämmung und Verschattung von Gebäuden, eine an den Bedarf angepasste Beleuchtung des Terminals und eine effiziente Bedienung der Geräte (Protic u. a., 2019).

Im Bereich des **Energiemanagements** werden vor allem die Lastspitzen des Terminals durch gezieltes Verschieben von Bedarfen vermindert (vgl. Abschnitt 2.4). Darüber hinaus gibt es Ansätze, das Terminal als Microgrid, d. h. ein in sich abgeschlossenes Stromnetz, zu betrachten. Hierdurch werden Terminals unabhängig vom Stromnetz und können Stromausfällen vorbeugen (Protic u. a., 2019; Sadek und Elgohary, 2020).

Neben den wissenschaftlichen Veröffentlichungen gibt es internationale Anstrengungen, die Emissionen der Terminals zu reduzieren. Insbesondere die IMO (IMO, 2018a, 2018b, 2018c), die World Port Climate Initiative (WPCI) (WPCI, 2010) und die World Association for Waterborne Transport Infrastructure (PIANC) (PIANC, 2019) unterstützen Häfen durch finanzielle Förderung, Initiativen und Beratung.

Neben den internationalen Ansätzen gibt es lokale Anstrengungen, die Emissionen von Terminals zu reduzieren. Meist werden von einzelnen Terminals im Rahmen von z. B. Europäische Union (EU)-Projekten oder national geförderten Projekten Maßnahmen bewertet und umgesetzt. In Deutschland werden Projekte im Hafenbereich durch das Innovative Hafentechnologien (IHATEC)-Förderprogramm des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) unterstützt. Tabelle 2.3 zeigt eine Auswahl der Forschungsprojekte zur Nachhaltigkeit in Containerterminals der letzten Jahre in Europa.



**Tabelle 2.3:** Übersicht ausgewählter Projekte und Forschungsprojekte in Containerterminals und Häfen zur Steigerung der Nachhaltigkeit und Dekarbonisierung des Betriebs. Eine umfassende Auflistung aktueller Projekte kann zum Beispiel bei (WPS, 2022) gefunden werden.

Projektname	Beschreibung	Laufzeit
OBELISK-Intelligentes Outdoor Beleuchtungskonzept in einem Hafenumfeld	Ziel ist eine intelligente, teilautonome Beleuchtungssteuerung für die Außenflächen, auf Basis von Echtzeit- und Plandaten zu den Prozessen vor Ort. Der Energiebedarf und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen sollen gesenkt werden. (Lapuse, 2020)	2018- 2019
Rang-E - Autonomes Rangieren auf der Hafenbahn	Ziel des Projektes Rang-E ist es, die Rangierprozesse in Seehäfen durch Prozessoptimierung und Automatisierung effizienter zu gestalten. Durch Kontrollarbeiten am Zug und an der Ladung oder durch vorgeschriebene Bremsproben, Ladungskontrollen und Rangierarbeiten entsteht ein hoher zeitlicher Aufwand. (Knoke, 2020)	2017- 2019
SustEnergyPort - Simulationsbasierte Bewertung von Maßnahmen zur Steigerung der Energienachhaltigkeit im Hafenbetrieb	Es soll ein modellbasiertes Verfahren entwickelt und inhaltlich ausgestaltet werden, durch das Hafenbetriebe geeignete Maßnahmen zur Verbesserung ihrer Energieeffizienz und zur Nutzung erneuerbarer Energien identifizieren können. Aus den resultierenden Ergebnissen kann eine Roadmap zur Erreichung eines profitablen und umweltverträglichen Terminalbetriebs konzipiert werden. (Pohl u. a., 2020b)	2017- 2020
WASh2Emden- Innovative und umweltfreundliche Wasserstoffanwendungen im Seehafen Emden	Das Projekt untersucht die Möglichkeit, den bisher nicht nutzbaren Strom in Form von grünem Wasserstoff zu speichern und in unterschiedlichen Anwendungen im Hafen nutzbar zu machen. Durch die Nutzung von regenerativ erzeugtem Wasserstoff sollen Emissionsreduktionen beim landseitigen Hafenbetrieb, in der Logistik sowie bei den im Hafen liegenden Schiffen erzielt werden. (abh, 2021)	2018- 2020
ZETT - Zero Emission Terminal Tractor	Das Ziel ist es, eine Systemlösung für den batterieelektrischen innerbetrieblichen Transport zu entwickeln, mit der Umweltvorteile mittelfristig zu wirtschaftlichen Konditionen erzielt werden können. (Lentzen, 2018)	2018- 2022
Port of Gothenburg - Hydrogen production facility and filling station	Das Ziel ist die Dekarbonisierung des Hafens und das Ersetzen fossiler Brennstoffe durch neue Alternativen. Geplant ist der Bau einer Wasserstoffproduktionsanlage im Hafen. Wenn der Wasserstoff mit fossilfreien Energiequellen wie Wasser- oder Windkraft erzeugt wird, wäre auch der Wasserstoff frei von fossilen Brennstoffen. (Port of Gothenburg, 2021)	2021 - 2023

### 2.5.2 Mögliche Maßnahmen zur Steigerung der Energienachhaltigkeit

Maßnahmen zur Reduktion der Umweltwirkung und Steigerung der Energienachhaltigkeit wurden vielfach untersucht. In den letzten Jahren wurden einige Übersichtsartikel verfasst, die konkrete Maßnahmen für die oben dargestellten Strategien zusammenfassen (Alamouh u. a., 2020; Bjerkan und Seter, 2019; Iris und Lam, 2019; Martínez-Moya u. a., 2019; Protic u. a., 2019).

Die dort vorgestellten Maßnahmen können nicht allgemein auf alle Terminaltypen angewandt werden. Es ist vielmehr nötig, für jedes Terminal zu bestimmen, welche Maßnahme oder Maßnahmenbündel sinnvollerweise umgesetzt werden sollen. Hierbei gilt es, das Terminallayout, den Durchsatz sowie die Umschlaggeräte und deren Energiebedarfe zu beachten. Am Beispiel des CTT wurden im Rahmen des Projekts SuStEnergyPort mehrere Maßnahmen analysiert. Diese sind ausführlich in Kapitel 4 dargestellt.

Verantwortlich für die Entwicklung eines Terminals und somit für die Umsetzung verschiedener Maßnahmen ist der Terminalbetreiber. Die Betreiber von Terminals agieren im Umfeld eines Hafens, die oft in der Nähe von bewohntem Gebiet gebaut wurden. Neben den Terminalbetreibern müssen Maßnahmen daher auch mit Hafenbehörden und lokalen Politikern abgestimmt werden. Eine genauere Darstellung der Akteure in Terminals ist in Abschnitt 4.1.1 am Beispiel des CTTs dargestellt.

In den dargestellten Übersichten und genannten Studien werden die vorgeschlagenen Maßnahmen oft nur genannt und nicht miteinander verglichen. Für den Terminalbetreiber ist es daher oft schwierig, eine fundierte Entscheidung zu treffen, welche Maßnahmen sinnvollerweise für das betrachtete Terminal umgesetzt werden sollen. Um die Maßnahmen miteinander zu vergleichen, müssen sie auf einer gemeinsamen Menge an Kriterien bewertet und analysiert werden. Der folgende Abschnitt gibt einen kurzen Überblick über Bewertungskriterien, die in wissenschaftlichen Studien und Forschungsprojekten in Containerterminals angesetzt werden.

### 2.5.3 Kriterien und Methoden zur Bewertung von Nachhaltigkeitsmaßnahmen

In der Literatur gibt es keine allgemein gültige Menge an Bewertungskriterien, die von Terminalbetreibern und allgemein von Akteuren in Häfen zur Bewertung von Nachhaltigkeitsmaßnahmen angelegt werden (vgl. z. B. Alamouh u. a., 2020; Bjerkan und Seter, 2019; Iris und Lam, 2019; Martínez-Moya u. a., 2019; Protic u. a., 2019). Die Bewertungskriterien müssen somit in Zusammenarbeit mit den Akteuren im Hafen ermittelt werden. Maßnahmen werden darüber hinaus selten miteinander verglichen, sondern werden vielmehr in einem unstrukturierten Entscheidungsprozess ausgewählt. Nichtsdestotrotz kann man anhand der aktuellen wissenschaftlichen Literatur und Studien der European Sea Ports Organisation (ESPO) einige oft verwendete Ziele und Kriterien in Containerterminals identifizieren. Im Folgenden wird ein Überblick über verwendete Bewertungskriterien, -methoden und Ziele in Containerterminals gegeben, der sich an den drei Säulen der Nachhaltigkeit (*ökologische Ziele, ökonomische Ziele, soziale Ziele*) sowie technischer Ziele orientiert. Diese Einteilung wurde z. B. von Pohl u. a. (2020a,b) verwendet, um weitere Leistungskennzahlen von Terminals zu berücksichtigen.

In wissenschaftlichen Studien werden für die **ökologischen** Ziele meist eine Reduktion der Treibhausgasemissionen angestrebt. Hierbei wird selten zwischen direkten und indirekten Emissionen, d. h. Emissionen, die lokal am Terminal anfallen, und solche, die durch vorgelagerte Prozesse anfallen, unterschieden. Darüber hinaus wird oft der Energiebedarf in Form von Dieselverbrauch und Stromnutzung betrachtet. Neben den Treibhausgasemissionen werden z. B. von Ballini u. a. (2022) auch Feinstaubemissionen und von Murcia González (2021) Stickoxide und Schwefeldioxid betrachtet. Bedingt durch die Nähe vieler Containerterminals zu bewohntem Gebiet ist die Luftqualität für viele Terminalbetreiber wichtig.

Die **ESPO** als Vereinigung der europäischen Hafenbehörden und Häfen erhebt jährlich die Prioritäten der Häfen in Bezug zur Umweltwirkung des Hafenbetriebs. Im Jahr 2020 belegten hier *Luftqualität*, *Klimawandel* und *Energieeffizienz* bzw. *Energiebedarf* die ersten drei Plätze (ESPO, 2020). Die darauf folgenden Prioritäten liegen auf der Lärmbelastung durch die Häfen, die Beziehungen zu Anwohnern und die Reduktion von Verunreinigungen durch Schiffe.

Eine Methode zur Bewertung von ökologischen Kriterien ist die **Ökobilanz**. Eine Ökobilanz (oder auch Lebenszyklusanalyse) ist eine systematische Analyse der Umweltwirkungen sowie Energiebilanz eines Produktes oder Produktionsprozesses über dessen gesamten Lebensweges, d. h. von der Gewinnung der Rohstoffe über die Produktion, den Transport, die Nutzung zur Verwertung (Frischknecht, 2020, S. 11). Ökobilanzen sind durch die **ISO-Norm 14040** definiert und bestehen aus den vier Phasen *Zieldefinition*, *Sachbilanz*, *Wirkungsabschätzung* und *Interpretation*. Im Rahmen der Ökobilanz werden Umweltwirkungen in verschiedenen Umweltwirkungsindikatoren zusammengefasst. Bekannte Indikatoren sind der Klimawandel, Ozonschichtabbau, Partikelbildung bzw. Feinstaub, Sommersmog und die Versauerung (Frischknecht, 2020, S. 109). Hierbei werden diese Indikatoren aus verschiedenen Emissionen und Umweltwirkungen aggregiert. Die dazu verwendeten Charakterisierungsfaktoren werden regelmäßig z. B. vom Weltklimarat, engl. Intergovernmental Panel on Climate Change (**IPCC**) veröffentlicht. Eine vollständige Auflistung der Umweltwirkungsindikatoren sowie Charakterisierungsfaktoren sind in Frischknecht (2020, S. 110f) zu finden.

Zu den **ökonomischen** Bewertungskriterien der Terminalbetreiber gehören die gängigen Kennzahlen der Investitions- und Kostenrechnung in der **BWL**. Für die Bewertung von Maßnahmen bietet die **BWL** verschiedene Methoden, die sich in statische und dynamische Verfahren untergliedern. Zu den statischen Verfahren gehören z. B. die Kostenvergleichsrechnung, Rentabilitätsrechnung und Amortisationsrechnung; zu den dynamischen Verfahren gehört die Kapitalwertmethode und die Annuitätenmethode (vgl. z. B. Thommen u. a., 2017, S. 342).

Neben den genannten Verfahren werden von Terminalbetreibern auch oft die Investitionsausgaben als solche und die Betriebskosten für eine Bewertung von Geräten und Maßnahmen verwendet (vgl. z. B. Pohl u. a., 2019). Hierbei werden die Betriebskosten oft aufgeteilt in Energiekosten, Personalkosten und Wartungskosten (Ding u. a., 2022).

Für die **sozialen** Ziele der Terminalbetreiber gibt es wenige wissenschaftliche Untersuchungen (Lim u. a., 2019). Von Pohl u. a. (2020b) werden Mitarbeiterzufriedenheit und Imageförderung des Terminals als soziale Kriterien einer Bewertung angelegt. Diese Kriteri-

en werden oft über eine Ordinalskala durch Umfrageergebnisse messbar gemacht. Unter den Hafenbehörden und -betreibern gehört die Beziehung zu den umliegenden Anwohner zu den wichtigen Zielen (vgl. z. B. [ESPO, 2020](#)). Diese von den Terminalbetreibern wichtigen Entscheidungskriterien werden von der wissenschaftlichen Literatur selten aufgegriffen.

Bei den **technischen** Zielen der Terminalbetreiber wird, wie oben dargestellt, oft der Durchsatz des Terminals herangezogen. Die in Abschnitt 2.4 behandelten Modelle und Programme zielen größtenteils auf die Optimierung einzelner Prozesse ab, um dem Gesamtdurchsatz eines Terminals zu steigern. Ein weiteres Maß für den Durchsatz des Terminals ist die wasserseitige Produktivität, d. h. die Abfertigungsrate der Container durch die **STS** an der Kaikante, die zur Bewertung von Maßnahmen herangezogen wird (Pohl u. a., [2020a](#)). Daneben gehören zu technischen Bewertungskriterien auch die Möglichkeit der Umsetzung einer Maßnahme, wie z. B. der Platzbedarf (Pohl u. a., [2020b](#)).

Die Kriterienausprägungen der technischen Kriterien werden oft mithilfe von **Simulationsmodellen** bestimmt. Sie werden von vielen wissenschaftlichen Studien und Analysen zur Bewertung der Nachhaltigkeit der Terminals verwendet (vgl. z. B. Angeloudis und Bell, [2011](#); Kavakeb u. a., [2015](#); Kemme, [2012](#); Kemme und Schmidt, [2020](#)). Ein großer Vorteil der Simulationsmodelle ist, dass durch sie der Einfluss verschiedener Maßnahmen auf die Prozesse und die Logistik des Terminals abgebildet werden kann, die noch nicht im Terminal umgesetzt sind (Martínez-Moya u. a., [2019](#)).

## 2.6 NOTWENDIGKEIT EINER METHODE FÜR MEHRKRITERIELLE PORTFOLIOENTSCHEIDUNGEN IN CONTAINERTERMINALS

Durch die Literaturrecherche und Analyse vorhandener Modelle wurden Maßnahmen identifiziert, die Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger in Containerterminals zur Steigerung der Nachhaltigkeit umsetzen können. Hierbei wird die Nachhaltigkeit über jeweils verschiedene Bewertungskriterien definiert. Diese sind stark abhängig vom Terminal sowie den Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträgern. Bei vielen Terminals sind das die Terminalbetreiber, die die Entscheidung allerdings mit den lokalen Hafenbehörden und Anwohner koordinieren müssen.

Die Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen in Containerterminals stehen vor dem Problem, die optimalen Maßnahmen, d. h. die präferierten Maßnahmen für ihr Terminal zu bestimmen und auszuwählen. Hierbei wird zur Bewertung der Maßnahmen eine zuvor definierte Menge an Bewertungskriterien angelegt. Das resultierende Problem für die Auswahl einer Maßnahme ist somit ein mehrkriterielles Entscheidungsproblem der **MCDA**.

Oft sollen mehrere Maßnahmen parallel umgesetzt werden. Hierbei müsse zusätzlich Abhängigkeiten zwischen den Maßnahmen und weitere Einschränkungen betrachtet werden. Zu den weiteren Einschränkungen können z. B. Budget-Restriktionen, eine zu erreichende Minderung einer Emission oder die Anzahl der umzusetzenden Maßnahmen gehören.

Um die Terminalbetreiber bei der Auswahl der Maßnahmen zu unterstützen, ist ein strukturiertes Vorgehen und eine fundierte Methode der Entscheidungsunterstützung notwendig.

Das Vorgehen sollte eng mit den Terminalbetreibern abgestimmt werden und über einen iterativen Prozess zu einer Entscheidung für eine Menge an umzusetzenden Maßnahmen führen. Das beinhaltet die Bewertung der Maßnahmen unter terminalspezifischen Kriterien, sowie die Zusammenfassung möglicher Maßnahmen in ein Portfolio. Dieses Portfolio sollte den Präferenzen des Terminalbetreibers und bestimmten Nebenbedingungen entsprechen.

Die Auswahl des optimalen Maßnahmenportfolios kann als mehrkriterielles Portfolioprobem beschrieben werden: Gesucht ist das Portfolio an Maßnahmen, das den Präferenzen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin sowie den Einschränkungen am ehesten entspricht (vgl. Kapitel 3). Das Portfolioentscheidungsproblem ist terminalspezifisch aufzustellen, da sowohl die potenziellen Maßnahmen und Bewertungskriterien, als auch die Bewertung der Maßnahmen unter den Kriterien vom Terminal abhängig ist. Darüber hinaus müssen die Präferenzen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin, d. h. des Terminalbetreibers, entsprechend berücksichtigt werden.

Mehrkriterielle Portfolioprobeme sind in der wissenschaftlichen Literatur zum aktuellen Zeitpunkt nicht intensiv untersucht worden (vgl. Kapitel 3). Darüber hinaus fehlen Veröffentlichungen zu möglichen Anwendungen. Die Problemklasse der mehrkriteriellen Portfolioprobeme wird im folgenden Kapitel 3 zusammen mit allgemeinen MCDA-Problemen und einer neuen Methode für Portfolioentscheidungen zur Auswahl von Maßnahmen vorgestellt. Darüber hinaus wird eine Methode zur Erzeugung und mehrkriteriellen Bewertung von Maßnahmenportfolios motiviert und entwickelt.

## 2.7 ZUSAMMENFASSUNG

Containerterminals tragen als integraler Bestandteil globaler Lieferketten zur Umweltwirkung der Logistik bei. Insbesondere haben viele Containerterminals eine Reduktion von Treibhausgasen zum Ziel. In der aktuellen wissenschaftlichen Literatur und Forschungsprojekten gibt es viele Ansätze und Maßnahmen, um den Terminalbetrieb nachhaltiger zu gestalten.

Um die Nachhaltigkeit verschiedener Maßnahmen zu bewerten, werden verschiedene Kriterien angelegt, die sich in die drei Säulen der Nachhaltigkeit, zusammen mit technischen Kriterien, gruppieren lassen. Eine Bewertung und darauf aufbauend ein Vergleich verschiedener Maßnahmen zur Steigerung der Nachhaltigkeit ist in der aktuellen Literatur selten zu finden.

Das Ziel vieler Terminalbetreiber ist darüber hinaus, eine Menge an guten Maßnahmen auszuwählen, die ihren Präferenzen entspricht und weiteren Einschränkungen genügt. Diese Einschränkungen beziehen sich meist auf die Umsetzbarkeit der Maßnahmen, z. B. das Budget des Terminals. Das vorliegende Problem ist daher ein mehrkriterielles Portfolioprobem, d. h. gesucht ist ein Portfolio aus Maßnahmen, das, ausgewertet unter einer Menge an Kriterien, den Präferenzen der Terminalbetreiber entspricht.



# 3

## MEHRKRITERIELLE PORTFOLIOENTSCHEIDUNGEN

Entscheidungen zur Allokation begrenzt vorhandener Ressourcen auf eine Teilmenge einer großen Anzahl an Handlungsalternativen, Aktionskandidaten oder allgemein Projekte sind in vielen Bereichen der öffentlichen Verwaltung und in Unternehmen wichtig. Daher tritt das Problem der Portfolioauswahl in vielen Situationen auf und ist in der wissenschaftlichen Literatur untersucht worden. Prominente Anwendungen sind Finanzportfolios (vgl. z. B. Elton und Gruber, 1997), Projektportfolios (vgl. z. B. Archer und Ghasemzadeh, 1999; Martinuso und Geraldi, 2020; Nielsen u. a., 2021; Salo und Cuhls, 2003) oder die Vergabe staatlicher Förderungen (vgl. z. B. Çağlar und Gürel, 2019; Litvinchev u. a., 2010). Auch im Hinblick auf nachhaltige Unternehmensführung versuchen Entscheidungsträger oder Entscheidungsträgerinnen, Aktionen und Maßnahmen auszuwählen, die das Unternehmen in den drei Säulen der Nachhaltigkeit verbessern. Insbesondere die Reduktion der Umweltwirkung in Form von Kohlenstoffdioxid-Emissionen wird in den letzten Jahren angestrebt.

Im Folgenden werden zunächst klassische mehrkriterielle Entscheidungsprobleme charakterisiert und eingeführt. In Abschnitt 3.2 werden daraufhin mehrkriterielle Portfolioentscheidungen definiert und von klassischen Entscheidungsproblemen abgegrenzt. Der aktuelle Stand der Methoden für mehrkriterielle Portfolioentscheidungen im OR ist in Abschnitt 3.3 dargestellt. Nach dieser einleitenden Charakterisierung der Methoden und Darstellung des Stands der Forschung wird in Abschnitt 3.4 der strukturierte Ablauf der klassischen MCDA vorgestellt. Die für die MCDA verwendeten Multi-Attribut-Entscheidungsunterstützung, engl. Multi Attribute Decision Making (MADM)-Methoden werden in Abschnitt 3.5 formal definiert und anhand verschiedener Beispiele in Abschnitt 3.6 eingeführt. Insbesondere wird in Abschnitt 3.6.4 die Methodenfamilie PROMETHEE vorgestellt. Auf Basis der MADM-Methoden werden in Abschnitt 3.7 mehrere Methoden zur Portfolioerzeugung mit dem Ergebnis diskutiert, dass es für das vorliegende Problem keine adäquate Methode gibt. In Abschnitt 3.8 wird daraufhin eine neue Methode zur Portfolioerzeugung und -bewertung entwickelt und in Abschnitt 3.9 in einen allgemeingültigen Prozess zur Portfolioentscheidung eingebettet. Das Kapitel endet mit einer Zusammenfassung in Abschnitt 3.10. Eine Übersicht über die Struktur des aktuellen Kapitels und eine Aufteilung nach MCDA und Portfolioentscheidungen zeigt Abbildung 3.1.

### 3.1 MEHRKRITERIELLE ENTSCHEIDUNGSPROBLEME

Im Allgemeinen beschreibt eine *Entscheidung* die Auswahl einer Alternative aus zwei oder mehr Handlungsalternativen. Entscheidungen werden täglich mehrfach in verschiedenen Kontexten getroffen. Die Entscheidungstheorie beschäftigt sich mit dem kognitiven Prozess einer Entscheidung, der letztendlich mit einer Handlung endet, die geprägt ist von

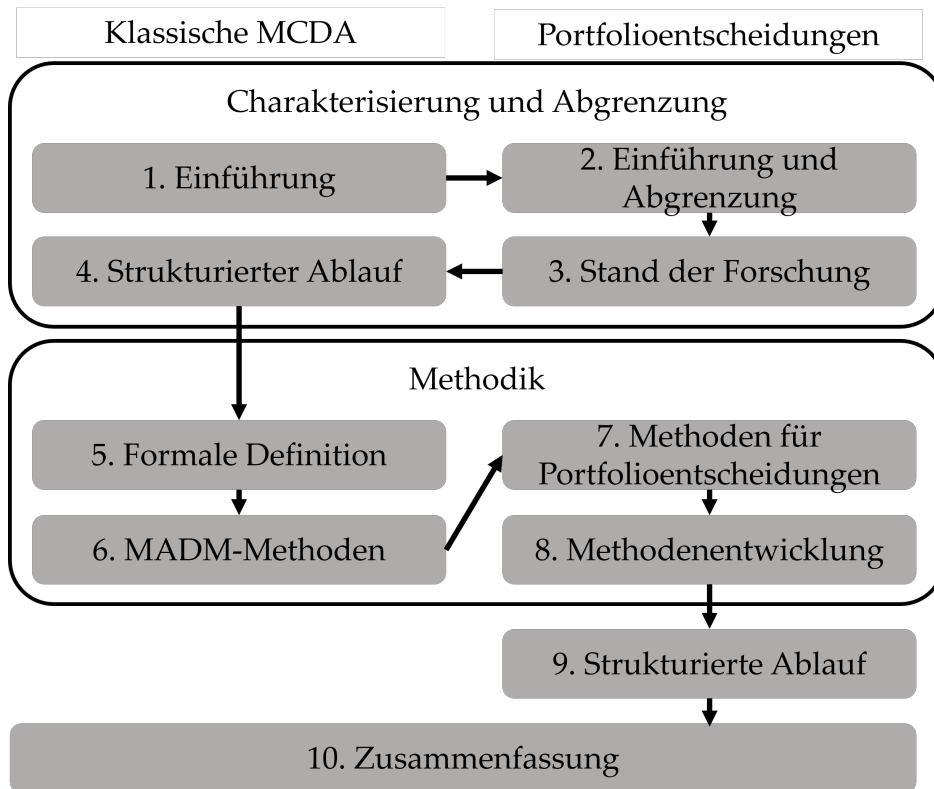


Abbildung 3.1: Struktur Kapitel 3

den Annahmen, Präferenzen, Vorstellungen und Intuition des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin (Simon, 1977). Das Treffen von Entscheidungen ist bei vielen Alternativen und deren unterschiedlichen Konsequenzen für Menschen oft schwierig, da das menschliche Gehirn nur eine begrenzte Menge an Informationen parallel verarbeiten kann (Miller, 1956). Bei einer Entscheidung ist es nötig, Alternativen zu definieren und abzuwägen, Informationen zu verdichten und aufzubereiten und diese mit den eigenen Zielvorstellungen abzugleichen. Hierbei argumentiert Keeney (1992), dass es sinnvoll sei, die Alternativen anhand eines präferierten Zielzustands zu wählen. Ergebnisse der Psychologie zu Entscheidungsprozessen zeigen, dass komplexe Entscheidungen abgekürzt und das Entscheidungsproblem intuitiv heuristisch gelöst wird (Kahneman, 2012; Tversky und Kahneman, 1974). In alltäglichen Situationen ist dieser Umstand oft nicht problematisch. Bei vielen betriebswirtschaftlichen Entscheidungen, die weitreichende Konsequenzen haben, ist wünschenswert, eine möglichst fundierte Entscheidung treffen zu können. Die Entscheidungsunterstützung bietet hier zum einen eine Möglichkeit, Entscheidungsprobleme zu strukturieren und zum anderen Methoden, um eine Handlungsalternative auszuwählen.

Viele Entscheidungsprobleme besitzen eine große Anzahl von möglichen Alternativen, die unter Beachtung verschiedener Kriterien analysiert werden müssen. Die MCDA ist ein Teilgebiet des OR und befasst sich mit diskreten Entscheidungsproblemen, d. h. der Auswahl einer bestmöglichen Handlungsalternative, die den Präferenzen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin entspricht. Hierbei bietet sie sowohl Möglichkeiten, den



Entscheidungsprozess zu strukturieren, als auch Methoden, um die optimale Alternative zu bestimmen (Belton und Stewart, 2002; Gregory, 2012; Lerche und Geldermann, 2015; Zimmermann und Gutsche, 1991).

Belton und Stewart (2002) fassen die Ziele der mehrkriteriellen Entscheidungsunterstützung unter folgenden Punkten zusammen. Das Hauptziel besteht darin, dem Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerin zu helfen, das Entscheidungsproblem zu verstehen und sowohl die eigenen Vorstellungen als auch die Vorstellungen anderer zu berücksichtigen. Durch Organisation und Synthese der vorhandenen Informationen im Entscheidungsprozess wird die präferierte Handlungsalternative letztendlich bestimmt. Darüber hinaus zielt die MCDA darauf ab, mehrere konfligierende Ziele zu berücksichtigen und den Entscheidungsprozess allgemein zu strukturieren. Dies hat zum Ziel, die vorhandene Intuition des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin zu hinterfragen, um intuitives Urteilsvermögen und Erfahrung zu ersetzen. Hierbei sollten MCDA-Ansätze und Verfahren konzeptionell einfach und transparent sein. Ungeachtet des vorherigen Punktes sind Fachkenntnisse erforderlich, um selbst einfache Werkzeuge in einer potenziell komplexen Umgebung effektiv zu nutzen (Belton und Stewart, 2002).

Ein klassisches mehrkriterielles Entscheidungsproblem besteht aus einer endlichen Menge an Alternativen, die mit Blick auf eine endliche Menge an Kriterien bewertet werden. Die Skalen der Kriterienausprägungen unterliegen dabei zunächst keinen Einschränkungen und können durch Ordinal-, Kardinal- und Nominalskalen oder Intervalle und Verhältnisse ausgedrückt werden (vgl. z. B. Belton und Stewart, 2002; Gregory, 2012; Zimmermann und Gutsche, 1991). Die Alternativen und Kriterien müssen am Anfang des Entscheidungsprozesses nicht vollständig feststehen und können entweder im Rahmen der Problemstrukturierung oder iterativ definiert werden (Marttunen u. a., 2017). Der Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerin möchte eine Alternative bestimmen, die seinen oder ihren Präferenzen und Zielen entspricht. Diese Ziele und Präferenzen werden im Entscheidungsprozess berücksichtigt und müssen definiert werden (Gregory, 2012).

### 3.2 DEFINITION UND ABGRENZUNG MEHRKRITERIELLER PORTFOLIOENTSCHEIDUNGEN

Die Zielsetzung der mehrkriteriellen Portfolioentscheidungstheorie ist die Auswahl einer Teilmenge von Aktionen, d. h. ein Portfolio aus Aktionen, das den Präferenzen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin am besten entspricht, keine der gegebenen Ressourcenrestriktion verletzt und die Abhängigkeiten zwischen den Aktionen berücksichtigt. Die Auswahl einer Aktion folgt dabei einer binären Logik, sodass eine Aktion entweder in vollem Umfang oder gar nicht ausgewählt wird. Darüber hinaus darf jede Aktion nur einmal im Portfolio enthalten sein (Kandakoglu u. a., 2020; Lahtinen u. a., 2017; Liesiö u. a., 2007, 2020).

Der Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerin wird in der *Portfolioauswahl* mit dem Problem konfrontiert, eine oder mehrere Maßnahmen, Aktionen oder Handlungen aus einer Gesamtmenge auszuwählen. Im Gegensatz zur klassischen MCDA ist in dieser Pro-

blemstellung die Auswahl einer einzelnen Alternative nicht ausreichend, um das gegebene Problem zufriedenstellend zu lösen. Eine Lösung kann nur durch sinnvolle Kombination von mehreren gegebenen Aktionen oder Handlungen erreicht werden, wobei verschiedene Einschränkungen, wie z. B. das verfügbare Budget, berücksichtigt werden müssen. Die Teilmenge, die der Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerin ausgewählt, wird dabei als Portfolio bezeichnet (vgl. z. B. Salo u. a., 2011). Bei der Auswahl orientiert sich der Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerin an den möglichen Auswirkungen des Portfolios, welche sich auf eine bestimmte Weise aus den Eigenschaften der Portfoliobestandteile ergeben (vgl. z. B. Heidenberger und Stummer, 1999; Kandakoglu u. a., 2020; Liesiö u. a., 2020; Salo u. a., 2011).

Bei der Portfolioauswahl gilt es, zum einen die Wechselwirkungen zwischen den Aktionen des Portfolios zu berücksichtigen, d. h. es können sich zwei Aktionen gegenseitig ausschließen, voneinander abhängig sein, sich gegenseitig verstärken oder abschwächen. Zum anderen müssen eine Vielzahl an Einschränkungen sowie die Präferenzen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin bei der Erstellung des Portfolios berücksichtigt werden (Lahtinen u. a., 2017).

Darüber hinaus ist die Portfolioauswahl oft ein mehrkriterielles Problem, da ein Portfolio von Aktionen in mehreren Kriterien den Präferenzen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin entsprechen soll (vgl. z. B. Liesiö u. a., 2007, 2020; Vetschera und Almeida, 2012). Die mehrkriterielle Problematik der Portfolioauswahl wurde zuerst im Kontext der Auswahl von Anlageprodukten zur Kapitalanlage in der Finanzwirtschaft beschrieben (Markowitz, 1952). Dabei werden im klassischen Fall das Risiko und die Rendite als Zielgrößen gegeneinander abgewogen und optimiert.

Die Portfolioauswahl kann sich darüber hinaus weitaus schwieriger gestalten, wenn mehrere Kriterien für die Auswahl eines Portfolios relevant sind. Aus diesem Grund werden im Folgenden mehrkriterielle Portfolioentscheidung näher charakterisiert. Eine Portfolioentscheidung kann mit Blick auf Kriterien aus verschiedenen Unterzielen, z. B. der ökonomischen, ökologischen und sozialen Unterziele, getroffen werden und somit mehr als die zwei Ziele der klassischen Portfolioauswahl nach Markowitz (1952) umfassen. Die genannten Kriterien lassen sich nur noch schwierig zu einer einzigen Bewertung eines Portfolios aggregieren, da diese beispielsweise in verschiedenen Einheiten quantifiziert sein können (vgl. z. B. Bozorg-Haddad u. a., 2021, S. 18f). Der Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerin verfolgt in der mehrkriteriellen Portfolioauswahl mit diesem Aufbau verschiedene Ziele, deren Erfüllung im Konflikt miteinander stehen kann (vgl. z. B. Heidenberger und Stummer, 1999; Liesiö u. a., 2007). Diese Zielkonflikte können nicht immer ohne Weiteres beseitigt werden, da der Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerin kein Kriterium einem anderen vorziehen möchte oder nicht zwischen diesen abwägen kann (Brans und Smet, 2016; Vetschera und Almeida, 2012).

Das Portfolio, dessen Auswirkungen am ehesten mit den Präferenzen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin für das Erreichen verschiedener Ziele übereinstimmt und dabei den gegebenen Einschränkungen genügt, wird schließlich zur Umsetzung ausgewählt (Lahtinen u. a., 2017; Liesiö u. a., 2020; Vetschera und Almeida, 2012).

Im Allgemeinen beschreibt eine mehrkriterielle Portfolioentscheidung die Erzeugung und Bewertung von Portfolios aus Aktionen, die mehrkriteriell bewertet werden können und gegebenen Einschränkungen genügen (Salo u. a., 2011).

Portfolioentscheidungen werden größtenteils in der taktischen Unternehmensplanung eingeordnet, da sie oft zwischen den operativen und strategischen Planungsproblemen angesiedelt sind (Liesiö u. a., 2020). Die operativen Probleme im OR beziehen sich auf Probleme, die meist ohne persönliche Präferenzen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin gelöst werden können. Strategische Entscheidungen wiederum werden nicht als Menge möglicher Aktionen definiert, die kombiniert werden müssen, sondern bestehen aus einer Menge wohl-definierter Alternativen (Liesiö u. a., 2020).

Zusammenfassend können mehrkriterielle Portfolioentscheidungen wie folgt charakterisiert werden (vgl. z. B. Liesiö u. a., 2020; Salo u. a., 2011; Vetschera und Almeida, 2012):

- **Aktionen und Kriterien:** Es gibt eine Menge an möglichen Aktionen, die ein Entscheidungsträger oder eine Entscheidungsträgerin zu einem Portfolio zusammenfassen möchte, sodass vorab definierte Ziele erreicht werden. Diese Ziele werden über Kriterien modelliert, die an das ausgewählte Portfolio angelegt werden.
- **Die Ressourcen-/Budgetbeschränkung:** Aufgrund begrenzter Ressourcen können nicht alle Aktionen umgesetzt werden (Einschränkungen sind z. B. Budget, aber auch Personalzeit und Umweltwirkungen). Auf der relevanten organisatorischen Ebene der Entscheidungsfindung können diese Beschränkungen nicht ohne weiteres gelockert werden (Liesiö u. a., 2020; Pohl u. a., 2020a; Salo u. a., 2011).
- **Nutzen:** Von der Aufnahme einer Aktion in das Portfolio wird ein positiver Nutzen erwartet, der materiell (z. B. geringere Kosten, kleinere Emissionen) oder immateriell (z. B. soziale Akzeptanz) sein kann, aber oft mehrdimensional ist und beide Arten von Nutzen vereint (Liesiö u. a., 2020; Pohl u. a., 2020a).
- **Wechselwirkungen:** Der Nutzen der Auswahl eines Portfolios von Aktionen steht in einem systematischen Zusammenhang mit den Vorteilen, die sich aus der Auswahl der einzelnen Aktionen im Portfolio ergeben. Dieser Zusammenhang muss weder einfach zu erfassen noch zu modellieren sein. Insbesondere kann die gemeinsame Durchführung von zwei Aktionen je nach Kontext mehr oder weniger Wert schaffen als die Summe der Werte der einzelnen Aktionen. Beispielsweise kann die gemeinsame Durchführung von zwei Aktionen mehr oder weniger kosten als die Summe der Einzelkosten dieser Aktionen. Diese gemeinsamen Kosten können aber auch unabhängig von den Kosten der Aktionen sein (Liesiö u. a., 2020).

Insbesondere der Nutzen der Aktionen ergibt sich über die vom Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerin angelegten Kriterien. Dieser mehrkriterielle Aspekt gehört somit zur Portfolioauswahl und Portfolioentscheidung und zeigt sich in den Veröffentlichungen von Kandakoglu u. a. (2020), Liesiö u. a. (2020) und Pohl u. a. (2020a).

### 3.3 MEHRKRITERIELLE PORTFOLIOENTSCHEIDUNGEN IM OPERATIONS RESEARCH

Der Bereich der Portfolio-Entscheidungsanalyse, engl. Portfolio Decision Analysis (**PDA**) befasst sich mit der Erstellung von mehrkriteriellen Portfolios unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen den Aktionen. Der Begriff „**PDA**“ beschreibt eine neue Entwicklung des **OR** und wurde zuerst von Salo u. a. (2011) definiert als

a body of theory, methods and practice which seeks to help decision makers make informed selections from a discrete set of alternatives through mathematical modelling that accounts for relevant constraints, preferences and uncertainties. (Salo u. a., 2011, p. 4).

Die **PDA** ist somit als ein Teilgebiet der Entscheidungsunterstützung definiert, das sich mit der Portfolioauswahl befasst. Hierbei werden sowohl methodische Entwicklungen als auch Anwendungen einbezogen. Die **PDA** ist zudem eng verwandt mit dem Projektportfolio-Management, das wiederum als Erweiterung der ursprünglichen Portfoliotheorie von Markowitz (1952) gesehen werden kann.

Die **PDA** baut auf den Methoden und Ansätzen der klassischen **MCDA** auf und kann somit als Erweiterung dieser gesehen werden. Viele Ansätze im Bereich der mehrkriteriellen Portfolioentscheidungen beruhen auf den Methoden der **MCDA**, die auch als **MADM**-Methoden bezeichnet werden. Hierbei werden die Handlungsoptionen bzw. Aktionen der Grundmenge zunächst mehrkriteriell bewertet und anschließend zu Portfolios zusammengefasst. Diese Portfolios können wiederum mehrkriteriell bewertet werden. Die **MCDA** wird aus diesem Grund verstärkt für die Bewertung und Erzeugung von mehrkriteriellen Portfolios verwendet (Kandakoglu u. a., 2020; Liesiö u. a., 2020; Morton u. a., 2016; Song u. a., 2021).

Eine Herausforderung bei der Erzeugung der mehrkriteriellen Portfolios ist die große Anzahl möglicher Portfolios, die exponentiell mit der Anzahl der zugrundeliegenden Aktionen steigt. Somit ist die Berechnung aller resultierenden Portfolios und ihre anschließende Bewertung nur für kleine Grundmengen an Aktionen rechnerisch möglich. Für große Grundmengen müssen geeignete Methoden zur Portfolioerzeugung entwickelt werden.

#### 3.3.1 Allgemeine mehrkriterielle Portfolioentscheidungen

In der Fachliteratur sind bereits mehrkriterielle Portfolioentscheidungsprobleme diskutiert worden (vgl. z. B. Archer und Ghasemzadeh, 1999; Ghasemzadeh und Archer, 2000; Kandakoglu u. a., 2020; Lahtinen u. a., 2017; Liesiö u. a., 2020; Salo u. a., 2011).

Die Ursprünge der Modelle für Portfolioentscheidungen gehen auf die Arbeiten von Markowitz (1952) zur Risikodiversifizierung bei Finanzanlagen zurück. Die Entscheidungskriterien bei der Erstellung dieser Finanzportfolios sind die Maximierung der Rendite und auf der anderen Seite die Minimierung des Risikos der Investitionen. Das Mittelwert-Varianz-Modell von Markowitz und das Preisbildungsmodell für Kapitalanlagen von Sharpe (1964) unterstützen Investitionsentscheidungen für den Kauf von Finanzanlagen und Wertpapieren mit stochastischen zukünftigen Renditen. Die Autoren betrachteten bei der Erstellung der

Finanzportfolios die konfligierenden Ziele der Risikominimierung und Maximierung der Rendite. Hierbei wird die eine Zielgröße optimiert und die zweite kontrolliert. Das parallele Betrachten mehrerer Finanzanlagen als Portfolio unter Berücksichtigung der Kovarianzen zum Abbilden eines Diversifikationseffektes ist seitdem Grundlage der Forschung und Bewertung von Finanzportfolios (Al Janabi, 2021; Metaxiotis und Liagkouras, 2012; Paz u. a., 2017).

Neben den bikriteriellen Finanzportfolios wurde eine Reihe von Ansätzen entwickelt, die auch nicht-ökonomische Ziele, Gruppenentscheidungen und mehrere Optimierungsmethoden zur Unterstützung der Projektportfolioauswahl beinhalten. Diese Methoden wurden nicht primär für die Auswahl von Finanzproduktion in ein Portfolio entwickelt, sondern versuchen, allgemein Projekte und Aktionen in Portfolios zusammenzufassen. Die genannten Methoden zur Projektportfolioauswahl werden im Folgenden näher beschrieben. Auch die im weiteren Verlauf der Arbeit entwickelte Methode für mehrkriterielle Portfolioentscheidungen kann hier eingruppiert werden.

Ein Projektportfolio ist ein Zusammenschluss aus Projekten oder Programmen mit dem Ziel, die in einer Organisation oder einem Unternehmen definierten Strategien oder Ziele zu erreichen. Übliche Anwendungsgebiete sind der Bereich der Forschung und Entwicklung in großen Unternehmen. Projektportfoliomanagement gilt allgemein als sinnvolle Methode, um die Strategien eines Unternehmens umzusetzen und zu implementieren (Meskendahl, 2010). Hierbei kann sich ein Projektportfolio dynamisch im Lauf der Zeit ändern, sodass neue Projekte gestartet und abgeschlossene Projekte entfernt werden können. Eine Organisation kann, je nach Art und Anzahl der Ziele, mehrere Projektportfolios haben (PMI, 2013). Ursprünglich wurden Projektportfolios als monokriterielle Probleme betrachtet und modelliert, d. h. der Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerin betrachtet nur ein Ziel, das durch diese Projekte erreicht werden soll. Allerdings gibt es auch Projektportfolioprobleme mit mehreren Zielsetzungen. Wissenschaftliche Studien zu Projektportfolioproblemen untersuchen meist ökonomische Kriterien bei der Auswahl der Projekte (Kester u. a., 2009) oder erweitern diese um ein Risiko. Die Risikobewertung wird, analog zu Portfolios aus Finanzanlagen, über eine Wahrscheinlichkeitsverteilung definiert und ermöglicht dann, Methoden auf Basis der Portfoliomodelle von Markowitz (1952) anzuwenden (z. B. Dixit und Tiwari, 2020; Tofighian u. a., 2018). Eine Übersicht zu Methoden und Anwendungen von Projektportfolios im Bereich Research & Development bieten Heidenberger und Stummer (1999).

Der klassische Ansatz zur Erzeugung von Portfolios ist ein iterativer Prozess in Zusammenarbeit mit dem Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerin. Zunächst werden mehrere Portfolios erzeugt, miteinander verglichen und diskutiert (z. B. Gregory, 2012; Prato und Herath, 2007, S. 170). Hierbei werden schrittweise Aktionen zu möglichen Portfolios hinzugefügt und dem Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerin vorgelegt. Ein Nachteil bei diesem Prozess ist die Pfadabhängigkeit in der Erzeugung der Portfolios bzw. der Alternativen, d. h. die Auswahl von neuen Aktionen eines Portfolios hängt von der bisherigen Auswahl ab. Dies führt oft dazu, dass bessere Portfolios nicht gefunden werden (Lahtinen und Hämäläinen, 2016; Lahtinen u. a., 2017). Darüber hinaus ist es schwierig, bei mehreren Aktionen und Bewertungskriterien sowie Abhängigkeiten zwischen den Aktionen, Portfolios zu konstruieren, die den Präferenzen des Entscheidungsträgers oder der

Entscheidungsträgerin entsprechen. Insbesondere ist bei vielen Portfolioentscheidungen die wechselseitigen Interaktionen von Alternativen zu berücksichtigen, was in einem iterativen Prozess schwierig ist (Lahtinen u. a., 2017). Die Schwierigkeit ergibt sich hier insbesondere aus vielen Kombinationsmöglichkeiten der Alternativen und den einhergehenden Interaktionen der Alternativen. Im Rahmen der PDA werden verschiedene Arten der Interaktionen unterschieden (Morton u. a., 2016):

1. Interaktionen bei Ressourcen. Dies betrifft Aktionen, bei denen Einsparungen oder zusätzliche Kosten entstehen, wenn zwei (oder mehr) Aktionen gleichzeitig durchgeführt werden.
2. Technische Interaktionen. Dies betrifft Aktionen, die die Umsetzung anderer Aktionen als Voraussetzung haben. Oder die Durchführung einer Aktion die Durchführung einer anderen Aktion unmöglich macht.
3. Interaktionen beim Nutzen. Dies betrifft zwei oder mehr Aktionen, bei denen die Durchführung mehr wert ist, als die Summe der Vorteile, die sich durch die einzelne Durchführung ergibt.

Eine gleichzeitige Betrachtung aller Aktionen, Interaktionen und Bewertungskriterien hilft, die Nachteile eines iterativen Prozesses zu vermeiden. Hierfür bieten sich insbesondere Methoden MCDA für eine erste Bewertung der Aktionen an (Almeida u. a., 2014; Lahtinen u. a., 2017; Vetschera und Almeida, 2012).

Die aktuelle Literatur zu mehrkriteriellen Portfolioentscheidungen kann in zwei Vorgehensweisen eingeteilt werden (Kandakoglu u. a., 2020), die in Abbildung 3.2 dargestellt sind und im Folgenden näher beschrieben werden.

Bei der direkten Erzeugung (vgl. linke Seite Abbildung 3.2) werden Portfolios meist ohne Berücksichtigung der Präferenzen eines Entscheidungsträgers oder Entscheidungsträgerin erzeugt (Kandakoglu u. a., 2020). Es werden üblicherweise Optimierungsprogramme eingesetzt, um ein Portfolio zu erzeugen, das bezüglich eines Kriteriums optimal ist. Hierbei werden die Interaktionen der Aktionen durch das Optimierungsprogramm modelliert und gehen so in die Portfolioerzeugung ein. Zur Lösung dieser Modelle werden Solver für Optimierungsprogramme oder Heuristiken eingesetzt. Oft verwendete Kriterien zur Optimierung sind der Kapitalwert der Aktionen (vgl. z. B. Jafarzadeh u. a., 2015) oder Risiken (vgl. z. B. Dixit und Tiwari, 2020).

Neben den einstufigen Verfahren der direkten Erzeugung werden auch zweistufige Verfahren eingesetzt. Hier wird nach der Portfolioerzeugung, bei der mehrere Portfolios erzeugt wurden, eine MADM-Methode verwendet, um das präferierte Portfolio bestimmen. Die Entscheidungsunterstützung findet hier auf Ebene der Portfolios statt (Kandakoglu u. a., 2020). Die direkte Erzeugung von Portfolios hat zum Vorteil, dass durch die Modellierung bereits viele Interaktionen zwischen den Aktionen berücksichtigt werden können. Nichtsdestotrotz steigt die Anzahl der zu analysierenden Portfolios exponentiell mit der Anzahl der Aktionen, sodass dieses Verfahren schnell an Grenzen stößt. In der wissenschaftlichen Literatur werden oft kleine Probleminstanzen mit zehn oder weniger Aktionen analysiert (Kandakoglu u. a., 2020).

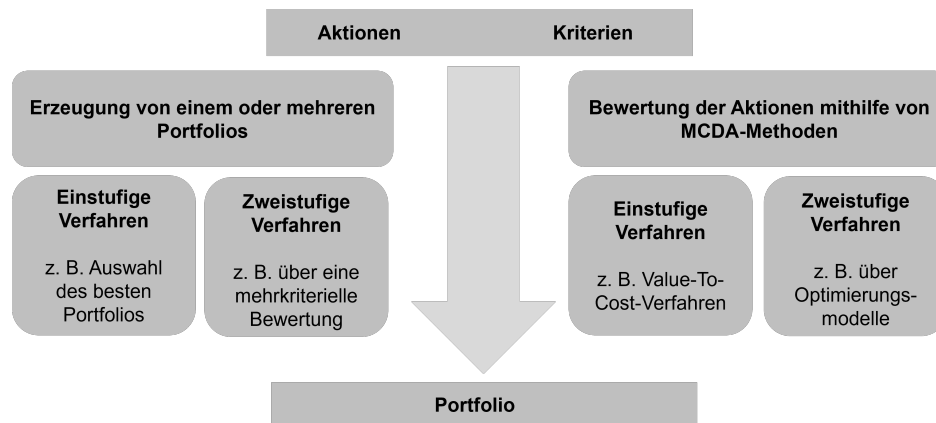


Abbildung 3.2: Bekannte Ansätze zur Erzeugung von mehrkriteriellen Portfolios, Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Kandakoglu u. a. (2020) und Lahtinen u. a. (2017)

Als alternativen Ansatz werden die Aktionen zunächst mehrkriteriell bewertet und dann in Portfolios zusammengefasst (vgl. rechte Seite Abbildung 3.2). Bei den *Value-to-Cost*-Verfahren wird eine mehrkriterielle Bewertung der Aktionen durchgeführt und die jeweiligen Kosten werden ermittelt. Die Aktionen werden dann zu einem Portfolio entsprechend ihrem Wert-Kosten-Verhältnis in absteigender Reihenfolge hinzugefügt, bis eine der gegebenen Einschränkungen verletzt wird (Kester u. a., 2009; Kleinmuntz, 2007; Phillips und Bana e Costa, 2007). Bei diesem Ansatz werden die Interaktionen zwischen den Aktionen nicht berücksichtigt, was zu nicht-optimalen Portfolios führen kann (Lahtinen u. a., 2017).

Für eine große Grundmenge an möglichen Aktionen können optimale Portfolios mithilfe von *MADM*-Methoden und der mathematischen Programmierung erstellt werden (Almeida u. a., 2014; Brans und Smet, 2016; Liesiö u. a., 2020). Bei diesen zweistufigen Verfahren werden die Aktionen zunächst mehrkriteriell bewertet und anschließend mithilfe eines Optimierungsmodells durch lineare Programmierung in einem Portfolio zusammengefasst. Dieses Vorgehen wurde in der wissenschaftlichen Literatur für verschiedene *MADM*-Methoden untersucht.

Die Anwendung einer einfachen linearen und additiven Wertefunktion, d. h. mit der *MADM*-Methode Multi Attribute Value Theory (*MAVT*), die die gewichteten Kriterienausprägungen summiert, wurde mehrfach untersucht (z. B. Ewing u. a., 2006; Golabi u. a., 1981; Gurgur und Morley, 2008; Kleinmuntz, 2007; Liesiö u. a., 2007; Liesiö und Vilkkumaa, 2021; Lopes und Almeida, 2015; Parnell u. a., 2002; Phillips und Bana e Costa, 2007). Liesiö u. a. (2007) entwickeln eine Methode zur Bestimmung von sogenannten Grenzportfolios, basierend auf der dynamischen Programmierung. Sie gehen davon aus, dass sich die Kriterienausprägung der Portfolios additiv aus den Kriterienausprägungen der Aktionen zusammensetzt und validieren ihre Methode an einem Fallbeispiel zur nachhaltigen Bewirtschaftung von Wäldern in Finnland. Die hier vorgestellte Methode wurde für den robusten Fall unter Unsicherheiten von Fliedner und Liesiö (2016) und für stochastische Modelle von Liesiö und Vilkkumaa (2021) erweitert. Hierbei wird bei Liesiö und Vilkkumaa (2021) das ursprünglich additive, lineare Modell mithilfe von Wertfunktionen auf ein multi-lineares Modell erweitert.

Darüber hinaus gibt es Veröffentlichungen, die andere Methoden der mehrkriteriellen Entscheidungsunterstützung zur Bewertung der Aktionen verwenden (z. B. Fliedner und Liesiö, 2016; Fontana und Morais, 2013). Bei der anschließenden Erzeugung der Portfolios mittels mathematischer Programmierung werden die Projekte so zu einem Portfolio zusammengefasst, dass sie den gegebenen Nebenbedingungen genügen und eine möglichst hohe Gesamtbewertung erzielen (Almeida und Vetschera, 2012; Liesiö u. a., 2007; Vetschera und Almeida, 2012).

Vetschera und Almeida (2012) entwickeln ein Modell zur Erzeugung mehrkriterieller Portfolios auf Grundlage der MCDA-Methode PROMETHEE. Sie gehen in ihrer Arbeit davon aus, dass sich die Kriterienausprägungen eines Portfolios additiv aus den Kriterienausprägungen der einbezogenen Projekte ergeben und zeigen, dass dann durch die Berechnung sogenannter c-optimaler Portfolios ein hinreichend gutes Portfolio gefunden wird. Ein c-optimales Portfolio ist ein Portfolio aus genau c Projekten. Es wird ein iteratives Vorgehen vorgeschlagen, das für alle c ein optimales Portfolio errechnet und am Ende das optimale Portfolio bestimmt wird. Dabei wird beobachtet, dass im Vergleich zu allen denkbaren Portfolios das so erzeugte Portfolio oft von den Entscheidungsträgern präferiert wird. Die Methode wird durch eine umfangreiche theoretische Fallstudie validiert.

Eine Analyse und Übersicht weiterer MCDA-Methoden zur Erzeugung von mehrkriteriellen Portfolios wurde von Kandakoglu u. a. (2020) erstellt. Ein aktueller Überblick zu den Anwendungsgebieten der PDA ist in (Liesiö u. a., 2020) zu finden.

Portfolios aus Aktionen zur Reduzierung der betrieblichen Umweltwirkungen und Steigerung der Ressourceneffizienz werden in der aktuellen Forschungsliteratur allerdings nur vereinzelt und ansatzweise behandelt (Crowe und Parker, 2008; Liesiö u. a., 2020; Paydar und Qureshi, 2012). Insbesondere die Value-To-Cost-Verfahren sind hier nicht geeignet, da sie die Interaktionen zwischen den Aktionen nicht berücksichtigen und nicht das optimale Portfolio finden (Lahtinen u. a., 2017).

Im folgenden Abschnitt wird daher ein Überblick zu bekannten Anwendungen, Methoden und Ansätzen zur Portfolioerzeugung und -bewertung dargestellt, der einen Fokus auf die Einsatzmöglichkeiten bei Nachhaltigkeitsportfolios hat.

### 3.3.2 Bekannte Anwendungen und Methoden für Nachhaltigkeitsportfolios

Veröffentlichungen zur Erzeugung von mehrkriterieller Portfolios im betrieblichen Umfeld mit dem Ziel, die Umweltwirkung des Unternehmens zu reduzieren, sind wenig erforscht (Kandakoglu u. a., 2020; Liesiö u. a., 2020). So gibt es einige Veröffentlichungen zu Portfolioentscheidungen mit Nachhaltigkeitsbezug im Bereich der Renaturierung von Landschaften und Gewässern (vgl. Crowe und Parker, 2008; Hajkowicz und Higgins, 2008; Higgins u. a., 2008; Kurttila u. a., 2009; Marinoni u. a., 2011, 2009), bei denen sich die Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen allerdings nicht einem Unternehmen zuordnen lassen.

Im Kontext der Portfolioerzeugung zur Steigerung der Nachhaltigkeit sind die im vorherigen Abschnitt dargestellten Methoden aus mehreren Gründen nicht geeignet. Die von Liesiö u. a. (2007) verwendeten additiven Wertfunktionen setzen die Skalierbarkeit der Kriterien-



ausprägungen voraus (vgl. z. B. Vetschera und Almeida, 2012), die nur in Anwendungsfällen mit vergleichbaren Kriterien gegeben ist, da diese ohne Berücksichtigung der Einheiten addiert werden. So ist etwa eine lineare Addition von Treibhausgasemissionen gemessen in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (CO<sub>2</sub>e) und Investitionsausgaben [€] bei Nachhaltigkeitsentscheidungen nicht sinnvoll, sodass diese Methode für das Problem nicht geeignet ist<sup>1</sup> (vgl. z. B. Munda, 2016).

Von Vetschera und Almeida (2012) werden die Einheiten der Kriterienausprägungen durch die Präferenzfunktionen von PROMETHEE dimensionslos berücksichtigt und anhand der Informationen der Entscheidungsträger skaliert. Jedoch findet man durch die Berechnung c-optimaler Portfolios nicht zwingend das Portfolio mit der höchsten Präferenz, sondern lediglich hinreichend gute Portfolios. Die Autoren selbst merken an, dass die Berechnung der c-optimalen Portfolios nur als eine gute Approximation an das optimale Portfolio gesehen werden kann. Probleme ergeben sich hier durch die Aggregation der Kriterienausprägungen der Aktionen zur Kriterienausprägung des Portfolios, die entweder monoton oder nicht-monoton sein kann (Almeida und Vetschera, 2012), bzw. auch unbestimmbar (Pohl u. a., 2020a).

Daher wird in dieser Arbeit eine Methode entwickelt, die insbesondere mehrkriterielle Portfolios zur Steigerung der Nachhaltigkeit erzeugen und bewerten kann. Hierfür werden in den folgenden Kapiteln MADM-Methoden und der strukturelle Ablauf der MCDA eingeführt. In Kapitel 3.7 werden die oben diskutierten Methoden wieder aufgegriffen und detailliert analysiert. Aufbauend auf den aktuellen Forschungsergebnissen wird dann eine Methode zur Portfolioauswahl und -entscheidung vorgeschlagen.

### 3.4 DER STRUKTURIERTE ABLAUF DER MCDA

Roy (1986) unterscheidet drei Problemtypen als Referenzprobleme für MADM-Methoden, die sich nicht unbedingt gegenseitig ausschließen. Die Referenzprobleme werden wie folgt charakterisiert (vgl. Roy, 2016):

- Selektion ( $\alpha$ ): Auswahl einer Alternative. Das Ziel ist die Bestimmung von guten Alternativen, sodass letztendlich eine präferierte Alternative ausgewählt werden kann.
- Zuordnung ( $\beta$ ): Eingruppierung der Alternativen in definierte Kategorien. Das Ziel ist die Zuordnung der Alternativen in zuvor definierte Kategorien, sodass die Alternativen den Charakteristiken der Kategorien entsprechen.
- Ordnung ( $\gamma$ ): Bilden einer Rangfolge aus Alternativen. Das Ziel ist die Definition einer Ordnung (partiell oder vollständig, siehe Abschnitt 3.5) auf den Alternativen, sodass diese paarweise miteinander verglichen werden können.

Diese Einteilung kann um ein viertes Referenzproblem erweitert werden:

<sup>1</sup> Eine lineare Addition von Kriterienausprägungen ermöglicht eine Kompensation zwischen den Kriterien. D. h. schlechte Ausprägungen in einem Kriterium können durch gute Ausprägungen eines andere kompensiert werden. Eine detaillierte Analyse und Darstellung der Kompensation ist in Abschnitt 3.6 zu finden.

- Portfolio ( $\delta$ ): Bilden eines Portfolios aus Alternativen. Das Ziel ist die Erzeugung und Bewertung eines Portfolios, das den Präferenzen des Entscheidungsträgers sowie den Interaktionen zwischen den Alternativen und weiteren Einschränkungen genügt (Morton u. a., 2016).

Neben den eigentlichen mathematischen Methoden der Entscheidungsfindung ist vor allem bei den europäischen Ansätzen der Prozess der Entscheidungsfindung wichtig (Stewart, 1992, S. 571). Das Ziel ist es, dem Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerin durch Strukturierung und Aufbereitung des Entscheidungsproblems zu helfen, das Entscheidungsproblem zu definieren und dabei relevante Einflussfaktoren und deren Abhängigkeiten und Auswirkungen aufzudecken. Darüber hinaus sollen subjektiven Präferenzen der Entscheidungsträgerin oder des Entscheidungsträgers in den Prozess einfließen und ihn oder sie so motivieren, aktiv an der Entscheidungsfindung teilzunehmen. Am Ende der Entscheidungsunterstützung soll der Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerin ein tiefgehendes Verständnis über das Problem erlangt haben, den Einfluss der eigenen Präferenzen abschätzen und die Auswirkungen der Entscheidung bestimmen können (Belton und Stewart, 2002; Roy und Mousseau, 1996, S. 2ff).

Zu diesem Zweck wurde von Belton und Stewart (2002, S. 5) der allgemeine Ablauf der Entscheidungsunterstützung beschrieben, der in Abbildung 3.3 dargestellt ist. Der Gesamtprozess der Entscheidungsunterstützung wird aufgeteilt in einzelne Schritte, die einfacher zu bewältigen sind. Die in Abbildung 3.3 dargestellten Schritte müssen nicht nacheinander ablaufen, sondern dienen der Orientierung. Nach Belton und Stewart (2002, S. 5f) ist eine nachträgliche Anpassung des Ablaufs aufgrund neuer Erkenntnisse sogar erwünscht. Der Prozess der Entscheidungsunterstützung wird hier als iterativer Prozess verstanden, der so lange wiederholt wird, bis der Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerin mit dem Ergebnis zufrieden sind. Darüber hinaus werden in den Prozess weitere Akteure eingebunden. Bouyssou (2002) und Roy u. a. (2016, S. 100ff) unterscheiden zwischen Entscheidungsträger bzw. Entscheidungsträgerin und Analyst bzw. Analystin. Die Aufgabe des Analysten oder der Analystin ist es, durch den Entscheidungsprozess zu leiten und sich dabei neutral gegenüber dem Ergebnis zu verhalten. Darüber hinaus sollen bei der Entscheidungsfindung alle anderen Stakeholder, d. h. Personen, die von der Entscheidung betroffen sind oder sich betroffen fühlen, mit einbezogen werden.

### 3.4.1 Definition des Entscheidungsproblems

Der Entscheidungsprozess beginnt mit der Definition des Entscheidungsproblems. Das Entscheidungsproblem sollte allgemein verständlich ausformuliert werden, sodass alle beteiligten Personen ein grundlegendes Verständnis entwickeln. Hierbei gilt es auch folgende Fragen in ihren Grundzügen zu beantworten (vgl. Gregory, 2012, Kap. 1.2):

- Welche Entscheidung oder Entscheidungen sollen von wem und wann getroffen werden?
- Welche Ziele und Alternativen sollten berücksichtigt werden?
- Welche Art der Entscheidung liegt vor und wie kann diese strukturiert werden?

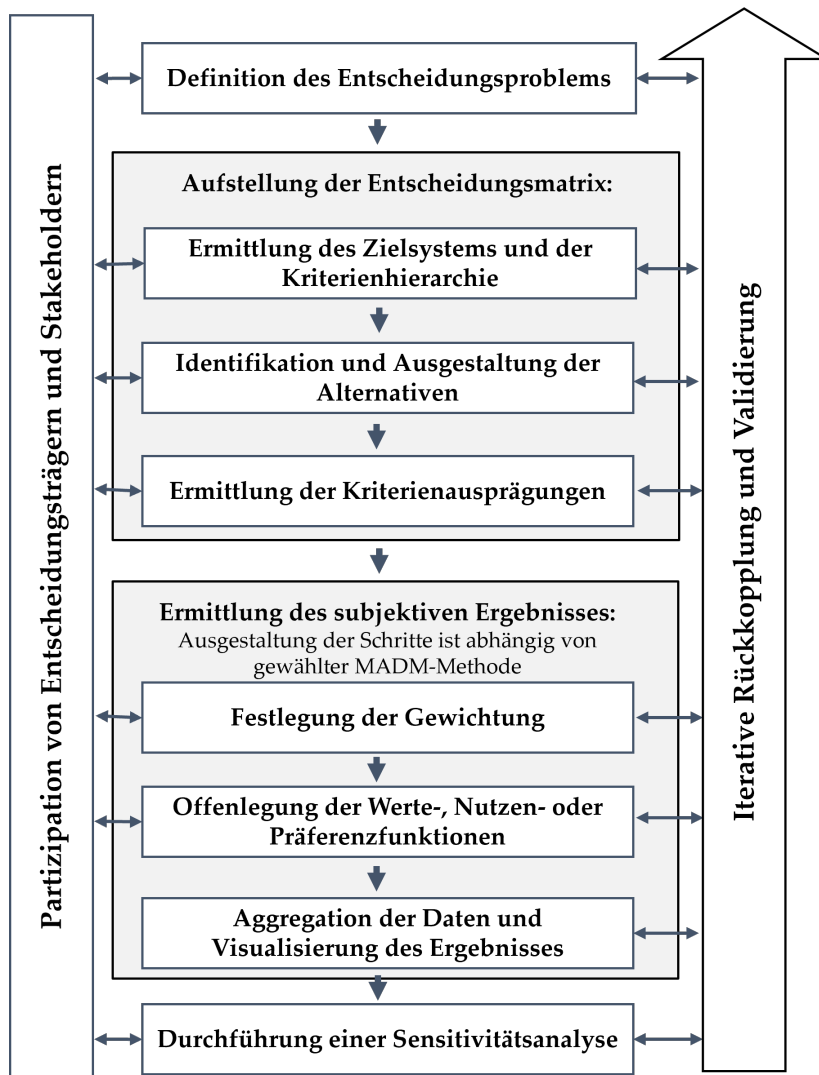


Abbildung 3.3: Der strukturierte Ablauf einer MCDA, Quelle: Eigene Darstellung nach (Belton und Stewart, 2002; Keeney, 1992; Lerche, 2016)

Die Beantwortung der oben genannten Fragen führt zu einer ersten Eingrenzung der Entscheidung und ersten Abschätzung der möglichen Alternativen und Ziele. Die Bestimmung der Entscheidungsträgerin oder des Entscheidungsträgers gehört zu den zentralen Ergebnissen des ersten Schrittes. Des Weiteren sollten die Rollen der einzelnen Akteure definiert werden. Hierzu zählt insbesondere die Rolle der Stakeholder, und deren Integration in den Entscheidungsprozess (Belton und Stewart, 2002, S. 59f).

Weiterhin sollte im Rahmen der Definition des Entscheidungsproblems aus der Art des Entscheidungsproblems abgeleitet werden, welche MADM-Methode verwendet werden kann. Die Rolle der MADM-Methode bei der Entscheidung und die Abhängigkeit des weiteren Vorgehens von der Methode sollte vom Analysten oder von der Analystin dargestellt werden (Belton und Stewart, 2002, S. 7). Verschiedene MADM-Methoden und deren Besonderheiten werden im folgenden Abschnitt 3.6 genauer dargestellt.

Darüber hinaus kann in diesem Schritt des Prozesses bereits analysiert werden, inwieweit die Entscheidung von Unsicherheiten geprägt ist. Wird die Entscheidung unter Risiko oder Ungewissheit getroffen, müssen im Entscheidungsprozess weitere Schritte berücksichtigt werden. Zur Berücksichtigung von Ungewissheit oder Risiko können speziellen Sensitivitätsanalysen oder eine Modellierung über *Fuzzy*-Zahlen verwendet werden (z. B. French, 1995; Geldermann, 1999; Insua und French, 1991; Stewart und Durbach, 2016). Im Folgenden wird von einem sicheren Entscheidungsproblem ausgegangen.

### 3.4.2 Aufstellen der Entscheidungsmatrix

Nach der Problemdefinition wird das vorliegende Entscheidungsproblem in Form einer Entscheidungsmatrix zusammengefasst. Dieser Schritt untergliedert sich in die Ermittlung des Zielsystems und der Kriterienhierarchie, der Identifikation und Ausgestaltung der Alternativen gefolgt von der Ermittlung der Kriterienausprägungen.

Die ursprüngliche Definition des strukturierten Ablaufs eines Entscheidungsproblems sieht vor, das Zielsystem nach der Definition der Alternativen zu bestimmen (Belton und Stewart, 2002, S. 52f). In „Value Focused Thinking“ argumentiert Keeney (1992), dass durch eine anfängliche Konzentration auf Alternativen der Blick eines Entscheidungsträgers oder einer Entscheidungsträgerin eingeschränkt werden kann, sodass er oder sie das eigentliche Ziel aus den Augen verliert. Insbesondere können dadurch Alternativen unentdeckt bleiben. Demnach sollten die Alternativen eines Entscheidungsproblems so ausgewählt werden, dass sie die zuvor definierten Ziele möglichst gut erreichen. Daher ist in Abbildung 3.3 die Definition des Zielsystems vor der Ausgestaltung der Alternativen dargestellt.

Die *Ermittlung des Zielsystems* stellt folglich einen wichtigen Schritt im Entscheidungsprozess dar. Ein Zielsystem ist charakterisiert durch ein Oberziel, das sich in verschiedene Ziele aufteilt, aus denen dann die Kriterien des Entscheidungsproblems abgeleitet werden (Bouyssou, 1990; Morton und Fasolo, 2009; Roy, 1993).

Bei umfangreichen Entscheidungsproblemen gestaltet sich die genaue Erfassung sämtlicher Ziele und Kriterien oft schwierig. Es bietet sich an, das Zielsystem strukturiert aufzubereiten, indem das Oberziel, die Ziele und die Kriterien in eine hierarchische Struktur

überführt werden (Keeney und Raiffa, 1976; Stillwell u. a., 1987). Die sogenannte Kriterienhierarchie ist beispielhaft in Abbildung 3.4 dargestellt.

Bei der Erstellung der Kriterienhierarchie werden sowohl „top-down“ als auch „bottom-up“ Ansätze angewendet (Morton und Fasolo, 2009). Bei ersteren wird zunächst das Oberziel formuliert, das sehr allgemein gehalten werden kann. Ausgehend davon werden nun konkrete Unterziele formuliert. Diese Unterziele können bei Bedarf noch näher konkretisiert werden. Aus den Unterzielen können dann die Kriterien des Entscheidungsproblems abgeleitet werden. Der „top-down“-Ansatz orientiert sich stark an den Zielen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin und entspricht dem Vorgehen nach Keeney (1992). Beim „bottom-up“-Ansatz werden zunächst einige Unterziele ermittelt, die dann zu einem gemeinsamen Oberziel zusammengefasst werden. Hierfür leitet man oft die Unterziele von schon bekannten Alternativen ab (Morton und Fasolo, 2009; Stillwell u. a., 1987; Weber und Borchering, 1993).

Die Ziele und Kriterien eines Entscheidungsproblems sollten so gewählt werden, dass sie alle für das Entscheidungsproblem relevanten Gesichtspunkte widerspiegeln und dabei vollständig, kohärent und nicht redundant sind (Roy und Bouyssou, 1993, S. 46ff.). Hierbei gilt es durch die Kriterien alle Aspekte des Entscheidungsproblems zu berücksichtigen und insbesondere konfligierende Ziele zu berücksichtigen. Werden bei einem Entscheidungsproblem redundante, d. h. abhängige Kriterien ausgewählt, fließt dieser Aspekt der Entscheidung stärker in den Prozess ein, was häufig nicht erwünscht ist bzw. bei der Bestimmung der Kriteriengewichtung berücksichtigt werden sollte (Bottero u. a., 2015; Roy und Mousseau, 1996; Ting, 1971).

Bei vielen Studien im Bereich der Nachhaltigkeit wird das Oberziel oft allgemein als „Verbesserung der Nachhaltigkeit“ definiert. Die Unterziele können dann in die drei Kategorien „ökologische Kriterien“, „ökonomische Kriterien“ und „soziale Kriterien“ eingeteilt werden, die dann z. B. mittels CO<sub>2</sub>e-Emissionen, den Kapitalwert oder die soziale Akzeptanz operationalisiert werden (vgl. Ananda und Herath, 2009; Wang u. a., 2009; Wu u. a., 2018).

Nach der Definition des Zielsystems und der Kriterienhierarchie werden die Alternativen des Entscheidungsproblems definiert. Hierbei soll sich nach Keeney (1992) der Entschei-

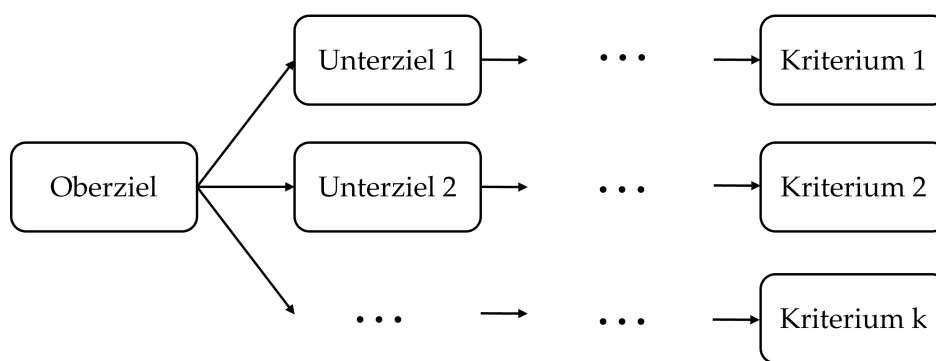


Abbildung 3.4: Aufbau der Kriterienhierarchie, Quelle: Eigene Darstellung nach (Keeney und Raiffa, 1976; Lerche, 2016; Stillwell u. a., 1987)

dungsträger oder die Entscheidungsträgerin an den Zielen orientieren und Alternativen benennen, die diese Ziele erreichen können.

Die Definition der Alternativen kann im Rahmen der *MCDA* durch Kreativitätstechniken, wie zum Beispiel Brain Storming, unterstützt werden (Gregory, 2012, S. 154). Darüber hinaus werden häufig andere Techniken der Problemstrukturierung, wie z. B. die *SWOT*-Methode (Kotler und Turner, 1997) oder Szenarien (Schoemaker, 1995), zur Erzeugung von Alternativen eingesetzt (Marttunen u. a., 2017).

Die Alternativen sollten im Anschluss so ausgearbeitet werden, dass jede Alternative eine Lösung des Entscheidungsproblems beschreibt. Die Alternativen sollten weiterhin unterscheidbar, vergleichbar und vollständig definiert sein (Gregory, 2012, S. 153f). Darüber hinaus ist es sinnvoll, die Anzahl der Alternativen kleinzuhalten, da jede Alternative im folgenden Schritt im Detail analysiert werden muss. Bereits hier sei angemerkt, dass im Rahmen der Portfolioentscheidungen und Portfolioprobleme die Alternativen das Entscheidungsproblem nicht lösen müssen. Bei der *PDA* ist das Ziel, aus einer Menge an Aktionen ein Portfolio zu erzeugen, das das Entscheidungsproblem löst. Die einzelnen Aktionen tragen dort nur einen Teil zur Lösung bei.

Die *Ermittlung der Kriterienausprägungen* zur Vervollständigung der Entscheidungstabelle ist meist der umfangreichste Teil des Entscheidungsprozesses. In diesem Schritt wird für jede Alternative ermittelt, wie diese unter den Kriterien abschneidet. Hierbei spielt es keine Rolle, ob es sich hier um ein quantitatives oder qualitatives Kriterium handelt, da viele *MADM*-Methoden mit beiden Informationen umgehen können (siehe Kapitel 3.6). Die Bestimmung der Kriterienausprägung der Alternativen ist abhängig vom Kontext des Entscheidungsproblems. In der Literatur werden unterschiedlichste Methoden und Verfahren verwendet.

Anfangs empfiehlt es sich, auf bereits vorhandenen Daten zu den Alternativen zurückzugreifen. Darüber hinaus können Literaturrecherchen und Suchen in Datenbanken genutzt werden. Bei der Bestimmung der Kriterienausprägungen sollte immer darauf geachtet werden, Kontext und Systemgrenzen des Entscheidungsproblems zu berücksichtigen, damit die Alternativen vergleichbar bleiben. Neben den Recherchen sind oft eigenen Berechnungen, Modellläufe oder eigene Erhebungen nötig.

Die Kriterienausprägungen können auch mit *quantitativen Methoden* bestimmt werden, was oft mit hohem Aufwand verbunden ist. So können zur Bestimmung von ökologischen Kennzahlen Ökobilanzen erstellt werden, für die wiederum sehr viele Daten benötigt werden (vgl. z. B. Frischknecht, 2020). Darüber hinaus können Simulations- und Optimierungsmodelle verwendet werden, um z. B. technische Kriterienausprägungen zu bestimmen (vgl. z. B. Kemme, 2013). Für ökonomische Kennzahlen bietet es sich an, Methoden der statischen und dynamischen Investitionsrechnung und Kapitalwertmodelle der Betriebswirtschaftslehre zu verwenden (vgl. z. B. Thommen u. a., 2017).

Darüber hinaus können *Experteninterviews* zur Ermittlung von sowohl qualitativen als auch quantitativen Ausprägungen durchgeführt werden. Insbesondere die subjektiven Einschätzungen aus diesen Interviews, aber auch andere Werte, die mit Unsicherheiten behaftet sind, sollten im Nachgang durch Sensitivitätsanalysen untersucht werden, um die Robustheit der Ausprägung und des Ergebnisses zu überprüfen (vgl. z. B. Geldermann, 1999; Geldermann u. a., 2003). Neben den Experteninterviews können die Stakeholder des

Entscheidungsproblems zur Ermittlung von qualitativen Ausprägungen befragt werden. Dies bietet sich vor allem für Kriterien wie z. B. Akzeptanz oder Image einer Alternative an.

Rein qualitative Kriterienausprägungen müssen in quantitative Größen übertragen werden, damit diese Eingang in die MADM-Methode finden. Hierfür bieten sich eine Übertragung auf Kardinal- oder Ordinalskalen an, indem die Werte auf eine feste Skala übertragen oder als Intervalle dargestellt werden. Darüber hinaus werden linguistische Ausdrücke häufig durch Fuzzy-Zahlen beschrieben und modelliert (Inuiguchi u. a., 2016).

Nach Belton und Stewart (2002) ist der Entscheidungsprozess ein iterativer Prozess, was sich insbesondere auf die ersten Schritte bezieht. Durch eine Beteiligung des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin bei der Ermittlung des Zielsystems, der Alternativen und der Kriterienausprägungen können weitere Erkenntnisse gewonnen werden. Diese gilt es dann durch weitere Iterationen des Ablaufs zu integrieren. Beispielsweise kann bei der Ermittlung der Alternativen rückwirkend die Menge der Kriterien angepasst werden oder es wird festgestellt, dass die Kriterienausprägungen einer Alternative nicht den Anforderungen einer Alternative zur Lösung des Entscheidungsproblems entsprechen und diese Alternative entfernt wird.

### 3.4.3 Ermittlung des subjektiven Ergebnisses

Die folgenden vier Schritte im Entscheidungsprozess nach Belton und Stewart (2002) sind technischer Natur und bestehen aus der Bestimmung der Kriteriengewichtungen, der Offenlegung der Werte- und Nutzenfunktionen, der Aggregation und Visualisierung der Daten und der Durchführung von Sensitivitätsanalysen.

Bei der Bestimmung der Kriteriengewichte werden in Zusammenarbeit mit der Entscheidungsträgerin oder dem Entscheidungsträger eine subjektive Gewichtung der Kriterien bestimmt, die die Wichtigkeit der Kriterien angeben soll. Die Kriteriengewichtung wird üblicherweise im Rahmen von Workshops ermittelt. Es gibt mehrere Methoden zur Bestimmung der Gewichtung, die sich die hierarchische Struktur der Kriterien zunutze machen. Da die Kriteriengewichtung auf dem subjektiven Empfinden des Entscheidungsträgers bzw. der Entscheidungsträgerin beruhen, werden Variationen der Kriteriengewichtung oft in Sensitivitätsanalysen untersucht. Ein Überblick der Methoden zur Bestimmung der Kriteriengewichtung wird in Abschnitt 3.6.1 gegeben.

Die Offenlegung der Werte-, Nutzen und Präferenzfunktionen ist abhängig von der gewählten MADM-Methode. Je nach Methode werden verschiedene Funktionen verwendet, die abhängig vom Kontext der Entscheidung und getroffenen Annahmen sind. Ein Beispiel für eine Wertebasierte MADM-Methode ist die Nutzwertmethode (vgl. z. B. Fishburn, 1967). Nutzenfunktionen ordnen den Kriterienausprägungen einen Nutzen zu, der in Zusammenarbeit dem mit Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerin bestimmt werden muss. Nutzenfunktionen sind gewöhnlich stetige und monotone Funktionen auf den Kriterienausprägungen, die sowohl konkav als auch konvex sein können (Keeney und Raiffa, 1993). Im Gegensatz hierzu bestimmen Präferenzfunktionen für zwei Alternativen und einem Kriterium einen Präferenzwert. Präferenzfunktionen sind zweistellige Funktionen auf den Kriterienausprägungen, die die Präferenz des Entscheidungsträgers modellieren. D. h. sie

bilden die Kriterienausprägungen zweier Alternativen mit Blick auf ein Kriterium auf einen Präferenzwert ab. Hierbei stehen positive Werte für Präferenz, negative Werte für Dominanz und 0 für Indifferenz. Über die Werte-, Nutzen und Präferenzfunktionen werden zusätzliche subjektive Informationen des Entscheidungsträgers und der Entscheidungsträgerin in der Entscheidungsfindung berücksichtigt. Die Bestimmung der Funktionen und weiterer Parameter sollte auch hier in enger Abstimmung geschehen.

Bei der Aggregation der Daten und Visualisierung des Ergebnisses werden anschließend die Informationen der Entscheidungstabelle und die Kriteriengewichte durch die **MADM**-Methode aggregiert (vgl. Greco u. a., 2016). Es gibt verschiedene **MADM**-Methoden, die wiederum verschiedene Ansätze verfolgen. So verwendet **PROMETHEE** Präferenzfunktionen, um die Alternativen basierend auf paarweisen Vergleichen zu bewerten und Multi Attribute Utility Theory (**MAUT**)/**MAVT** Nutzenfunktionen. Das Ergebnis von **MADM**-Methoden ist die Bestimmung der präferierten Alternative (Greco u. a., 2016). Eine genaue Definition von **MADM**-Methoden und deren mögliche Ergebnisse wird im folgenden Abschnitt 3.5 gegeben.

#### 3.4.4 Durchführung von Sensitivitätsanalysen

Der letzte Schritt des strukturierten Ablaufs der **MCD**A ist die Analyse der Sensitivität des Ergebnisses. Da im Ablauf mehrfach subjektive Informationen in den Entscheidungsprozess eingeflossen sind, wird die Sensitivität des Ergebnisses gegenüber kleinen Veränderungen dieser Informationen überprüft. Die Sensitivitätsanalysen basieren häufig auf den charakteristischen Eigenschaften der **MADM**-Methode und analysieren den Einfluss kleiner Veränderungen der Kriteriengewichte oder der Werte-, Nutzen und Präferenzinformationen (Delgado und Sendra, 2004; Doan und Smet, 2018; Vetschera, 1986).

In der wissenschaftlichen Literatur wurden verschiedene Methoden zur Ermittlung des subjektiven Ergebnisses vorgeschlagen. Zum einen gibt es verschiedene Methoden zur Festlegung der Kriteriengewichtung, zum anderen werden verschiedene **MADM**-Methoden verwendet. **MADM**-Methoden werden im folgenden Kapitel 3.5 formal definiert. Im darauffolgenden Kapitel 3.6 werden verschiedene Methoden vorgestellt. Insbesondere wird hier die **MADM**-Methode **PROMETHEE** eingeführt, die daraufhin auch zur Portfolioerzeugung und -bewertung verwendet wird. Das Kapitel endet mit einer Darstellung der Sensitivitätsanalysen auf Basis von **PROMETHEE**.

### 3.5 FORMALE DEFINITION VON MEHRKRITERIELLEN ENTSCHEIDUNGSPROBLEMEN UND **MADM**-METHODEN

Eine **MADM**-Methode wird auf die Kriterienausprägungen einer gegebenen und endlichen Menge von Alternativen  $A$  unter einer endlichen Menge von Kriterien  $G$  angewandt. Die Kriterienausprägung einer Alternative  $a \in A$  unter einem Kriterium  $g \in G$  wird mit  $g(a)$  notiert. Die Kriterienausprägungen der Alternativen unter den Kriterien können als Entscheidungstabelle dargestellt werden, siehe Tabelle 3.1. Ein mehrkriterielles Entschei-



**Tabelle 3.1:** Entscheidungstabelle eines endlichen Entscheidungsproblems, Quelle: nach (Brans und Smet, 2016)

$a$	$g_1(\cdot)$	$g_2(\cdot)$	$\dots$	$g_j(\cdot)$	$\dots$	$g_k(\cdot)$
$a_1$	$g_1(a_1)$	$g_2(a_1)$	$\dots$	$g_j(a_1)$	$\dots$	$g_k(a_1)$
$a_2$	$g_1(a_2)$	$g_2(a_2)$	$\dots$	$g_j(a_2)$	$\dots$	$g_k(a_2)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
$a_i$	$g_1(a_i)$	$g_2(a_i)$	$\dots$	$g_j(a_i)$	$\dots$	$g_k(a_i)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
$a_n$	$g_1(a_n)$	$g_2(a_n)$	$\dots$	$g_j(a_n)$	$\dots$	$g_k(a_n)$

Entscheidungsproblem ist gegeben durch folgendes Maximierungsproblem (vgl. z. B. Brans und Smet, 2016; Mareschal und Tsaples, 2021)

$$\max\{g_1(a), \dots, g_k(a) \mid a \in A\}. \quad (3.1)$$

Ohne Beschränkung der Allgemeinheit kann man davon ausgehen, dass alle Kriterien maximiert werden müssen. Im anderen Fall, d. h. falls Kriterium  $g \in G$  minimiert werden soll, ist äquivalent stattdessen  $-g$  zu maximieren. Der Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerin möchte eine Alternative bestimmen, die alle Kriterien maximiert. Existiert eine solche Alternative, ist das Entscheidungsproblem schnell zu lösen. Im allgemeinen Fall und insbesondere bei praxisnahen Probleminstanzen gibt es selten eine Alternative, die alle Kriterien maximiert. Das Problem in Formel (3.1) ist aus mathematischer Sicht schlecht gestellt und nicht ohne weitere Informationen lösbar. Das Ziel von MADM-Methoden ist es nun, die Alternativen des Entscheidungsproblems in eine Rangfolge zu bringen, sodass eine Alternative identifiziert werden kann, die das Problem hinreichend gut löst (vgl. z. B. Brans und Smet, 2016).

Für die formale Definition einer Rangfolge, d. h. einer Ordnungsrelation auf einer Menge an Alternativen wird zunächst die Definition einer zweistelligen (binären) Relation benötigt. Für eine endliche Menge  $A$  ist eine zweistellige Relation  $R$  definiert als Teilmenge des kartesischen Produkts  $A \times A$ , d. h. eine Menge an geordneten Tupeln  $(a, b)$  mit  $a, b \in A$ :  $R \subset A \times A$ . In der aktuellen Literatur werden verschiedene Notationen für ein Tupel  $(a, b) \in R$  verwendet (vgl. Moretti u. a., 2016):

$$(a, b) \in R, \quad aRb, \quad R(a, b).$$

Im Kontext der Entscheidungsunterstützung ist die Notation  $aRb$ : „ $a$  steht in Relation zu  $b$ “ geeignet und wird im Folgenden weiter verwendet. Eine Relation kann verschiedene Eigenschaften besitzen. Eine Relation heißt

reflexiv,	falls $aRa, \forall a \in A$
irreflexiv,	falls nicht $aRa, \forall a \in A$
symmetrisch,	falls $aRb \rightarrow bRa, \forall a, b \in A$
antisymmetrisch,	falls $(aRb, bRa) \rightarrow a = b \quad \forall a, b \in A$
asymmetrisch,	falls $aRb \rightarrow$ nicht $bRa \quad \forall a, b \in A$
vollständig,	falls $(aRb \text{ oder } bRa), \forall a \neq b \in A$ und
transitiv,	falls $(aRb \text{ und } bRc) \rightarrow aRc, \forall a, b, c \in A.$

Ein bekanntes Beispiel für eine Relation ist die Äquivalenzrelation: Eine Äquivalenzrelation ist eine zweistellige Relation, die reflexiv, symmetrisch und transitiv ist. In Veröffentlichungen zur Entscheidungstheorie werden Ordnungsrelationen über Präferenzordnungen auf Mengen definiert (vgl. z. B. Brans und Smet, 2016; Moretti u. a., 2016). Eine Präferenzordnung ist eine Menge von zweistelligen Relationen auf einer Menge  $A$ , so dass

- für jedes Tupel  $(a, b) \in A$  mindestens eine Relation gilt
- für jedes Tupel  $(a, b) \in A$  gilt: falls eine Relation erfüllt ist, kann keine weitere Relation erfüllt sein. (Moretti u. a., 2016)

Die charakteristische Eigenschaft einer Präferenzordnung ist also, dass zwei Elemente der zugrundeliegenden Menge immer miteinander in Relation stehen.

Eine totale Ordnung auf einer Menge  $A$  kann nun wie folgt definiert werden. Sei  $R$  eine zweistellige Relation auf  $A$ , die als Präferenzordnung der Form  $R = P \cup I$  dargestellt werden kann. Dann sind folgende Aussagen äquivalent (Moretti u. a., 2016):

- $R$  ist eine totale Ordnung.
- $R$  ist reflexiv, antisymmetrisch, vollständig und transitiv
- $\left\{ \begin{array}{l} I = \{(a, a), \forall a \in A\} \\ P \text{ ist transitiv} \\ P \cup I \text{ ist reflexiv und vollständig} \end{array} \right.$

Eine totale Ordnung auf einer Menge von Elementen  $A$  erlaubt es also, diese Elemente in eine Rangfolge zu bringen. Aus Sicht der Entscheidungsunterstützung spiegelt  $P$  die Präferenzen des Entscheidungsträgers wider und  $I$  die Indifferenzen, die sich hier nur auf identische Elemente bezieht.

Die Entscheidungsträgerin oder der Entscheidungsträger hat bei den klassischen Präferenzordnungen die Möglichkeit, alle Alternativen miteinander zu vergleichen. Hierbei gilt für zwei Alternativen  $a, b \in A$  entweder  $aPb$ ,  $bPa$  oder  $aIb$ , d. h. von zwei Alternativen wird entweder eine präferiert oder es gilt Indifferenz. In einigen Situationen ist es aufgrund

fehlender Daten, Unsicherheit oder konfligierender Präferenzen nicht möglich, zwei Alternativen miteinander zu vergleichen. Um diese Situationen in der Entscheidungstheorie abzubilden, wird zunächst die partielle Ordnung (Halbordnung) und anschließend die Quasiordnung definiert.

Sei  $R$  eine zweistellige Relation auf  $A$ , die als Präferenzordnung der Form  $R = P \cup I \cup J$  dargestellt werden kann. Folgende Aussagen sind dann äquivalent (Moretti u. a., 2016):

- $R$  ist eine partielle Ordnung.
- $R$  ist reflexiv, antisymmetrisch und transitiv.
- $\left\{ \begin{array}{l} P \text{ ist asymmetrisch und transitiv} \\ I \text{ ist reflexiv und symmetrisch} \\ J \text{ ist irreflexiv und symmetrisch} \\ I = \{(a, a), \forall a \in A\} \end{array} \right.$

Analog zu der obigen Definition beschreiben die Relationen  $P$  und  $I$  die Präferenzen und Indifferenzen. Die Relation  $J$  beschreibt die Unvergleichbarkeiten.

Sei  $R$  eine zweistellige Relation auf  $A$ , die als Präferenzordnung der Form  $R = P \cup I \cup J$  dargestellt werden kann. Folgende Aussagen sind dann äquivalent (Moretti u. a., 2016):

- $R$  ist eine Quasiordnung oder partielle Präordnung.
- $R$  ist reflexiv und transitiv.
- $\left\{ \begin{array}{l} P \text{ ist asymmetrisch und transitiv} \\ I \text{ ist reflexiv, symmetrisch und transitiv} \\ J \text{ ist irreflexiv und symmetrisch} \\ (P \circ I \cup I \circ P) \subset P \end{array} \right.$

Hierbei bezeichnet  $R \circ S$  das Produkt zweier Relationen  $R$  und  $S$  auf einer Menge  $A$ , das wie folgt definiert ist (Schmidt und Ströhlein, 1989, S. 13):

$$R \circ S = \{(x, z) \in A \times A \mid \exists y \in A : (x, y) \in R \wedge (y, z) \in S\}$$

Eine Quasiordnung ist eine reflexive und transitive Relation auf einer gegebenen Menge. Im Unterschied zur partiellen Ordnung ist sie nicht mehr zwangsläufig antisymmetrisch. Quasiordnungen werden häufig zur Beschreibung von Präferenzen verwendet, wenn diese Unvergleichbarkeiten von Alternativen berücksichtigen sollen. Insbesondere im Fall von Outranking-Verfahren (vgl. Abschnitt 3.6.3) ist das Ergebnis häufig eine Quasiordnung der Alternativen.

Eine kanonische Ordnungsrelation für das in Gleichung 3.1 definierte Entscheidungsproblem kann wie folgt definiert werden (Brans und Smet, 2016): Für zwei Alternativen  $a, b \in A$  gilt

$$\begin{cases} \forall j : g_j(a) \geq g_j(b) \\ \exists k : g_k(a) > g_k(b) \end{cases} \iff aPb, \\ \forall j : g_j(a) = g_j(b) \iff aIb, \\ \begin{cases} \exists s : g_s(a) > g_s(b) \\ \exists r : g_r(a) < g_r(b) \end{cases} \iff aJb. \end{cases} \quad (3.2)$$

Hier ist eine Alternative  $a$  *besser* als eine andere Alternative  $b$ , d. h.  $aPb$ , falls sie unter einem Kriterium eine höhere Ausprägung hat und sonst mindestens gleich gut ist. In diesem Fall spricht man auch von Dominanz. Falls die Kriterienausprägungen zweier Alternativen identisch sind, gilt Indifferenz. Falls eine Alternative unter einem Kriterium besser abschneidet und unter einem anderen schlechter, ist es nicht möglich zu sagen, welche Alternative besser ist. Die beiden Alternativen sind unvergleichbar ( $aRb$ ). Die in Gleichung 3.2 definierte Ordnung ist eine Quasiordnung auf der Menge der Alternativen.

Im Allgemeinen gilt, dass Alternativen, die nicht von anderen dominiert werden, *effizient* heißen. Typische Entscheidungsprobleme bestehen zum Großteil aus effizienten oder unvergleichbaren Alternativen. Entscheidungsprobleme, wie sie am Anfang des Abschnittes in Gleichung 3.1 definiert wurden, sind daher oft nicht lösbar und aus mathematischer Sicht schlecht gestellt. Zum Lösen dieser Probleme werden zusätzliche Informationen in Form von Trade-Offs zwischen Kriterien, Nutzenfunktionen, Kriteriengewichtungen, Präferenzfunktionen und -relationen oder Schwellenwerte benötigt (vgl. Brans und Smet, 2016). Diese Informationen werden im Rahmen der MCDA in Zusammenarbeit mit dem Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerin erarbeitet. Je nach verwendeter MADM-Methode werden verschiedene weitere Informationen benötigt. MADM-Methoden, die über die Entscheidungstabelle hinaus weitere Informationen berücksichtigen und auswerten, werden im folgenden Abschnitt 3.6 vorgestellt.

### 3.6 MADM-METHODEN ZUR AGGREGATION EINER ENTSCHEIDUNGSTABELLE

Beim strukturierten Ablauf der mehrkriteriellen Entscheidungsunterstützung werden in der wissenschaftlichen Literatur verschiedene Methoden vorgeschlagen, um die Entscheidungstabelle zu aggregieren. Allgemein werden diese Methoden in die amerikanische Schule bzw. klassische MADM-Methoden und die europäische Schule bzw. Outranking-Verfahren, eingeteilt. Viele dieser Methoden verwenden zur Aggregation als weitere Information eine Gewichtung der verwendeten Kriterien. Im Folgenden werden zunächst Methoden vorgestellt, mit denen man in Zusammenarbeit mit dem Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerin die Gewichtung bestimmen kann. Danach wird in Abschnitt 3.6.2

ein Überblick über klassische Verfahren und in Abschnitt 3.6.3 über Outranking-Verfahren gegeben. Im Anschluss folgt ein Überblick der MADM-Methode PROMETHEE.

### 3.6.1 Methoden zur Bestimmung der Kriteriengewichte für MADM-Verfahren

Die genaue Bedeutung und Aussage der Kriteriengewichte hängt von der Aufbereitung des Entscheidungsproblems und der verwendeten MCDA-Methode ab. Für MCDA-Modelle ist die Kriteriengewichtung ein allgemeiner Begriff, der die subjektive Wichtigkeit eines Kriteriums für die Entscheidungsträgerin oder den Entscheidungsträger ausdrückt (Almeida Filho u. a., 2018; Almeida u. a., 2016; Choo u. a., 1999; Roy und Mousseau, 1996). In der wissenschaftlichen Literatur zur Entscheidungsunterstützung werden verschiedene Ansätze und Methoden vorgeschlagen, die Kriteriengewichtung eines Entscheidungsproblems zu bestimmen. Die Methoden können in direkte und indirekte Methoden eingeteilt werden. Bei den direkten Methoden werden die Kriteriengewichte zusammen mit dem Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerin, z. B. durch direkte Zuweisung von Gewichten oder Bilden einer Rangfolge, bestimmt. Bei den indirekten Methoden werden die Gewichte indirekt über (partielle) Präferenzinformationen zwischen Alternativen bestimmt. Das Vorgehen bei letzteren ist stark abhängig von der verwendeten MCDA-Methode.

Ein *direkter* Ansatz, der mit sehr geringem Aufwand verbunden ist, ist die Gleichgewichtung der Kriterien. Der Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerin muss nur bestimmen, ob ein Kriterium für das Entscheidungsproblem von Bedeutung ist. Ansonsten gibt es keine weiteren Informationen zur Priorität (Dawes und Corrigan, 1974; Jia u. a., 1998). Alle Kriterien erhalten dann ein Gewicht von

$$w_j = \frac{1}{k}, \quad j = 1, \dots, k, \quad (3.3)$$

wobei  $k$  die Anzahl der Kriterien ist. Eine Gleichgewichtung der Kriterien ist in den meisten Fällen von MCDA-Problemen nicht sinnvoll, da die relative Bedeutung der Kriterien für den Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerin nicht berücksichtigt wird. Das Einbeziehen der subjektiven Präferenz entfällt hier nahezu vollständig.

Eine Methode zur Bestimmung der Kriteriengewichtung auf Basis von einfachen Präferenzinformationen ist die *Rank-Sum-Methode*<sup>2</sup> (Stillwell u. a., 1981). Der Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerin weist jedem Kriterium einen Rang zu, der dann in eine normalisierte Kriteriengewichtung umgerechnet wird. Hierbei erhält das wichtigste Kriterium als Gewichtung den Quotienten aus *der Anzahl der Kriterien der Anzahl der Ränge* und das unwichtigste Kriterium als Gewichtung den Quotienten *eins und der Anzahl der Ränge*. Allgemein wird die Gewichtung durch folgende Gleichung bestimmt (Almeida Filho u. a., 2018):

$$w_j = \frac{2(k+1-r(j))}{k(k+1)}, \quad j = 1, \dots, k,$$

wobei  $r(j)$  der Rang von Kriterium  $j$  ist.

<sup>2</sup> Englisch für Rangsumme. Es werden die Summe der Rangplätze der Kriterien für eine Gewichtung verwendet.

Eine weitere Methode ist die *Simos-Methode*<sup>3</sup>, die auf einem ähnlichen Prinzip beruht (Simos, 1990). Die Methode wird bei vielen MCDA-Problemen bei Outranking-Verfahren angewandt (Siskos und Tsotsolas, 2015). Bei der Simos-Methode wird jedes Kriterium durch eine Karte repräsentiert, die der Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerin in aufsteigender Form in eine Rangfolge ordnet. Jedes Kriterium erhält so einen Rang  $i$ . Im Vergleich zur oben genannten Methode können sich hier zwei Kriterien auch einen Rang teilen. Falls sich zwei Kriterien auf benachbarten Rängen in ihrer Bedeutung stark unterscheiden, können weiße Karten als Lücke zwischen diesen Kriterien platziert werden. Darüber hinaus muss die Entscheidungsträgerin oder der Entscheidungsträger einen Faktor  $f$  angeben, der ausdrückt, wie sich seiner oder ihrer Meinung nach das wichtigste zum unwichtigsten Kriterium verhält. Eine Kriteriengewichtung wird dann über folgende Formel bestimmt:

$$w_j = 1 + (f - 1) \cdot \frac{r(j) - 1}{k - 1}, \quad j = 1, \dots, k, \quad (3.4)$$

wobei  $r(j)$  der Rang von Kriterium  $j$  ist. In der *revised Simos-Methode*, die von Figueira und Roy (2002) vorgeschlagen wird, können weitere Präferenzinformationen bei der Kriteriengewichtung berücksichtigt werden. Es gilt zu beachten, dass die Gewichtung der Kriterien, wenn sie aus einer Rangfolge abgeleitet wird, nicht eindeutig ist. Die konvexe Hülle der durch die Simos-Methode aufgespannten möglichen Kriteriengewichte wird von Siskos und Tsotsolas (2015) untersucht und als weitere Sensitivitätsanalyse bei MCDA-Methoden vorgeschlagen.

Zu den weiteren Methoden, bei denen die Kriteriengewichtung direkt bestimmt wird, gehört die Methode zur Bestimmung der zentralisierten Gewichte von Solymosi und Dombi (1986), bei der die Gewichtung über einen Vergleich der Kriterien berechnet wird. Bei der DIVAPIME-Methode (Mousseau, 1995) wird durch paarweisen Vergleich fiktiver Alternativen für jedes Kriterium ein Intervall bestimmt, das die Wichtigkeit beschreibt. Bei Analytic Hierarchy Process (AHP) von Saaty (1987) wird die Kriteriengewichtung über einen paarweisen Vergleich auf Basis einer vorgegebenen Skala von 1 bis 9 bestimmt.

Zu den indirekten Methoden gehören der Ansatz von Robust Ordinal Regression (ROR), der zuerst auf die Klasse der Utilité Additive (UTA)-Methoden angewendet wurde (Jacquet-Lagrange und Siskos, 1982). Die UTA-Methoden können als eine Verallgemeinerung von MAUT angesehen werden, bei denen die linearen Wertefunktionen auf stückweise lineare Funktionen verallgemeinert werden. Bei der ROR werden nun, mithilfe von gegebene Informationen zur Ordnungsrelation der Alternativen, eine Kriteriengewichtung und weitere Parameter der verwendeten MCDA-Methode bestimmt (Greco u. a., 2008; Kadziński u. a., 2012b). Die Idee hierbei ist, dass es Entscheidungsträgern und Entscheidungsträgerinnen oft einfacher fällt, die Beziehung einzelner Alternativen untereinander anzugeben, als die Kriterien zu gewichten. Darüber hinaus werden insgesamt weniger Informationen benötigt (Lolli u. a., 2019). ROR-Ansätze wurden für viele gängige MCDA-Methoden entwickelt. So z. B. für ÉLimination et Choix Traduisant la REalité (ELECTRE) von Greco u. a. (2011) und für PROMETHEE von Kadziński u. a. (2012a).

<sup>3</sup> Die Simos-Methode ist benannt nach Jean Simos, der diese Methode zur Bestimmung der Kriteriengewichtung in seiner Dissertation veröffentlicht hat.

Als weiterer indirekter Ansatz gilt die Stochastic Multiobjective Acceptability Analysis (SMAA), bei der die Parameter des Entscheidungsmodells stochastisch modelliert und bestimmt werden. Hierzu werden Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Parameter definiert, unter der Voraussetzung, dass sie mit den Präferenzinformationen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin übereinstimmen (Lahdelma u. a., 1998; Lolli u. a., 2019). Mithilfe der SMAA kann nun, ähnlich zu ROR, eine Kriteriengewichtung bestimmt werden. SMAA wurde weitestgehend auf Outranking-Verfahren angewendet. Insbesondere auf PROMETHEE in (Corrente u. a., 2014) und ELECTRE in (Hokkanen u. a., 1998).

Die Informationen, die der Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerin bereitstellen muss für die direkten bzw. indirekten Methoden zur Bestimmung der Kriteriengewichte sind sehr unterschiedlich. Bei den indirekten Methoden muss der Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerin Präferenzen bzgl. der Alternativen angeben, aus denen dann die Kriteriengewichtung bestimmt wird. Dies ist in vielen praktischen Anwendungen kognitiv herausfordernd und daher nur selten möglich. Üblicherweise fällt es Entscheidungsträgern und Entscheidungsträgerinnen einfacher, die Kriterien direkt durch eine der genannten Methoden zu gewichten. Besonders intuitiv ist hierbei die Simos-Methode aufgrund der anschaulichen Anordnung der Kriterienkarten (vgl. z. B. Siskos und Tsotsolas, 2015).

### 3.6.2 Klassische Verfahren

Den klassischen MCDA-Methoden liegt zugrunde, dass der Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerin seine oder ihre Präferenzen in Form einer Nutzenfunktion  $u$  angeben kann. Diese Nutzenfunktion weist jeder Kriterienausprägung der Entscheidungstabelle einen Nutzwert zu, der anschließend zu einem Gesamtnutzen aggregiert wird. Dies kann durch gewichtete additive oder multiplikative Funktionen geschehen. Grundlegend für diese Verfahren ist, dass die Entscheidungsträgerin oder der Entscheidungsträger die Präferenzen exakt angeben und kommunizieren kann (Guitouni und Martel, 1998).

Eine der oft verwendeten klassischen MCDA-Methoden ist die Klasse der MAUT/MAVT-Verfahren, die zu den additiven Verfahren gehören. Für die Anwendung von MAUT/MAVT auf eine Entscheidungstabelle müssen weitere Voraussetzungen erfüllt sein. So müssen die Kriterien untereinander die Substituierbarkeitseigenschaft aufweisen, d. h. eine wertmäßige Änderung einer Kriterienausprägung kann durch eine entsprechende Änderung einer anderen Kriterienausprägung kompensiert werden. Des Weiteren muss die Präferenzunabhängigkeit erfüllt sein. Der Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerin muss seine bzw. ihre Präferenz bzgl. einer Kriterienausprägung angeben können, ohne die Kriterienausprägungen der anderen Kriterien zu kennen (Schneeweiß, 1991, S. 129f).

Für die Methoden MAVT/MAUT werden zusätzlich zu der Entscheidungstabelle 3.1 Gewichtungen  $w_j \geq 0$ ,  $j \in G$  mit  $\sum_{j=1}^k w_j = 1$  für die Kriterien benötigt. Eine Alternative wird dann durch die gewichtete Summe der Kriterienausprägungen bewertet (Keeney und Raiffa, 1976):

$$V(a) = \sum_{j=1}^k w_j g_j(a), \quad (3.5)$$

wobei hier  $g(a)$  die normalisierte Kriterienausprägung der Alternative  $a$  unter dem Kriterium  $g$  bezeichnet, d. h.  $g(a) := u(g(a))$ . Allgemein gilt, je höher eine Alternative bewertet wird, desto besser ist sie. Man kann nun eine Ordnungsrelation wie folgt definieren:  $aPb \iff V(a) > V(b)$  und  $aIb \iff V(a) = V(b)$ . Das Vorgehen besteht aus zwei einfachen Schritten (Munda, 2016):

1. Standardisierung der Kriterienausprägung, um eine Aggregation ohne Skaleneffekte zu ermöglichen und
2. gewichtete Summation der Kriterienausprägungen.

Die Methodenfamilie von MAVT/MAUT beruht auf einem umfangreichen axiomatischen Grundgerüst, das hier nur tangiert wurde. Eine umfassende Einführung ist z. B. in Keeney und Raiffa (1976) und Schneeweiß (1991) oder Dyer (2016) dargestellt. Neben dieser oft als vorteilhaft angeführten Eigenschaft werden diese Methoden auch kritisch gesehen (Dyer, 2016). So wird von Kahneman und Tversky (2013) angeführt, dass die obigen Annahmen unter Risiko oft verletzt werden. Darüber hinaus ist die Präferenzunabhängigkeit eine Forderung, die viele Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen nicht erfüllen können (Stewart, 1995; Winterfeldt und Edwards, 1993). Nach Munda (2016) ist die Kompensation zwischen den Kriterien im Rahmen von Entscheidungen mit ökologischen Kriterien oder zur Definition von Indizes nicht sinnvoll und zu vermeiden.

Die Kriteriengewichte werden für MAVT/MAUT mithilfe der Trade-Off-Methode bestimmt. Die Kriteriengewichtung gibt also, ganz im Sinn der Substitutierbarkeit, die Substitutionsraten zwischen den Kriterien wieder. Wie oben bereits beschrieben, können so Kriterienausprägungen gegeneinander ausgeglichen werden (Belton und Stewart, 2002; Keeney und Raiffa, 1976; Schneeweiß, 1991). Man spricht hier auch von der Kompensationseigenschaft von MADM-Methoden.

Die *Kompensation* bei MCDA-Methoden wird in der Literatur nicht formal definiert, sondern wie folgt charakterisiert (Gervásio und Simões da Silva, 2012; Guitouni und Martel, 1998): Eine MCDA-Methode ist

- kompensierend, falls es vollständige Kompensationen zwischen den Kriterien eines Problems geben kann. Eine vorteilhafte Kriterienausprägung unter einem Kriterium kann somit eine *schlechte* Kriterienausprägung eines anderen Kriteriums ausgleichen.
- nicht-kompensierend, falls keine Kompensation zwischen den verschiedenen Kriterien möglich ist. In diesem Fall werden die Kriterien als so wichtig erachtet, dass jede Art von Ausgleich nicht möglich ist.
- teilweise kompensierend, falls in bestimmten Fällen eine Kompensation zu einem bestimmten Grad auftreten kann.

Die klassischen Methoden erlauben die direkte Kompensation der Kriterienausprägungen untereinander, was dazu führt, dass die Kriteriengewichte hier als Trade-Off-Faktoren zwischen den Kriterien betrachtet werden müssen (Keeney u. a., 1979). Munda (2005) argumentiert, dass die Kriteriengewichtung der klassischen Verfahren immer im Sinn eines Trade-Offs zu verstehen ist. Die Annahme, über die Kriteriengewichte die Präferenzen des



Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin und damit die Bedeutung des Kriteriums anzugeben, abzubilden, treffe hier nicht zu und führe zu methodischen Inkonsistenzen. Bei der Bestimmung der Kriterienausprägungen muss die Trade-Off-Eigenschaft der Kriteriengewichte dem Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerin vorab vermittelt werden.

Weiterhin wird von Munda (2016) die lineare Aggregation bei den klassischen Verfahren kritisch gesehen. Zum einen können durch Skalierung der Kriterienausprägungen fehlerhafte Verrechnungen von Einheiten stattfinden, z. B. werden Beträge in € und Emissionen in CO<sub>2</sub>e addiert, zum anderen verfälschen Kompensationseffekte der linearen Aggregation das Ergebnis (Munda, 2016). Diese Eigenschaften werden häufig unter Informationsverlust dieser Methoden diskutiert (Geldermann und Lerche, 2014).

Besondere Beachtung benötigt die Standardisierung der Kriterienausprägung. Eine einfache Standardisierung kann eine willkürlich scheinende Verrechnung der Kriterien nach sich ziehen. Insbesondere die folgenden Schritte sollten genau überlegt werden (Nardo und Saisana, 2008):

- Die Normalisierung sollte die Einheiten der Kriterien berücksichtigen.
- Die Skalierung der Kriterien sollte berücksichtigt werden;
- Eine gemeinsame Einheit (z. B. Währungen, Energie, Wohnraum, etc.) sollte verwendet werden.

Vor allem im Kontext der Nachhaltigkeit bei ökologischen Kriterien ist die Forderung der Unabhängigkeit der Kriterien oft nicht gegeben. Insbesondere bei den ökologischen Kriterien gibt es Synergieeffekte. So haben im Kontext der Bewertung von Umweltwirkungen Experimente u. a. gezeigt, dass die kombinierte Wirkung der versauernden Stoffe SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> und O<sub>3</sub> auf das Pflanzenwachstum wesentlich schwerwiegender ist als die (lineare) Addition der Wirkungen jedes einzelnen dieser Stoffe (Dietz und van der Straaten, 1992).

Bei vielen MCDA-Problemen ist die Kompensation zwischen den Kriterien nicht problematisch und sogar explizit erwünscht. Im Kontext des Nachhaltigkeitsmanagements von Unternehmen und insbesondere aus ökologischer Sicht sollte die MCDA-Methode jedoch keine oder nur teilweise Kompensation erlauben (Gervásio und Simões da Silva, 2012; Munda, 2016).

### 3.6.3 Outranking-Verfahren

Die Outranking-Verfahren entstanden aus der Kritik an den klassischen Verfahren und werden auch als europäische Schule der MADM-Methoden bezeichnet (Roy und Vanderpooten, 1996). Prominente Vertreter dieser Verfahren sind PROMETHEE von Brans und Vincke (1985), ELECTRE von Roy (1972), PAPRIKA von Hansen und Ombler (2008) und die BEST-WORST-METHOD von Rezaei (2015).

Die Outranking-Verfahren unterscheiden sich von den klassischen Verfahren, weil sie keine zugrundeliegende Wertefunktion verwenden. Das Ergebnis der Outranking-Verfahren ist somit keine direkte Bewertung der Alternativen, wie sie durch die gewichtete Summe bei MAVT/MAUT berechnet wird, sondern eine sogenannte Outranking-Relation. Eine

Alternative  $a$  ist hier *besser* als eine Alternative  $b$ , falls man unter Berücksichtigung aller Informationen und Präferenzinformationen sagen kann, dass  $a$  mindestens so gut ist wie  $b$  und es umgekehrt keine Hinweise gibt, dass  $b$  besser ist als  $a$  (vgl. z. B. Belton und Stewart, 2002; Roy, 1972, S. 233f).

Diese Charakterisierung der Outranking-Verfahren unterscheidet sich grundlegend von den klassischen Verfahren und bietet einige Vorteile. So beruhen, gemäß der Definition, die Outranking-Verfahren auf einem paarweisen Vergleich der Alternativen. Über sogenannte Präferenzfunktionen werden die individuellen Präferenzen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin darüber hinaus in der Bewertung der Alternativen betrachtet. Dies erlaubt es, auch schwache Präferenz und Unvergleichbarkeit darzustellen. Insgesamt werden bei der Verwendung von Outranking-Verfahren nicht so viele Anforderungen an die Entscheidungsträgerin oder den Entscheidungsträger gestellt. Die Methoden basieren auf der Annahme, dass er oder sie nicht eindeutig seine oder ihre Präferenzen kommunizieren kann. Aufgrund des paarweisen Vergleichs der Alternativen können auch widersprüchliche Informationen in den Kriterienausprägungen und den Präferenzinformationen berücksichtigt und abgebildet werden.

### 3.6.4 Die MADM-Methoden PROMETHEE

Die PROMETHEE-Methoden wurden von Brans und Vincke (1985) veröffentlicht. Sie gehört zu den klassischen Outranking-Verfahren der mehrkriteriellen Entscheidungsunterstützungsverfahren (Greco u. a., 2016). Die Methodenfamilie von PROMETHEE besteht aus PROMETHEE I bis PROMETHEE VI. PROMETHEE I stellt eine partielle Ordnung der Alternativen anhand einer Entscheidungstabelle und weiteren Parametern auf und PROMETHEE II erweitert dieses Vorgehen um eine vollständige Ordnung (Brans und Smet, 2016). PROMETHEE III ermöglicht eine Bewertung von Alternativen und das Aufstellen einer Ordnung, für den Fall, dass die Kriterienausprägungen in Form von Intervallen vorliegen (vgl. z. B. Cavalcante und Almeida, 2007). Entscheidungsprobleme, bei denen die Alternativen nicht in diskreter Form gegeben sind, können mithilfe von PROMETHEE IV gelöst werden (Bozorg-Haddad u. a., 2021, S. 120f). PROMETHEE V verwendet die Bewertung auf Basis von PROMETHEE II, um eine Menge von Alternativen unter verschiedenen Einschränkungen auszuwählen (Brans und Smet, 2016). PROMETHEE VI oder auch die Geometrical Analysis for Interactive Assistance (GAIA)-Ebene bietet eine grafische Repräsentation des Entscheidungsproblems und eine Möglichkeit zur Sensitivitätsanalyse für PROMETHEE II, bei der grafisch die Abhängigkeiten der Kriterien untereinander und die Beziehungen zwischen den Kriterien und Alternativen analysiert werden kann. Nachfolgend wird das Vorgehen von PROMETHEE I, PROMETHEE II, PROMETHEE IV und PROMETHEE V erläutert, da diese die Grundlage der Methoden zur Portfolioerzeugung in Kapitel 3.8 bilden.

#### 3.6.4.1 PROMETHEE I

Die Methodenfamilie PROMETHEE wird, wie andere MADM-Methoden auch, auf eine Entscheidungstabelle (s. Tabelle 3.1), d. h. auf die Kriterienausprägungen einer endlichen Menge von Alternativen  $a \in A$  auf eine endliche Anzahl von Kriterien  $g_j \in G$  angewendet. Wei-

terhin werden für jedes Kriterium  $g_j \in G$  eine Gewichtung  $w_j \geq 0$ , eine Präferenzfunktion  $P_j$  sowie deren Präferenzfunktionsparameter benötigt. Über die Präferenzfunktionen ist es möglich, die Präferenzen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin abzubilden. Eine Präferenzfunktion ist eine monotone Funktion von  $d_j(a, b) = g_j(a) - g_j(b)$  und bestimmt einen normierte Präferenzindikator zwischen zwei Alternativen bzgl. eines Kriteriums. Durch die Normierung auf das Intervall  $[0, 1]$  verliert der Indikator die Einheit<sup>4</sup>.

Der erste Schritt in PROMETHEE I besteht in der Bestimmung aller Präferenzindikatoren:

$$p_j(a, b) = P_j(d_j(a, b)) = P_j(g_j(a) - g_j(b)) \quad \forall a, b \in A, g_j \in G. \quad (3.6)$$

Je nachdem, welche Präferenzfunktion für ein Kriterium gewählt wird, werden auch die Präferenzfunktionsparameter für Indifferenz und strikte Präferenz benötigt. Mit den Präferenzfunktionsparameter kann in Präferenzfunktionen Indifferenz, schwache Präferenz oder Präferenz zwischen Alternativen dargestellt werden. Dies ermöglicht eine genaue Modellierung der Präferenzen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin.

Abbildung 3.5 zeigt die lineare Präferenzfunktion mit Indifferenzbereich. Für ein Kriterium mit dieser Präferenzfunktion gilt: Ist die Differenz  $d_j(a, b)$  zweier Alternativen in Bezug auf ein Kriterium kleiner als der Indifferenzschwellenwert  $q$ , hat der entsprechende Präferenzindikator den Wert 0. Das bedeutet, dass die Differenz zwischen zwei Alternativen in Bezug auf ein Kriterium von dem Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerin als unbedeutend angesehen wird (Brans und Smet, 2016). Liegt die Differenz zwischen  $q$  und  $p$ , steigt der Präferenzindikator linear mit der Differenz. Liegt die Differenz über dem Schwellenwert  $p$ , hat der Präferenzindikator den Wert 1 und die Alternative  $a$  wird der Alternative  $b$  strikt bevorzugt.

Auch andere Präferenzfunktionen können verschiedene Grade der Präferenz mithilfe von schwacher Präferenz darstellen, d. h. der Präferenzindikator liegt dann im Intervall  $[0, 1]$ . Tabelle 3.2 zeigt die sechs Arten von Präferenzfunktionen mit deren Parametern, die von Brans und Smet (2016) vorgeschlagen werden. Darüber hinaus gab es in den letzten Jahren mehrere Vorschläge in der Literatur, die Menge der Präferenzfunktionen für spezielle Anwendungen zu erweitern (z. B. Nassereddine u. a., 2019).

Die Präferenzfunktion eines Kriteriums sowie die Wahl der entsprechenden Parameter haben einen großen Einfluss auf die Bewertung der Alternativen und sollten eng mit dem Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerin abgestimmt werden (Abdullah u. a., 2019; Geldermann u. a., 2003).

Bei der Wahl der Präferenzfunktionen zeigt sich ein Vorteil der Methodenfamilie. Die Wahl kann durch einfache Fragen an den Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerin erfolgen. Für ein fiktives Kriterium „Kosten“ kann die erste Frage z. B. lauten: „Spielt ein Kostenunterschied von 500 € bei der Wahl der Alternativen eine Rolle?“ Je nach Antwort (ja, nein, weiß nicht) kann entsprechend weitergefragt werden. Auf der anderen Seite muss der Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerin in der Lage sein, die Differenz zweier Kriterienausprägungen zu bewerten (Keyser und Peeters, 1996). Eine Bewertung der Differenz von Kriterienausprägungen ist zum Beispiel bei Ordinalskalen und insbesondere

<sup>4</sup> Gemeint sind hier die Einheiten der Kriterien. Da Outranking-Verfahren sowohl mit quantitativen Werten, als auch mit qualitativen Werten umgehen können, können die Einheiten der Kriterien sehr unterschiedlich sein.

Tabelle 3.2: Überblick der Präferenzfunktionen in PROMETHEE. Quelle: eigene Darstellung nach (Brans und Smet, 2016)

Name	Graph	Definition	Parameter
Typ 1: Gewöhnliches Kriterium		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 & d > 0 \end{cases}$	keine
Typ 2: Gewöhnliches Kriterium mit Indifferenzbereich		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ 1 & d > q \end{cases}$	q
Typ 3: Kriterium mit linearer Präferenz		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ \frac{d}{p} & 0 \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p
Typ 4: Stufenkriterium		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{1}{2} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q
Typ 5: Kriterium mit linearer Präferenz und Indifferenz		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q
Typ 6: Gauß'sches Kriterium		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}} & d > 0 \end{cases}$	σ

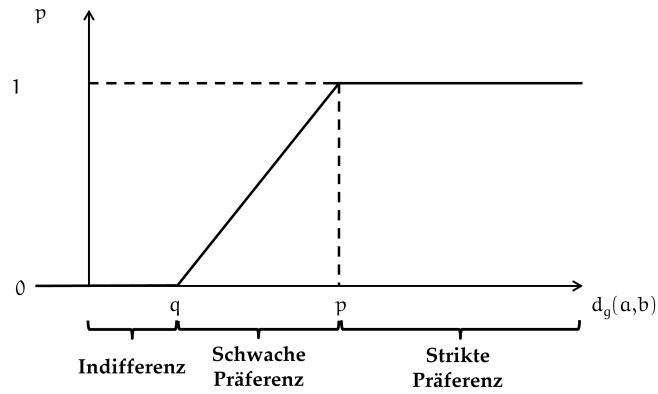


Abbildung 3.5: Lineare Präferenzfunktion mit Indifferenzbereich, Quelle: Eigene Darstellung nach (Brans und Smet, 2016)

bei verbalen Skalen nicht gegeben. Zum Beispiel ist auf einer Skala „gut-mittel-schlecht“ die Differenz von „gut“ und „mittel“ nicht ohne Weiteres darstellbar. Die Skala muss zunächst in numerische Werte übertragen werden, was zu Verfälschungen in den Bewertungen führen kann. Dieser Umstand muss bei der Wahl der Präferenzfunktion, der Kriterien und letztendlich bei der Wahl der MADM-Methode berücksichtigt werden.

Der zweite Schritt in PROMETHEE I besteht in einer ersten Aggregation der Präferenzindikatoren. Die Präferenzindikatoren, als normierte und einheitslose Bewertungen zweier Alternativen pro Kriterium, können nun so aggregiert werden, dass sie die Präferenz zwischen zwei Alternativen angeben. Bei PROMETHEE wird dies durch einfache Summation erreicht (Brans und Smet, 2016):

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^k P_j(a, b)w_j \quad \forall a, b \in A. \quad (3.7)$$

Der Präferenzindex  $\pi_{ab}$  ist die mit den Kriteriengewichten gewichtete Summe der Präferenzindikatoren und liegt somit im Intervall  $[0, 1]$ . Er gibt die Präferenz von Alternative a zu Alternative b an. Es gilt, dass bei  $\pi(a, b) = 0$  die Alternative a nicht gegenüber b präferiert wird und bei  $\pi(a, b) = 1$  strikte Präferenz von a gegenüber b gilt.

Der dritte Schritt von PROMETHEE I besteht aus einem zweiten Aggregationsschritt des Präferenzindex zum Präferenzfluss. Der Präferenzfluss  $\phi_a^+$  ist der sogenannte Ausgangsfluss, der beschreibt, wie stark die Alternative a gegenüber allen anderen Alternativen bevorzugt wird. Anders formuliert beschreibt der Ausgangsfluss die Dominanz der Alternative a gegenüber den anderen Alternativen. Der Ausgangsfluss wird wie folgt berechnet (Brans und Smet, 2016):

$$\phi_a^+ = \phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x) \quad \forall a \in A. \quad (3.8)$$

Hierbei ist  $n = |A|$  die Anzahl der Alternativen des Entscheidungsproblems. Der Ausgangsfluss ist somit der Mittelwert der Präferenzindizes einer Alternative<sup>5</sup>.

Auf analoge Weise wird nun als zweites Maß der Präferenz der Eingangsfluss  $\phi^-(a)$  einer Alternative  $a$  gebildet. Der Eingangsfluss beschreibt, wie stark die anderen Alternativen der Alternative  $a$  bevorzugt werden. Anders ausgedrückt beschreibt der Eingangsfluss die Dominanz der anderen Alternativen über Alternative  $a$ . Der Eingangsfluss ist gegeben durch

$$\phi_a^- = \phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a) \quad \forall a \in A. \quad (3.9)$$

Mithilfe der Eingangs- und Ausgangsflüsse kann die Rangordnung der Alternativen nach PROMETHEE I gebildet werden. Die Rangordnung ist eine partielle Präordnung bzw. Quasiordnung auf den Alternativen. Die Ordnungsrelation nach PROMETHEE I wird wie folgt gebildet (Brans und Smet, 2016):

$$\begin{cases} \phi_a^+ > \phi_b^+ \text{ und } \phi_a^- < \phi_b^-, & \text{oder} \\ \phi_a^+ = \phi_b^+ \text{ und } \phi_a^- < \phi_b^-, & \text{oder} \end{cases} \iff aPb,$$

$$\phi_a^+ > \phi_b^+ \text{ und } \phi_a^- = \phi_b^- \iff aIb, \quad (3.10)$$

$$\begin{cases} \phi_a^+ > \phi_b^+ \text{ und } \phi_a^- > \phi_b^-, & \text{oder} \\ \phi_a^+ < \phi_b^+ \text{ und } \phi_a^- < \phi_b^-, \end{cases} \iff aJb.$$

Im Allgemeinen gilt, dass der Ausgangsfluss einer Alternative  $a$  *besser* ist als der Ausgangsfluss einer Alternative  $b$ , falls  $\phi_a^+ > \phi_b^+$  gilt. Im Gegensatz dazu ist ein kleinerer Eingangsfluss für eine Alternative *besser*, d. h.  $\phi_a^- < \phi_b^-$ . Die oben definierte Ordnungsrelation besagt nun Folgendes: Eine Alternative  $a$  wird über einer Alternative  $b$  *präferiert* (d. h.  $aPb$ ), falls die Alternative in einem Präferenzfluss *besser* ist und in dem anderen mindestens gleichwertig (Brans und Smet, 2016). Falls für die beiden Alternativen beide Präferenzflüsse gleich sind, besteht Indifferenz, d. h.  $aIb$ . Unvergleichbarkeit  $aJb$  besteht, falls eine Alternative in einem Präferenzfluss *besser* ist und in dem anderen Präferenzfluss *schlechter* (Brans und Smet, 2016).

Die in Gleichung 3.10 definierte partielle Präordnung bestehend aus  $R = P \cup I \cup J$  in PROMETHEE I ermöglicht es, die Präferenzrelation in Form eines Graphen darzustellen. In dem Graphen wird jede Alternative durch einen Knoten repräsentiert. Zwei Knoten  $a$  und  $b$  werden durch eine gerichtete Kante  $(a, b)$  miteinander verbunden, falls  $aPb$  nach Gleichung 3.10 gilt. Abbildung 3.6 zeigt beispielhaft eine Präordnung für ein Entscheidungsproblem mit 5 Alternativen. Über die Darstellung der Präferenzrelation des Rankings können insbesondere die Unvergleichbarkeiten der partiellen Präordnung abgebildet werden. In Abbildung 3.6 sind z. B. Alternative  $d$  und  $e$  unvergleichbar. Insbesondere wird hier Alternative  $a$  am wenigsten präferiert.

<sup>5</sup> Man teilt durch  $n-1$  da  $\pi(a, a) = 0 \quad \forall a \in A$  gilt.

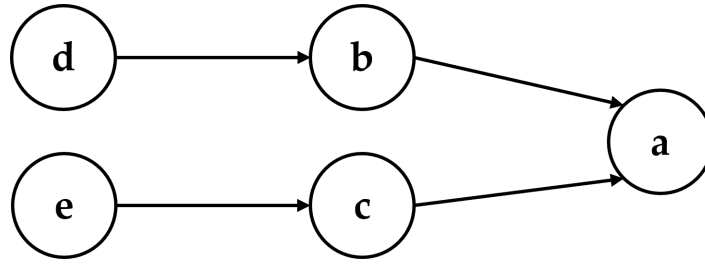


Abbildung 3.6: PROMETHEE I Präordnung mit Unvergleichbarkeiten. Es sind nur die Präferenzrelationen abgebildet. Präferiert werden hier Alternativen d und e, wobei sie nicht miteinander vergleichbar sind.

### 3.6.4.2 PROMETHEE II

PROMETHEE II baut auf den Berechnungen aus PROMETHEE I auf, mit dem Ziel, eine totale Ordnung aus der partiellen Präordnung zu erzeugen. Die totale Ordnung wird über die Berechnung des Nettoflusses wie folgt erreicht (Brans und Smet, 2016):

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad \forall a \in A \quad (3.11)$$

Der Nettofluss wird aus der Differenz des Eingangs- und Ausgangsfluss einer Alternative gebildet. Eine totale Ordnung ist nun gegeben durch

$$\begin{aligned} \phi(a) > \phi(b) &\iff aPb, \\ \phi(a) = \phi(b) &\iff aIb. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Der Nettofluss  $\phi$  liegt in dem Intervall  $[-1, 1]$ . Die Aggregation des Eingangs- und Ausgangsflusses zum Nettofluss führt aufgrund der Kompensation von positiven mit negativen Werten zu einem Informationsverlust. Im Sinne der Entscheidungsunterstützung sollte zur Ergebnisdarstellung und Visualisierung sowohl die partielle Präordnung, als auch die totale Ordnung dargestellt werden (Lerche und Geldermann, 2015; Oberschmidt u. a., 2010). Einfache und effiziente Visualisierungen der PROMETHEE I und II Ergebnisse können in Form von Balkendiagrammen, gestapelten Balkendiagrammen oder als Graph erfolgen (Schröder u. a., 2019).

Insgesamt ergibt sich für den Nettofluss einer Alternative folgende Formel:

$$\begin{aligned} \phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) &= \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^k \sum_{x \in A} [P_j(a, x) - P_j(x, a)] w_j \\ &= \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^k \phi_j(a) w_j \end{aligned} \quad (3.13)$$

mit

$$\phi_j(a) = \sum_{x \in A} [P_j(a, x) - P_j(x, a)].$$

Hierbei ist  $\phi_j(a)$  der Nettofluss einer Alternative auf dem Kriterium  $j$ . Aus geometrischer Sicht ist der Nettofluss einer Alternative das Skalarprodukt des Nettoflusses auf den Kriterien mit der Kriteriengewichtung (Brans und Smet, 2016).

PROMETHEE I und II werden sehr oft aufgrund ihrer einfachen Vorgehensweise und intuitiven Darstellung verwendet. Zum einen gestaltet sich das Ermitteln der Präferenzfunktionen und -parameter einfach, da für die Entscheidungsträgerin oder den Entscheidungsträger die Bedeutung der Parameter gut dargestellt werden kann. Der oft angeführte Nachteil, dass die Methodenfamilie keine eigene Methode für Kriteriengewichte vorsieht, kann durch die Vielzahl an bereits vorhandenen Methoden hierzu entkräftet werden.

Nichtsdestotrotz werden in der wissenschaftlichen Literatur einige unerwünschte Eigenschaften von PROMETHEE I und II diskutiert. Bei PROMETHEE I wird angemerkt, dass Unvergleichbarkeiten zwischen Alternativen nur auftreten können, falls das zugrunde liegende Entscheidungsproblem mehr als zwei Alternativen hat (Keyser und Peeters, 1996). Zur Verdeutlichung soll hier kurz darauf eingegangen werden. Betrachtet man erneut die Präordnung des Entscheidungsproblems aus Abbildung 3.6 und entfernt dort die Alternativen  $a$ ,  $b$  und  $c$ , erhält man ein Entscheidungsproblem mit zwei Alternativen. Nach einer erneuten Berechnung der Präferenzflüsse können nun keine Unvergleichbarkeiten mehr auftreten. Entweder wird  $d$  vor  $e$  präferiert oder andersherum. Die Unvergleichbarkeit zweier Alternativen ist bei PROMETHEE I also abhängig von anderen Alternativen.

Dieses Phänomen wird im Kontext von MADM-Methoden auch *Rank-Reversal* genannt und tritt vor allem bei Outranking-Verfahren, aber auch klassischen Methoden auf. So gibt es unter anderem Untersuchungen zum Rank-Reversal bei ELECTRE (Roy, 1972; Wang und Triantaphyllou, 2008), AHP (Barzilai und Golany, 1994; Belton und Gear, 1983; Wang und Elhag, 2006) und PROMETHEE (Keyser und Peeters, 1996; Mareschal u. a., 2008). Im Allgemeinen bezeichnet das Rank-Reversal-Phänomen eine Änderung in der Rangfolge zweier Alternativen eines Entscheidungsproblems durch Hinzufügen oder Entfernen von anderen Alternativen (Buede und Maxwell, 1995; Cinelli u. a., 2014; García-Cascales und Lamata, 2012; Verly und Smet, 2013; Wang und Luo, 2009; Zanakis u. a., 1998). Für die PROMETHEE-Methoden wurden Rank-Reversals als erstes von Keyser und Peeters (1996) beschrieben. Die Sensitivität von PROMETHEE gegenüber dem Hinzufügen und Entfernen von Alternativen wurde darüber hinaus von mehreren Autoren sowohl analytisch, als auch durch Simulation untersucht. So bestimmen Mareschal u. a. (2008) eine Schranke für das Auftreten des Rank-Reversals allgemein für zwei Alternativen  $a$  und  $b$ . Falls für die Flüsse dieser Alternativen folgende Ungleichungen erfüllt sind, kann kein Rank-Reversal auftreten:

$$\begin{aligned} |\phi^+(a) - \phi^+(b)| &> \frac{1}{n-1} \\ |\phi^-(a) - \phi^-(b)| &> \frac{1}{n-1} \\ |\phi(a) - \phi(b)| &> \frac{2}{n-1} \end{aligned} \tag{3.14}$$

Aus der Gleichung 3.14 wird deutlich, dass ein Rank-Reversal zwischen zwei Alternativen nur auftreten kann, falls die dazugehörigen Flüsse nah beieinander liegen (Brans und Smet, 2016). Verly und Smet (2013) zeigen experimentell durch Simulation, dass sich die Rangfolge



der ersten beiden Alternativen in PROMETHEE II erst dann ändert, wenn die in Gleichung 3.14 gegebene Schranke deutlich unterschritten wird. Mithilfe ihrer Ergebnisse leiten sie eine verbesserte Schranke in Abhängigkeit der Kriterienausprägungen ab:

$$|\phi(a) - \phi(b)| > \frac{2}{n-1} \sum_{j: g_j(a) > g_j(b)} w_j \quad (3.15)$$

Die Summe auf der rechten Seite in Gleichung 3.15 ist wegen der Normierung der Kriteriengewichte immer kleiner als 1, was eine deutliche Verbesserung der Schranke aus Gleichung 3.14 darstellt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass PROMETHEE I und II viele positive Eigenschaften von MCDA-Methoden auf sich vereinen. Insbesondere die Einfachheit der Anwendung und die Kommunikation mit dem Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerin sind häufig positiv genannte Eigenschaften.

### 3.6.4.3 Visualisierung und Sensitivitätsanalysen

Visuelle Darstellungen sind ein wirksames Format für die Vermittlung von Informationen zur Unterstützung der strategischen Entscheidungsfindung (DeSanctis, 1984; Dickson u. a., 1986; Mietinen, 2014; Remus, 1987; Vetschera, 1994). Grafische Kommunikationsmittel veranschaulichen komplizierte mehrdimensionale Aspekte von Strukturen auf einfache und wirkungsvolle Weise (Meyer, 1991). Insbesondere im strukturierten Ablauf der Mehrzielentscheidungsunterstützung und der Interaktion mit dem Entscheidungsträger und der Entscheidungsträgerin sind Darstellung und Visualisierung wichtige Elemente der Kommunikation (Greco u. a., 2016). Der Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerin sollten durch die Visualisierungen verstehen, wie das dargestellte Ergebnis zustande kommt, um darauf die eigene Entscheidung zu stützen oder evtl. Änderungen in den zugrundeliegenden Annahmen anzustoßen oder weitere Informationen einzuholen. Auch hier wird der iterative Charakter der mehrkriteriellen Entscheidungsunterstützung deutlich.

Neben den schon genannten Möglichkeiten der Visualisierung und Darstellung der Ergebnisse von PROMETHEE I und II wird von Brans und Smet (2016) die sogenannte GAIA-Ebene vorgeschlagen, die in Abbildung 3.7 exemplarisch dargestellt ist. Das Ziel der GAIA-Ebene ist es, das hochdimensionale Entscheidungsproblem mithilfe der Hauptkomponentenanalyse auf ein zweidimensionales Koordinatensystem zu projizieren (Jolliffe, 2002, S. 114f). Als Ausgangspunkt dient die Matrix der Nettoflüsse pro Kriterium  $M = (\phi_j(a_i))_{i,j}$ , da sie mehr Präferenzinformationen enthält als die Entscheidungsmatrix in Tabelle 3.1 und normierte Kriterienausprägungen in Form der Nettoflüsse.

Als GAIA-Ebene wird nun die Ebene bezeichnet, die von den Eigenvektoren der beiden größten Eigenwerte der Kovarianzmatrix  $M^t M$  aufgespannt wird (Brans und Mareschal, 1994). Durch die anschließende Projektion der Kriterien und Alternativen auf eine Ebene gehen Informationen über die tatsächliche Lage der profizierten Punkte verloren. Ein Maß für die Güte der Projektion kann durch die Eigenvektoren  $\lambda_1, \dots, \lambda_k$  angegeben werden (Brans und Mareschal, 2002):

$$\delta = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\sum_{j=1}^k \lambda_j}. \quad (3.16)$$

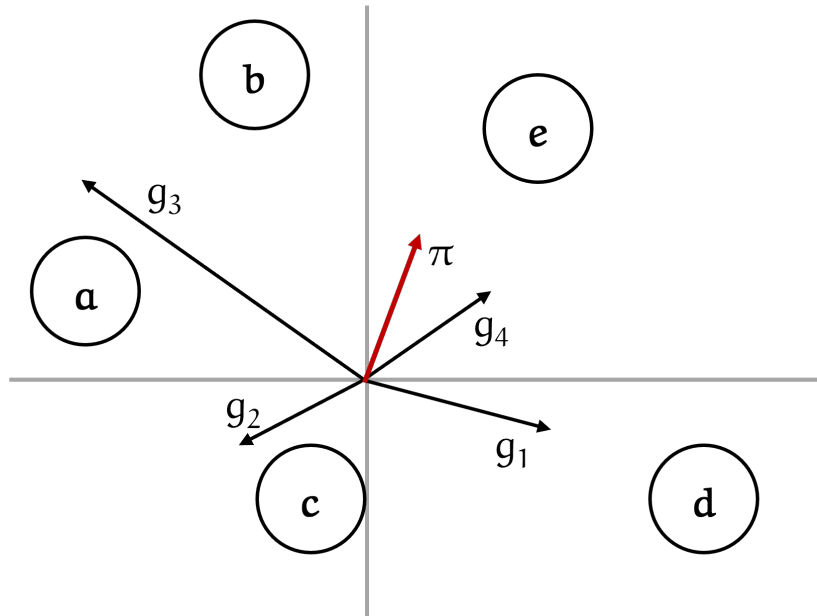


Abbildung 3.7: PROMETHEE-GAIA-Ebene dargestellt für ein Entscheidungsproblem mit 5 Alternativen und 4 Kriterien. In rot dargestellt ist der Decision Stick. Aufgrund seiner Ausrichtung werden Alternativen b und e präferiert. Quelle: Eigene Darstellung nach (Brans und Mareschal, 1994; Mareschal und Brans, 1988)

Hierbei sind  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  die beiden größten Eigenvektoren von  $M^tM$ .

Mithilfe der Eigenvektoren können sowohl die Kriterien, als auch die Alternativen und Kriteriengewichtung auf die aufgespannte Ebene projiziert werden. Die Alternativen werden auf der GAIA-Ebene als Punkte dargestellt, die Kriterien in Form von Pfeilen oder Linien und die Kriteriengewichtung als farblich markierter Pfeil. Die Länge eines Kriterienpfeils ist direktproportional zum Einfluss dieses Kriteriums auf das Gesamtergebnis. Zeigt der Pfeil in die Richtung einer Alternative, wird diese vom Kriterium unterstützt. Darüber hinaus deuten Kriterienpfeile, die in eine ähnliche Richtung zeigen, eine starke Beziehung zwischen diesen Kriterien an. Pfeile in verschiedene Richtungen weisen auf konfligierende Kriterien hin. Zwei Kriterien gelten als unabhängig voneinander, falls die Kriterienpfeile orthogonal zueinander stehen. Analog gilt, dass ähnliche Alternativen nah beieinander sind und sehr unterschiedliche Alternativen weit voneinander entfernt. Die Projektion der Kriteriengewichte wird im Englischen als *decision stick* bezeichnet. Im folgenden Verlauf wird dieser Vektor als *Entscheidungsvektor* bezeichnet. Er zeigt, analog zu den Kriterien, vom Ursprung aus in die Richtung der Alternativen, die durch die gewählte Gewichtung unterstützt werden (Brans und Smet, 2016).

Wenn bei einer sehr großen Anzahl an Alternativen eine übersichtliche Darstellung des Entscheidungsproblems nicht mehr möglich ist, ist eine systematische Analyse und Verdichtung von Kriterienausprägungen der Alternativen notwendig. Die Untersuchung der Auswirkungen einzelner Kriterien und Modellparameter auf die Lösung des Entscheidungsproblems wird dann mithilfe systematischer Sensitivitätsanalysen durchgeführt (Saltelli u. a., 1999; Schröder u. a., 2019). Die Sensitivitätsanalyse spielt in der Entscheidungsfindung

eine große Rolle, weil sie wesentlich zum Verständnis der Ergebnisse des gesamten Entscheidungsprozesses beiträgt. So kann geprüft werden, inwieweit Ergebnisse auf Änderungen von z. B. Kriteriengewichten reagieren bzw. wie groß der Einfluss einzelner Parameter des Entscheidungsmodells auf das Ergebnis ist. Damit kann abgeschätzt werden, ob weitere Informationen zur Unterscheidung der untersuchten Alternativen eingeholt werden sollten.

Die Einsatzmöglichkeiten von Sensitivitätsanalysen im Rahmen der Anwendung von Entscheidungsmodellen sind vielfältig. So werden Sensitivitätsanalysen verwendet, um intra-kriterielle und inter-kriterielle Präferenzinformationen und ihre Auswirkung auf das Ergebnis, also insbesondere die Rangfolge der Alternativen, zu untersuchen (Bertsch, 2008). In den letzten Jahren wurden verschiedene Ansätze und Techniken entwickelt, die von der Betrachtung einzelner Parameter bis zu interaktiven grafischen Darstellungen reichen. Tabelle 3.3 gibt einen Überblick über die Sensitivitätsanalysen für die Methode PROMETHEE. Viele der Verfahren sind nicht spezifisch für eine Methode anwendbar, sondern sind auch im Rahmen anderer MCDA-Modelle einsetzbar.

Bei den untersuchten Parametern einer Sensitivitätsanalyse handelt es sich oft um die Kriteriengewichtung, da diese auf der subjektiven Einschätzung des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin beruhen. Darüber hinaus hat die Kriteriengewichtung einen großen Einfluss auf das Ergebnis. Eine Möglichkeit der grafischen Darstellung der Sensitivität von einzelnen Gewichten sind die Insensitivitätsintervalle (s. Abbildung 3.8). Sie stellen dar, in welchem Bereich die Gewichtung eines Kriteriums geändert werden kann, ohne dass zwei Alternativen die Rangfolge tauschen. Ein kleines Intervall lässt auf ein sehr einflussreiches Kriterium schließen, d. h. eine kleine Veränderung der Gewichtung kann zu einer Änderung in der Rangfolge zweier Alternativen führen. Ein großes Intervall sagt aus, dass dieses Kriterium nicht sehr einflussreich ist. Weiterhin kann man aus der Abbildung entnehmen, welche Alternativen die Rangfolge tauschen.

Eine Weiterentwicklung der Insensitivitätsintervalle sind die Stabilitätsintervalle von Mareschal (1988). Sie geben für jedes Kriterium an, um wie viel dieses verändert werden kann, ohne dass zwei Alternativen die Rangfolge tauschen. Abbildung 3.9 stellt beispielhaft die Stabilitätsintervalle für ein Entscheidungsproblem mit neun Kriterien dar. Das Stabilitätsintervall eines Kriteriums kann als Maß für die Robustheit der Rangfolge der Alternativen gesehen werden. Bei kleinen Intervallen ist die Rangfolge stark beeinflussbar durch andere Kriteriengewichtungen. Bei großen Intervallen ist die Rangfolge eher unabhängig von der Kriteriengewichtung. Die beiden vorgestellten Methoden betrachten jeweils den Einfluss eines einzelnen Kriteriums unabhängig von den anderen. Daneben gibt es mehrdimensionale Methoden, die mehrere Kriteriengewichte gleichzeitig betrachten. So untersuchen Doan und Smet (2018) mithilfe eines Optimierungsmodells, wie die Kriteriengewichtung geändert werden kann, um eine bestimmte Alternative zu präferieren. Hierbei werden die Gewichte möglichst wenig modifiziert. Diese Art der Sensitivitätsanalyse kann auch in Gruppenentscheidungen zum Finden eines Konsens verwendet werden.

Neben den Kriteriengewichten können auch die zugrundeliegende Präferenzfunktionen und -parameter auf ihre Sensitivität untersucht werden (Treitz, 2006).

Die Kriterienausprägungen bei MCDA-Problemen sind häufig von Unsicherheiten geprägt, da für die Ermittlung meist mehrere Annahmen getroffen werden. Ist es möglich, aus den Unsicherheiten Intervalle abzuleiten, kann man die Kriterienausprägungen in

Tabelle 3.3: Überblick der Sensitivitätsanalysen in PROMETHEE

Name	Parameter	Dimensionalität	Quelle
Stabilitätsintervalle	Kriteriengewichte	1 Kriterium	(Mareschal, 1988)
Insensitivitätsintervalle	Kriteriengewichte	1 Kriterium	(Mareschal, 1988)
PROMETHEE-GAIA	Kriterien und -gewichte, Alternativen	k Kriterien	(Brans und Smet, 2016)
Walking weights	Kriteriengewichte	1 Kriterium	Decision Lab nach (Taha und Rostam, 2012)
Inverse Sensitivity	Kriteriengewichte	k Kriterien	(Doan und Smet, 2018)
Monte-Carlo Simulation	Kriteriengewichte	1 - k Kriterien	(Treitz, 2006)
Monte-Carlo Simulation	Kriterienausprägungen	1 - n Alternativen	(Treitz, 2006)
Monte-Carlo Simulation	Präferenzfunktionen und -parameter	1 - n Alternativen	(Treitz, 2006)
Rank Reversal	Alternativen	1 - 2 Alternativen	(Mareschal u. a., 2008)

diesem Intervall variieren und so den Einfluss auf das Ergebnis bestimmen (Belton und Stewart, 2002, S. 148). Hierfür bieten sich insbesondere Monte-Carlo Simulationen auf den Kriterienausprägungen an (Bertsch, 2008).

#### 3.6.4.4 PROMETHEE V

Die PROMETHEE V-Methode ist eine Erweiterung der PROMETHEE I- und II-Methode und identifiziert eine Teilmenge von Alternativen unter Berücksichtigung einer Reihe von Einschränkungen, z. B. Kardinalitäts-, Budget- oder Investitionsbeschränkungen. Hierbei werden die Alternativen so ausgewählt, dass der Nettofluss maximiert wird, während alle Nebenbedingungen erfüllt sind. Dies wird als binäres Rucksack-Problem modelliert (Brans und Mareschal, 1992). Das binäre Rucksack-Problem ist ein bekanntes und gut untersuchtes kombinatorisches Optimierungsproblem. Das Ziel des Rucksack-Problems ist die Auswahl einer Teilmenge aus einer Gesamtmenge, so dass ein vorher definierter Nutzen maximiert wird, ohne dass gegebene Einschränkungen an die Teilmenge verletzt werden. Im Rahmen von PROMETHEE V wird hierzu eine binäre Entscheidungsvariable  $x_i$  für jede Alternative  $a_i \in A, i = 1, \dots, n$  definiert, die angibt, ob die entsprechende Alternative ausgewählt wird oder nicht. Das Ziel ist nun die Maximierung des Nettoflusses der Alternativen, d. h.

$$\max \sum_{i=1}^n \phi(a_i) x_i \quad (3.17)$$

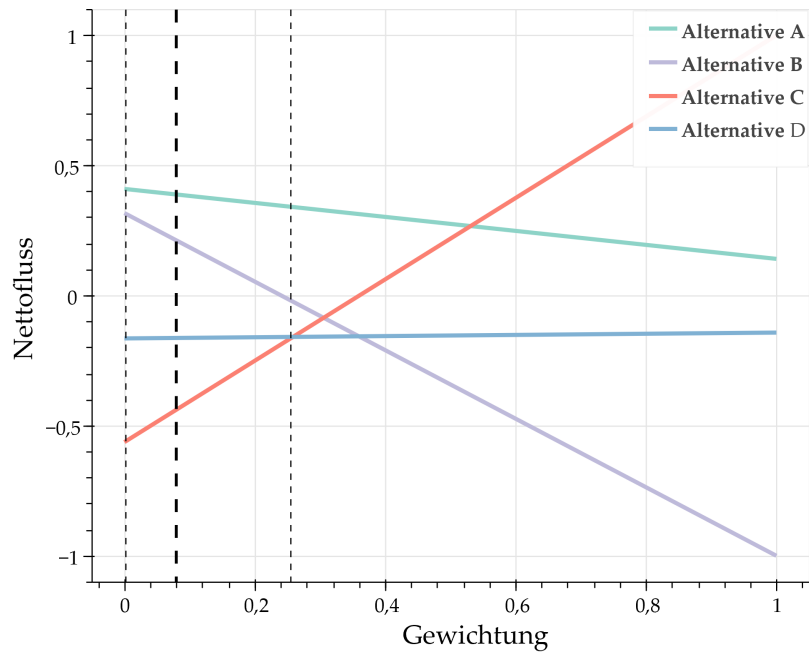


Abbildung 3.8: Insensitivitätsintervalle eines Kriteriums für ein Entscheidungsproblem mit 4 Alternativen. Die y-Achse zeigt die Nettoflüsse der Alternativen, die x-Achse zeigt das Kriteriengewicht des untersuchten Kriteriums. Das ursprüngliche Gewicht des Kriteriums liegt bei 0,06. Ab einem Wert über 0,24 würden Alternative C und D den Rang tauschen, da sich hier die Geraden schneiden. Quelle: PROMETHEE-Cloud

unter Nebenbedingungen, die von Brans und Mareschal (1992) allgemein gegeben sind durch

$$\sum_{i=1}^n \lambda_{pi} x_i \sim \beta_p \quad p = 1, 2, \dots, P \quad (3.18)$$

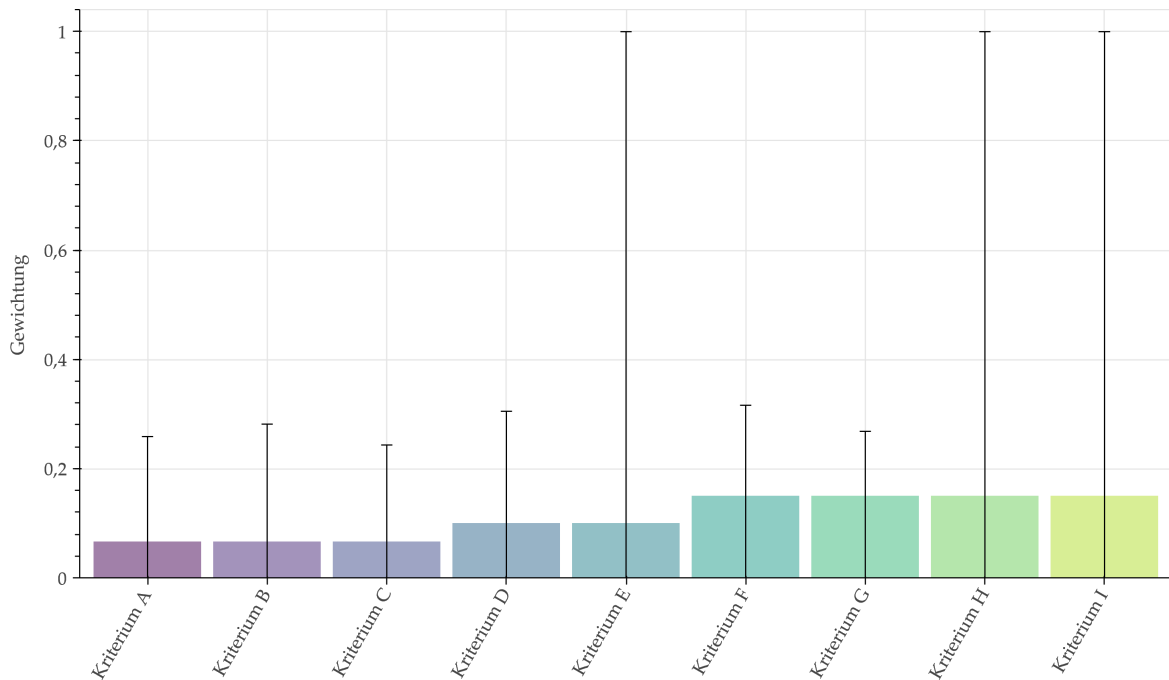
$$x_i \in \{0, 1\} \quad \forall i = 1, \dots, n.$$

Hierbei steht  $\sim$  stellvertretend für  $=$ ,  $\leq$  oder  $\geq$  und  $\lambda_{pi}$  für die Koeffizienten der  $P$  Nebenbedingungen. Das Ziel dieses Optimierungsmodells ist es also, eine Teilmenge der Alternativen mit möglichst hohem Nettofluss auszuwählen, so dass alle Nebenbedingungen eingehalten werden.

Mithilfe von PROMETHEE V ist es also möglich, Portfolios aus Alternativen zu erstellen. Dies dient als Grundlage für die weitere Beschreibung und Analyse des eingangs beschriebenen Problems in Kapitel 3.7.

#### 3.6.4.5 Software für PROMETHEE

Seit der Entwicklung der Methode im Jahr 1986 wurden verschiedene Softwarelösungen zur Analyse und Auswertung von Entscheidungsproblemen mit PROMETHEE entwickelt und vorgestellt. Zu den bekannten Lösungen gehören PROMCALC von Brans und Mareschal (1994),



**Abbildung 3.9:** Stabilitätsintervalle für ein Entscheidungsproblem mit neun Kriterien. Die Balken zeigen die aktuelle Gewichtung des Kriteriums und die Intervalle, um wie viel die Gewichtung verändert werden kann, bevor Alternativen die Rangfolge tauschen. Eine Variation der Gewichtung der Kriterien E, H und I hat z. B. keinen Einfluss auf die Rangfolge. Eine Gewichtung des Kriteriums A von über 2,5 würde dazu führen, dass zwei Alternativen die Rangfolge tauschen. Quelle: PROMETHEE-Cloud

*Decision Lab 2000*, *Visual PROMETHEE*<sup>6</sup> von Mareschal (2012) und *D-Sight*<sup>7</sup> von Hayez u. a. (2012). Alle Lösungen bieten die grundlegenden Funktionen von PROMETHEE und darüber hinaus verschiedene Möglichkeiten der Sensitivitätsanalyse, Gruppenentscheidungen und Verknüpfungen mit anderen Informationssystemen. Tabelle 3.4 gibt einen Überblick über die genannten Lösungen auf Basis ausgewählter Kriterien.

Die beiden neusten Implementierungen, d. h. *Visual PROMETHEE* und *D-Sight* sind zur Zeit bereits über 10 Jahre alt. Dementsprechend besitzen sie keine modernen Exportmöglichkeiten für Abbildungen und Ergebnisse. Insbesondere ist es bei beiden Lösungen einzig möglich, Abbildungen über Screenshots zu exportieren. Weiterhin wurden die Lösungen als standalone Implementierungen für ein einzelnes Betriebssystem entwickelt, was ein Teilen der Ergebnisse und Bearbeiten der Entscheidungsprobleme mit verschiedenen Endgeräten verhindert. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit eine moderne, webbasierte Entscheidungsunterstützungssoftware auf Basis von PROMETHEE implementiert. Die *PROMETHEE-Cloud*<sup>8</sup> unterstützt die hier dargestellten Sensitivitätsanalysen und darüber hinaus den Export aller Abbildungen als Vektorgraphiken und Bilder. Weiterhin sind verschiedene

6 <http://en.promethee-gaia.net/visual-promethee.html>

7 <http://www.d-sight.com/solutions/d-sight-cdm>

8 <http://promethee.pom.uni-due.de>

**Tabelle 3.4:** Softwarelösungen für Entscheidungsunterstützung mit PROMETHEE. †Eine freie akademische Lizenz ist erhältlich. ‡Eine neuere Version ist webbasiert; die freie akademische Lizenz ist sehr eingeschränkt.

Software	Veröffentlichung	Plattform	Export von Abbildungen	Preisgestaltung
PROMCALC	1994	Windows	nein	kostenlos
Decision Lab 2000	2000	Windows	nein	kostenlos
Visual PROMETHEE	2012	Windows	nein	kommerziell <sup>†</sup>
D-Sight	2012	Windows <sup>‡</sup>	nein	kommerziell <sup>†</sup>
PROMETHEE-Cloud	2022	Web	svg, png	kostenlos

interaktive Analysen implementiert, wie z. B. die *Walking Weights* und die individuelle Anpassung der Abbildungen, wie z. B. die Schriftart und Achsenabschnitte ist möglich. Alle folgenden Abbildungen, die Ergebnisse von PROMETHEE-Analysen zeigen, wurden mithilfe der *PROMETHEE-Cloud* erstellt.

### 3.7 METHODEN FÜR DIE MEHRKRITERIELLE PORTFOLIOERSTELLUNG

Ein Portfolio ist eine Menge von Projekten oder Aktionen, die der Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerin innerhalb der gegebenen physischen und finanziellen Einschränkungen auswählen muss. Formal sei  $A = \{a_1, \dots, a_n\}$  eine Menge von gegebenen Aktionen, die unter einer Menge von gegebenen Kriterien  $G = \{g_1, \dots, g_m\}$  zu bewerten sind. Die Kriterienausprägung einer Aktion  $a_i$  für das  $j$ -te Kriterium wird mit  $g_j(a_i)$  bezeichnet. Die Aktion  $x_j$  wird durch einen Vektor  $g(a_i) = (g_1(a_i), \dots, g_m(a_i))$  aus Bewertungen dargestellt.

Das Ziel der mehrkriteriellen Portfolioentscheidungen ist es eine Ordnungsrelation auf der Menge der möglichen Portfolios zu definieren. Die Menge aller möglichen Portfolios ist gegeben durch

$$P = 2^A = \{p | p \subset A\}. \quad (3.19)$$

Die Definition einer Ordnungsrelation auf  $P$  ist oft rechnerisch nicht möglich, da die Menge der Portfolios exponentiell mit der Menge der Aktionen wächst. Daher wird die Portfolioauswahl auch einfach über die Bestimmung des präferierten Portfolios definiert. Eine Herleitung der Portfolioentscheidung für additive Wertefunktionen kann bei Morton u. a. (2016) und Golabi u. a. (1981) gefunden werden. Da diese axiomatische Definition des Portfolioproblems sehr ähnlich zu der allgemeiner MCDA-Probleme ist und sich daraus keine Methoden zur Erzeugung von Portfolios ableiten lässt, wird hier auf eine Darstellung verzichtet.

Da die exponentielle Anzahl der möglichen Portfolios oft zu aufwändig ist, werden in der aktuellen Literatur die Aktionen zunächst mehrkriteriell bewertet und im Anschluss, auf Basis dieser Bewertung, zu Portfolios zusammengefasst (vgl. Liesiö u. a., 2020). Das aktuelle Kapitel diskutiert und stellt verschiedene Methoden zur Erzeugung von mehrkriteriellen Portfolios vor. Darüber hinaus werden Probleme und Nachteile bei der Erzeugung aufgezeigt. Zur Lösung der aufgezeigten Probleme und Nachteile wird anschließend in Abschnitt 3.8 ein Vorschlag zur Erzeugung von mehrkriteriellen Portfolios dargestellt.

Die Bewertung einer Aktion wird durch eine MADM-Methode modelliert, die auch die Präferenzen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin berücksichtigt. Der Wert eines Projekts ist formal gegeben durch eine Funktion

$$V(g(a_i), w) : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \longrightarrow \mathbb{R}, \quad (3.20)$$

wobei das Gewicht  $w_j$  im Vektor  $w$  die relative Wichtigkeit des Kriteriums  $j$  ist. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit können die Gewichte so skaliert werden, dass

$$\{w \in \mathbb{R}^m \mid w_j \geq 0, \sum_{j=1}^m w_j = 1\}. \quad (3.21)$$

Die Wertefunktion bildet somit eine gegebene Aktion und die Präferenz des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin auf eine Zahl oder eine Punktzahl ab.

Ähnlich wie in PROMETHEE V wird die Erzeugung von Portfolios nach der mehrkriteriellen Bewertung der Alternativen mithilfe eines linearen ganzzahligen Optimierungsmodells durchgeführt. Hierbei wird für jede Aktion eine binäre Entscheidungsvariable  $x_i$ ,  $a_i \in A$  definiert, die anzeigt, ob die Aktion ins Portfolio aufgenommen wird ( $x_i = 1$ ) oder nicht ( $x_i = 0$ ).

In der Zielfunktion des Optimierungsmodells wird nun die Gesamtbewertung des Portfolios maximiert, d. h. die Zielfunktion hat die Form

$$\max \sum_{i=1}^n V(a_i) x_i. \quad (3.22)$$

In den Nebenbedingungen des Optimierungsmodells können nun die Einschränkungen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin modelliert werden. Hierbei ist die Modellierung der Entscheidung über binäre Variablen hilfreich, die Nebenbedingungen des Modells zu definieren. Gibt es bei der Portfolioentscheidung z. B. Einschränkungen bzgl. des zur Verfügung stehenden Budgets, könnte eine Nebenbedingung der Form

$$\sum_{i=1}^n b_i x_i \leq B, \quad (3.23)$$

hinzugefügt werden. Hierbei bezeichnet  $b_i$  das Budget für Aktion  $a_i \in A$  und  $B$  das Gesamtbudget. Analog können weitere Nebenbedingungen dieser Art modelliert werden. Abhängigkeiten zwischen den Aktionen werden wie folgt dargestellt. Falls sich zwei Aktionen  $a_i$  und  $a_j$  gegenseitig ausschließen, kann eine Nebenbedingung der Form



$$x_i + x_j \leq 1. \quad (3.24)$$

verwendet werden. Aufgrund der binären Entscheidungsvariablen kann durch die Nebenbedingung 3.24 nur eine der Variablen  $x_i$  oder  $x_j$  ungleich null sein. Somit wird auch maximal eine der Aktionen  $i$  oder  $j$  ausgewählt. Analog können weitere Abhängigkeiten zwischen den Aktionen definiert werden. Die verwendeten Entscheidungsvariablen sind binär:

$$x_i \in \{0, 1\}. \quad (3.25)$$

Das hier zugrundeliegende Optimierungsmodell ist ein sogenanntes Rucksackproblem. Betrachtet man nur die Zielfunktion und die Budget-Bedingung, hat man es mit einem klassischen Rucksackproblem des Operations Research zu tun<sup>9</sup>. Der Name des Problems stammt von der Vorstellung, eine Menge von Gegenständen, die sowohl einen Nutzen als auch ein Gewicht haben, in einen Rucksack zu packen, so dass der Nutzen maximiert wird und der Rucksack ein gegebenes Maximalgewicht nicht überschreitet. Das Rucksackproblem gehört zu den klassischen *NP*-vollständigen Problemen und wurde intensiv in der aktuellen wissenschaftlichen Literatur untersucht (Karp, 1972; Kellerer u. a., 2004; Laabadi u. a., 2018; Martello und Toth, 1990). Ein Problem heißt *NP*-vollständig, falls es in der Klasse *NP* liegt und *NP*-schwer ist. In der Komplexitätstheorie werden nur Entscheidungsprobleme *NP*-vollständig genannt und man spricht bei Optimierungsproblemen oder Suchproblemen von *NP*-Äquivalenz. Allerdings lassen sich die Optimierungsprobleme auf Entscheidungsprobleme in polynomieller Zeit reduzieren, so dass man auch hier oft von *NP*-Vollständigkeit spricht.

In der Klasse *NP* liegen alle Probleme, bei denen ein deterministischer Rechner eine gegebene Lösung in polynomieller Zeit überprüfen kann. Ein Problem heißt *NP*-schwer, falls alle anderen Probleme in *NP* in polynomieller Zeit auf das Problem reduziert werden können. Es ist nicht bekannt, ob *NP*-vollständige Probleme *effizient*, d. h. in polynomieller Zeit gelöst werden können<sup>10</sup> (Nash und Rassias, 2016). Aktuell wird davon ausgegangen, dass diese Probleme nicht effizient gelöst werden können (Fortnow, 2009).

Für das klassische Rucksackproblem wurde eine Vielzahl von Heuristiken entwickelt, z. B. Greedy-Algorithmen, dynamische Programmierung oder Branch and Bound-Algorithmen (Martello und Toth, 1990). Für kleine Instanzen des Rucksackproblems, auch mit weiteren Nebenbedingungen, wie sie oben definiert wurden, können aktuelle Solver<sup>11</sup> für Optimierungsprobleme verwendet werden.

<sup>9</sup> Das klassische Rucksackproblem wird formal wie folgt definiert: Gegeben sei eine endliche Menge an Objekten  $U$ , denen durch eine Nutzenfunktion  $v : U \rightarrow \mathbb{R}$  einen Nutzen und durch eine Gewichtsfunktion  $w : U \rightarrow \mathbb{R}$  ein Gewicht zugeordnet wird. Gesucht ist eine Teilmenge  $K \subset U$ , sodass  $\sum_{u \in K} w(u) \leq B$  und die Zielfunktion  $\sum_{u \in K} v(u)$  maximiert wird.

<sup>10</sup> Das *P-NP*-Problem gehört zu den Millenniumproblemen der Mathematik und wurde bis heute nicht gelöst (Cook, o. D.; Nash und Rassias, 2016)

<sup>11</sup> Z. B. Gurobi: [www.gurobi.com](http://www.gurobi.com), IBM CPLEX: [www.ibm.com/de-de/analytics/cplex-optimizer](http://www.ibm.com/de-de/analytics/cplex-optimizer) oder Coin-OR: [www.coin-or.org](http://www.coin-or.org)

### 3.7.1 MAVT als zugrundeliegende MADM-Methode

Wird als MADM-Methode zur Portfolioerzeugung MAVT verwendet, ist die Wertefunktion gegeben als die gewichtete Summe der Kriterienausprägungen (z. B. Liesiö u. a., 2007):

$$V(g(a_i), w) = \sum_{j=1}^m w_j g_j(a_i). \quad (3.26)$$

Eine Aktion wird einer anderen vorgezogen, wenn sie den höheren Gesamtwert von beiden hat, d. h.

$$a \succ a' :\Leftrightarrow V(g(a), w) > V(g(a'), w). \quad (3.27)$$

Ein Portfolio  $p \subset A$  ist eine Teilmenge aller verfügbaren Projekte. Die Menge aller möglichen Portfolios ist die Potenzmenge von  $A$ , d. h.  $P = 2^A$  mit insgesamt  $|P| = 2^n$  Portfolios. Die Bewertung eines Portfolios  $p \in P$  wird bei MAVT durch eine Abbildung

$$V(p) : P \rightarrow \mathbb{R} \quad (3.28)$$

modelliert. Dies entspricht der kanonischen Erweiterung von MAVT auf mehrkriterielle Portfolioentscheidungen, wie sie von vielen Autoren verwendet wird (vgl. Liesiö u. a., 2020). Die Bewertung der Portfolios ist durch die Summe der Einzelbewertungen der Aktionen, d. h.

$$V(p) = \sum_{a \in p} V(g(a_i), w) = \sum_{a \in p} \sum_{j=1}^m w_j g_j(a_i). \quad (3.29)$$

gegeben. Die obige Doppelsumme besteht aus zwei einzelnen endlichen Summen. Vertauscht man hier die Summationsreihenfolge, erhält man

$$V(p) = \sum_{j=1}^m w_j \underbrace{\sum_{a \in p} g_j(a_i)}_{=g_j(p)} = \sum_{j=1}^m g_j(p), \quad (3.30)$$

d. h. die Kriterienausprägung des Portfolios unter einem Kriterium ist die Summe der Kriterienausprägungen aller Aktionen unter diesem Kriterium. Die Zielfunktion ist damit insbesondere konvex, was in vielen Lösungsvorschlägen verwendet wird (z. B. Liesiö u. a., 2007).

In vielen realen Anwendungen gibt es jedoch Abhängigkeiten zwischen den Aktionen. Dazu gehören insbesondere sich gegenseitig verstärkende und abschwächende Aktionen, Aktionen, die voneinander abhängig sind, d. h. die entweder nur zusammen ausgeführt oder getrennt voneinander ausgeführt werden können. In diesen Fällen ist die hier zugrundeliegende Annahme, die Kriterienausprägung des Portfolios ergibt sich als Summe der Kriterienausprägungen der Aktionen, nicht richtig und kann zu nicht optimalen Portfolios führen. Möglichkeiten zum Umgang mit der Bestimmung und Berücksichtigung der Kriterienausprägungen der Portfolios bei der Erzeugung wird eingehend im folgenden Abschnitt behandelt.

Bei der Verwendung von MAVT für mehrkriterielle Portfolioprobleme werden die oben genannten Anforderungen an das Entscheidungsproblem gestellt. Dazu gehören

- die Präferenzunabhängigkeit des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin,
- die nötige Kompensationseigenschaft zwischen den Kriterien von Alternativen bzw. Aktionen und die damit einhergehende Trade-Off Beziehung zwischen den Kriterien und
- die Definition der Kriterienausprägung eines Portfolios über die Summe der Kriterienausprägungen der Aktionen.

Analog zur Verwendung der MADM-Methode MAVT werden auch hier, bei der Portfolioerzeugung mit MAVT hohe Anforderungen an den Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerin gestellt. Darüber hinaus wird aufgrund der Methode die Aggregationsmethode, d. h. wie die Kriterienausprägungen des Portfolios aus den Kriterienausprägungen der Aktionen bestimmt werden, vorgegeben. Es bietet sich also an, auch für die Portfolioerzeugung auf Outranking-Verfahren zurückzugreifen (vgl. z. B. Barbati u. a., 2018). In den folgenden Abschnitten wird eine Möglichkeit zur Portfolioerzeugung mit PROMETHEE vorgestellt und analysiert. Darauf aufbauend wird im Anschluss eine eigene Methode zur Portfolioerzeugung auf Basis von PROMETHEE vorgeschlagen.

### 3.7.2 PROMETHEE V zur Erzeugung von mehrkriteriellen Portfolios

Die Bewertung der Aktionen bei PROMETHEE erfolgt über den Nettofluss in Gleichung 3.13. In PROMETHEE V wird nun der Nettofluss maximiert, wie in Formel 3.17 dargestellt. Insbesondere gilt

$$V(a, w) = \phi(a, w). \quad (3.31)$$

Die Nebenbedingungen können analog zum generischen Modell in Gleichung 3.22 bis 3.25 definiert werden. Die Verwendung des Nettoflusses als Koeffizienten in der Zielfunktion führt zu einigen Nachteilen, die im Folgenden näher analysiert werden.

#### 3.7.2.1 Probleme in der Anwendung von PROMETHEE V

Mit dem Einsatz von PROMETHEE V in der Portfolioauswahl sind einige Probleme verbunden. Eines dieser Probleme betrifft die Zielfunktion der Modellformulierung von PROMETHEE V in Formel 3.17. Die Verwendung dieser Zielfunktion führt dazu, dass keine Aktion mit einem negativen Nettofluss  $\phi_a$  für das Portfolio gewählt wird, da die Aufnahme in das Portfolio zur Senkung des Zielfunktionswerts führt.

Der Nettofluss  $\phi_a$  in PROMETHEE gibt allerdings nur an, wie die Aktion relativ zu den anderen Aktionen abschneidet. Ein negativer Nettofluss  $\phi_a$  bedeutet nicht, dass die Auswahl der Aktion für das Portfolio nicht sinnvoll sein kann. Nach dieser Modellformulierung werden nur Portfolios aus Aktionen erstellt, die einen positiven Nettofluss haben, da ein negativer Nettofluss den Zielfunktionswert verringern würde. Es kann passieren, dass es bessere Portfolios gibt, d. h. Portfolios, die mehr den Präferenzen des Entscheidungsträgers oder Entscheidungsträgerin entsprechen, die Aktionen mit negativem Nettofluss  $\phi_a$  enthalten (Almeida und Vetschera, 2012).

Eine schon genannte Möglichkeit zur Portfolioauswahl ist die Bewertung aller Portfolios, d. h. die Potenzmenge der Aktionen, mit PROMETHEE II, um das präferierte Portfolio zu bestimmen. Bei diesem Ansatz wird eine Rangordnung nach PROMETHEE II auf der Menge aller Portfolios erstellt und das Portfolio mit der besten Bewertung als Lösung gewählt. Allerdings steigt die Anzahl der Portfolios in der Potenzmenge exponentiell mit der Anzahl der Aktionen. Für kleine Mengen an Aktionen und Portfolioentscheidungen mit bestimmbareren Kriterien ist dieses Vorgehen möglich. Das Ziel ist es also, die Anzahl der Portfolios, die bewertet werden müssen, zu reduzieren.

Ein weiteres Problem in der Vorgehensweise von PROMETHEE V ist, dass die direkte Erstellung eines optimalen Portfolios auf Grundlage einer Analyse der Aktionen mit PROMETHEE und die Bewertung aller zulässigen Portfolios mit PROMETHEE nicht unbedingt zu denselben Ergebnissen führen (Vetschera und Almeida, 2012). Das optimale Portfolio nach PROMETHEE V ist somit nicht unbedingt das vom Entscheidungsträger oder von der Entscheidungsträgerin präferierte Portfolio.

Formal betrachtet ist das Ziel der Portfolioerzeugung die Bestimmung des Portfolios, das vom Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerin präferiert wird. Angenommen alle Kriterienausprägungen  $g_j(p)$  liegen für alle Portfolios  $p \in P$  vor, dann ist das präferierte Portfolio  $p^*$  das Portfolio, das nach Anwendung der PROMETHEE II-Methode auf die Menge  $P$  aller Portfolios den größten Nettofluss aufweist. Dies muss allerdings nicht das Portfolio sein, das, wie oben beschrieben, durch das Lösen des Optimierungsmodells erzeugt wird, da hier die Summe der Nettoflüsse aller Aktionen maximiert wird.

Die Präferenzen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin bei der Erstellung von Portfolios mit PROMETHEE V werden nur in der Bewertung der Aktionen direkt berücksichtigt. Bei der letztendlichen Auswahl von Aktionen für das Portfolio wird nur der Nettofluss  $\phi_a$  betrachtet. Wie Mavrotas u. a. (2008) zeigen, werden die Nettoflüsse  $\phi_a$  der Aktionen in der Portfolioerstellung so behandelt, als ob diese direktproportional zu den Kriterienausprägungen der Aktionen sind. Dies ist jedoch nicht der Fall, weil bspw. eine Aktion  $a$  mit einem doppelt so hohen Nettofluss  $\phi_a$  wie der Nettofluss  $\phi_b$  einer Aktion  $b$  nicht automatisch doppelt so große Kriterienausprägung besitzt bzw. einen doppelt so hohen Beitrag zur Zielerfüllung leistet. Dies liegt in dem paarweisen Vergleich der Alternativen untereinander bei PROMETHEE begründet.

Darüber hinaus ist die Berechnung des Nettoflusses  $\phi_a$  mit einem Informationsverlust verbunden, d. h. es werden z. B. keine Unvergleichbarkeiten zwischen Aktionen abgebildet. Dadurch kann in der Methode PROMETHEE V ein anderes Portfolio als Lösung gewählt werden, als es bei der Betrachtung aller zulässigen Portfolios der Fall ist.

### 3.7.2.2 Aggregation von Kriterienausprägungen

Auch bei PROMETHEE V muss die Aggregation der Kriterienausprägung der Aktionen zur Kriterienausprägung der Portfolios betrachtet werden. So argumentieren Almeida und Vetschera (2012), dass bei monotonen und konvexen Funktionen und weiteren Voraussetzungen das Ergebnis von PROMETHEE V dem präferierten Portfolio entspricht. Allerdings sind die Aggregationen der Kriterienausprägungen in realen Anwendungen oft nicht konvex oder monoton, sondern teilweise auch nicht bestimmbar. Das bedeutet, dass die Kriterienausprä-

gung des Portfolios kann nicht als (monotone) Funktion der Kriterienausprägungen der enthaltenen Aktionen dargestellt werden. Dies ist z. B. der Fall bei technischen Kriterien, die mithilfe eines Simulationsmodells bestimmt wurden oder bei ökonomischen Kriterien wie der Amortisationszeit.

Aus diesem Grund wird im Folgenden zwischen monotonen Kriterien und nicht-monotonen Kriterien unterschieden. Diese Unterscheidung im Kontext mehrkriterieller Portfolios wird soweit bekannt nur von (Vetschera und Almeida, 2012) behandelt. Die Autoren charakterisieren monotone Kriterien als Kriterien, bei denen das Hinzufügen einer weiteren Aktion zu einem Portfolio die Kriterienausprägung unter diesem Kriterium erhöht. Für monotone Kriterien kann davon ausgegangen werden, dass das Hinzufügen von Aktionen zu einer Steigerung oder wenigstens nicht zu einer Senkung der Kriterienausprägungen des Portfolios führt. Das oben erwähnte additive Modell ist ein spezieller Fall einer monotonen Funktion, da hier gilt:

$$g_j(p) = \sum_{a \in p} g_j(a). \quad (3.32)$$

Daneben sind nicht-monotone Kriterien Kriterien, bei denen das Hinzufügen einer weiteren Aktion zum Portfolio die Kriterienausprägung verringern könnte. Im Fall von nicht-monotonen Kriterien kann nicht pauschal gesagt werden, ob das Hinzufügen einer weiteren Aktion die Kriterienausprägung des Portfolios steigert, senkt oder keine Auswirkungen hat. Bspw. kann die Veränderung der Kriterienausprägung eines Portfolios bei nicht-monotonen Kriterien nicht nur von der Kriterienausprägung der Aktion abhängen, die zu dem Portfolio hinzugefügt werden soll, sondern auch von den Kriterienausprägungen der Aktionen, die bereits Teil des Portfolios sind. Dies ist der Fall, wenn die Kriterienausprägungen des Portfolios z. B. aus dem Durchschnitt oder dem Minimum der Kriterienausprägungen bestimmt werden (Vetschera und Almeida, 2012). Ein Beispiel für eine nicht-monotone Funktion ist die Durchschnittsfunktion, z. B.

$$g_j(p) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m g_j(a_i), \quad (3.33)$$

d. h. die Kriterienausprägung des Portfolios in Bezug auf ein Kriterium ist der Durchschnitt der Kriterienausprägungen der Aktionen.

### 3.7.2.3 Unbestimmbare Kriterien

Neben den oben eingeführten monotonen und nicht-monotonen Aggregationsmethoden gibt es auch Fälle, bei denen die Kriterienausprägung des Portfolios nicht als Funktion der Kriterienausprägungen der Aktionen angegeben werden kann. Für diese Art von Kriterien kann ein Wert erst mit der Betrachtung, d. h. nach der Erzeugung des Portfolios, bestimmt werden. Aus diesem Grund werden im Folgenden die beiden Kategorien von Kriterien um die unbestimmbaren Kriterien erweitert. Der Umgang mit unbestimmbaren Kriterien stellt in der aktuellen wissenschaftlichen Literatur zu mehrkriteriellen Portfolioentscheidungen ein Forschungsdesiderat dar.

Die unbestimmbaren Kriterien bei der mehrkriteriellen Portfolioserzeugung wurden zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht in der wissenschaftlichen Literatur untersucht. Im Folgenden wird der Einfluss von unbestimmbaren Kriterien auf die Portfolioserzeugung dargestellt, so dass diese im anschließenden berücksichtigt werden können.

Ein Beispiel für ein unbestimmbares Kriterium ist die Amortisationszeit in Portfolios aus Aktionen, die sich nicht aus den Amortisationszeiten der einzelnen Aktionen ermitteln lässt, sondern aus den Kosten, Cashflows, etc. für das Portfolio als Ganzes bestimmt werden muss. Ein weiteres Beispiel sind quantitativ erhobene Daten zu Aktionen, wie Ergebnisse aus Umfragen, Einschätzungen von Expertinnen und Experten zu bestimmten Kriterien und Ergebnisse aus Optimierungsmodellen und Simulationsmodellen.

Mit der additiven Modellformulierung von PROMETHEE V in Gleichung 3.17 lassen sich in der Portfolioerstellung nur additiv monotone Kriterien berücksichtigen, bei denen sich die Kriterienausprägungen des Portfolios aus der Summe der Kriterienausprägungen der Aktionen ergeben (Vetschera und Almeida, 2012). Nicht-monotone und unbestimmbare Kriterien werden somit in dem Vorgehen als monotone Kriterien behandelt, was dazu führen kann, dass PROMETHEE V weniger präferierte Portfolios erzeugt, da die Bewertung des erstellten Portfolios nicht den eigentlichen Fall widerspiegelt.

Synergien zwischen Aktionen können in der Portfolioerstellung mit PROMETHEE V ebenfalls nicht direkt berücksichtigt werden, da die Auswahl der Aktionen auf Grundlage der Bewertungen mit PROMETHEE II getätigt wird und die Synergieeffekte nicht in diesem relativen Wert ausgedrückt werden können. Die einzige Möglichkeit, Synergien in der Portfolioerstellung zu beachten, ist es, die Auswahl von zwei Aktionen als neue Aktion, die den Kriterienausprägungen beider Aktionen und dem Synergieeffekt entspricht, in das Portfolioauswahlproblem einzuführen (z. B. Markl-Hummel und Geldermann, 2014). Dafür müssen zusätzliche Nebenbedingungen für die logischen Zusammenhänge zwischen den Aktionen aufgestellt werden. Problematisch an diesem Ansatz ist, dass die Problemgröße und -komplexität durch die neue Alternative anwächst, da mehr paarweise Vergleiche durchgeführt werden müssen und es mehr mögliche Portfolios gibt. Außerdem kann das Hinzufügen einer neuen Alternative zu dem Entscheidungsproblem, wie von Verly und Smet (2013) gezeigt wurde, zu Rank-Reversals führen.

### 3.7.3 Adaptionmöglichkeiten von PROMETHEE V

Zuvor wurde gezeigt, dass die Erstellung eines Portfolios aus den Aktionen mit Problemen behaftet ist. Ein Ansatz, der anstelle der Portfolioerstellung verwendet werden kann, ist die Einschränkung der Portfoliobewertung auf vielversprechende Portfolios mit bestimmten Eigenschaften. Die zuvor vorgestellten Probleme in der Anwendung von PROMETHEE V sind in der wissenschaftlichen Literatur bekannt (z. B. Almeida und Vetschera, 2012; Fontana und Morais, 2013; Kandakoglu u. a., 2020; Vetschera und Almeida, 2012). So haben sich bereits einige Autoren damit beschäftigt, das Vorgehen in der Portfolioauswahl mit PROMETHEE anzupassen, um bessere Ergebnisse zu erzielen. Diese Anpassungen von PROMETHEE sind nicht exklusiv, sondern können auch miteinander kombiniert werden. Diese Probleme betreffen insbesondere die Zielfunktion 3.17 und teilweise auch den Umgang mit nicht-

monotonen Aggregationsfunktionen. Im Folgenden werden die Lösungsansätze der Literatur diskutiert. Diese beinhalten eine Modifikation der Zielfunktion, die Betrachtung von  $c$ -optimalen Portfolios und das Bestimmen von Grenzportfolios.

### 3.7.3.1 Modifikation der Zielfunktion

Das Problem der negativen Zielfunktion in der Portfolioerstellung mit PROMETHEE V wurde z. B. von Mavrotas u. a. (2006) identifiziert und behandelt. Für den Fall, dass die gegebenen Restriktionen an das Portfolio streng genug sind, sodass die Aktionen mit einem negativen Nettofluss  $\phi_a$  nicht für das Portfolio in Erwägung gezogen werden, kann mit dem ursprünglichen Modell weiter verfahren werden. Die Entscheidung für das Portfolio wird nur unter den Aktionen mit positivem Nettofluss getroffen (Fontana und Morais, 2013). Für den Fall, dass alle Aktionen gute Kandidaten für das Portfolio darstellen, sollten Modifikationen an der Methode vorgenommen werden.

Eine Möglichkeit, das Problem mit den negativen Koeffizienten in der Zielfunktion zu lösen, ist die Addition einer Konstante  $t \in \mathbb{R}_+$  auf den Nettofluss  $\phi$ . Damit Aktionen mit einem negativen Nettofluss in der Portfolioerstellung mit PROMETHEE V berücksichtigt werden, muss der Nettofluss so skaliert werden, dass er positiv ist, d. h.  $\phi'(a) \geq 0 \forall a \in A$ . Da der Nettofluss einer Alternative im Intervall  $[-1, 1]$  liegt, wird er durch die Addition von  $t = 1$  für alle Aktionen positiv (Mladineo u. a., 2017; Pohl u. a., 2020a). Der sogenannte Phi-Score ist definiert als

$$\phi'(a) = \frac{\phi^+(a) + (1 - \phi^-(a))}{2}. \quad (3.34)$$

Der Phi-Score  $\phi'(a)$  liegt im Intervall  $[0, 1]$ . Daher werden jetzt alle Aktionen in der Erstellung eines Portfolios berücksichtigt (Mladineo u. a., 2017; Pohl u. a., 2020a; Vetschera und Almeida, 2012).

Die Transformation des Nettoflusses aus Gleichung 3.34 hat keine Auswirkungen auf die Rangfolge der Aktionen. Jedoch beeinflusst sie die Portfolioerzeugung mit PROMETHEE V (Almeida und Vetschera, 2012). Die Addition einer allgemeinen Konstante  $t$  auf den Nettofluss führt dazu, dass bei der Erzeugung der Portfolios größere Portfolios bevorzugt werden. Durch die Addition der Konstante verändert sich die Zielfunktion zu

$$ZF = \sum_{i=1}^m (\phi_i + t)x_i = \sum_{i=1}^n \phi_i x_i + t \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.35)$$

Der zweite Term führt dazu, dass große Portfolios besser bewertet werden als kleinere (Almeida und Vetschera, 2012).

### 3.7.3.2 $c$ -optimale Portfolios

Ein alternativer Ansatz zur Modifikation der Zielfunktion, ist es, eine Portfoliogröße  $c$  in der Portfolioerstellung festzulegen. Durch die Auswahl einer festen Portfoliogröße  $c$  werden in der Erstellung eines Portfolios auch Alternativen mit negativen Nettoflüssen  $\phi_a$  in die Portfolios aufgenommen, um die notwendige Anzahl von Alternativen für das

Portfolio zu erreichen. Für die Umsetzung dieser Anpassung von PROMETHEE V muss zu dem mathematischen Modell des Rucksackproblems die Nebenbedingung in Gleichung 3.36 hinzugefügt werden. Ansonsten bleibt das mathematische Modell unverändert (Vetschera und Almeida, 2012). Die Nebenbedingung (Gleichung 3.36) sagt aus, dass die Anzahl der ausgewählten Alternativen, welche durch die binären Variablen  $x_i$  dargestellt werden, der festgelegten Portfoliogröße  $c$  entsprechen muss

$$\sum_{i=1}^n x_i = c. \quad (3.36)$$

Die optimale Lösung des Modells für eine Portfoliogröße  $c$  wird als  $c$ -optimales Portfolio bezeichnet. Da vorab nicht bekannt ist, welches der  $c$ -optimalen Portfolios präferiert wird, sollte in der Suche nach einer Lösung die Portfoliogröße  $c$  systematisch variiert und das  $c$ -optimale Portfolio mit dem höchsten Nettofluss  $\phi_\alpha$  als Ergebnis gewählt werden. Alternativ können alle  $c$ -optimalen Portfolios erneut mit PROMETHEE II bewertet werden (Vetschera und Almeida, 2012).

### 3.7.3.3 Betrachtung von Grenzportfolios

Eine weitere Art von vielversprechenden Portfolios sind die sogenannten Grenzportfolios. Vetschera und Almeida (2012) stellen das Konzept des Grenzportfolios vor und definieren ein Grenzportfolio als ein Portfolio, zu dem, ohne eine Restriktion zu verletzen, keine weiteren Aktionen hinzugefügt werden kann. Die Einschränkung der Betrachtung auf Grenzportfolios bietet sich besonders bei Problemen mit rein additiv monotonen Kriterien an, da das optimale Portfolio für Probleme mit diesem Aufbau unter Garantie ein Grenzportfolio ist (Vetschera und Almeida, 2012). Dies kann damit begründet werden, dass bei Problemen mit diesem Aufbau das Hinzufügen einer Aktion zum Portfolio mit Bestimmtheit zu einer Steigerung der Kriterienausprägung des Portfolios führt. Somit existiert für jedes Portfolio  $p$ , das kein Grenzportfolio ist, mindestens ein Grenzportfolio  $q$ , das in allen Kriterien gleichwertig oder besser ist, und für das die Portfoliobestandteile von Portfolio  $p$  eine Teilmenge sind. Dies bedeutet, dass das optimale Portfolio ein Grenzportfolio sein muss, denn wäre es kein Grenzportfolio, würde ein größeres Portfolio existieren, welches zwangsweise besser ist. Das Portfolio wäre somit nicht optimal (Vetschera und Almeida, 2012).

Durch die Einschränkung der Betrachtung auf die Grenzportfolios wird die Menge an Portfolios, die mit PROMETHEE II bewertet werden muss, kleiner als bei der Bewertung aller Portfolios. Die Ordnung nach PROMETHEE der Grenzportfolios ist somit schneller zu bestimmen. Allerdings ist unklar, um wie viel schneller der Ansatz funktioniert, da die Menge an Grenzportfolios von der Art und Anzahl der Restriktionen des Problems abhängig ist.

Dieser Ansatz unterliegt zwar nicht denselben Problemen wie die Methoden, die Portfolios aus den Alternativen erstellen, allerdings ist der Ansatz auch nicht problemfrei. So ist das optimale Portfolio nur in der Menge der Grenzportfolios enthalten, wenn alle Kriterien monoton sind. Werden hingegen nicht-monotone oder unbestimmbare Kriterien betrachtet, muss das optimale Portfolio nicht mehr ein Grenzportfolio sein. Zudem können zwischen der



totalen Ordnung aller Grenzportfolios und der totalen Ordnung aller zulässigen Portfolios nach PROMETHEE II Rank-Reversals auftreten, da die Grenzportfolios nur eine Teilmenge aller Portfolios  $P$  darstellen. Ob diese Ordnung eher den Präferenzen des Entscheidungsträgers oder Entscheidungsträgerin entspricht, ist unklar. Bei einer Anwendung dieser Methode zur Portfolioerstellung sollte eine intensive Kommunikation mit dem Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerin die Portfolioauswahl unterstützen.

Alternativ ist es auch möglich, gezielt Grenzportfolios auf Basis von PROMETHEE V zu erstellen. Hierfür muss die Nebenbedingung

$$\sum_{i=1}^n g_r(a_i)x_i + \min_{j \in A} ((1 - x_j) g_r(a_j) + \text{BigM}x_j) > \beta_r \quad r \in T \quad (3.37)$$

in das Rucksackproblem eingeführt werden. Hierbei bezeichnet  $\text{bigM}$  eine große Konstante. Die Nebenbedingung sagt aus, dass in das Portfolio keine Aktion  $i$  hinzugefügt werden darf, ohne eine der Restriktionen  $\beta_r$  zu verletzen. Um dies zu überprüfen, reicht es bereits aus, die Aktion zu betrachten, welche den geringsten Ressourcenbedarf hat, aber nicht Teil des Portfolios ist. Dies wird in Gleichung 3.37 erreicht, indem die Kriterienausprägungen  $g_r(a_i)$  der Aktion  $i$ , die bereits Teil des Portfolios sind, bei der Ermittlung des minimalen Verbrauchs einen großen Wert  $\text{bigM}$  annehmen. Die Ermittlung des Minimums findet nur unter den Aktionen statt, die nicht Teil des Portfolios sind. Gilt Gleichung 3.37, bedeutet dies, dass keine weitere Aktion in das Portfolio hinzugefügt werden kann und das Portfolio ein Grenzportfolio ist. Diese Nebenbedingung muss iterativ für verschiedene einschränkende Ressourcen definiert und das Modell gelöst werden. Als Ergebnis jedes Optimierungslaufs erhält man ein Grenzportfolio nach Vetschera und Almeida (2012).

### 3.8 ENTWICKLUNG EINER METHODE FÜR PORTFOLIOENTSCHEIDUNGEN MIT UNBESTIMMBAREN KRITERIEN

Eine wissenschaftliche Untersuchung von unbestimmbaren Kriterien bei mehrkriteriellen Portfolioentscheidungen konnte im Rahmen einer intensiven Literaturrecherche nicht identifiziert werden. Unbestimmbare Kriterien sind Kriterien, deren Kriterienausprägungen eines Portfolios aus Aktionen nicht als Funktion der Kriterienausprägungen der Aktionen dargestellt werden können. Unbestimmbare Kriterien treten in vielen praxisnahen Problemen der mehrkriteriellen Portfolioentscheidung auf (z. B. Pohl u. a., 2020a). Um unbestimmbare Kriterien in den Prozess der Portfolioerstellung zu integrieren, müssen die Methoden entsprechend angepasst werden. Da die Kriterienausprägung der unbestimmbaren Kriterien nicht über Funktionen dargestellt werden können, ist eine direkte Berücksichtigung dieser Kriterien bei der Erzeugung der Portfolios nicht möglich. Die Kriterienausprägungen für die einzelnen Portfolios müssen nach der Erstellung und erneuter Analyse des Entscheidungsproblems bestimmt werden.

Betrachtet man mehrkriterielle Portfolioentscheidungen mit unbestimmbaren Kriterien, sind die von Almeida und Vetschera (2012) identifizierten Methoden, d. h. die Berechnung

von Grenzportfolios und die Erzeugung von  $c$ -optimalen Portfolios, wenig geeignet. Eine Anwendung dieser Methoden führt dazu, dass im Anschluss die Kriterienausprägungen von sehr vielen Portfolios erneut bestimmt werden müsste. Dies kann schnell über die ursprüngliche Bestimmung der Kriterienausprägungen der Aktionen hinaus gehen. Es ist also sinnvoll, eine Methode zu verwenden, die nur wenige, aber höchstwahrscheinlich gute Portfolios bestimmt.

Die hier entwickelte Methode ist im folgenden Kapitel in einen strukturierten Prozess der mehrkriteriellen Portfolioerzeugung integriert. Die Methode basiert auf der Idee, dass durch PROMETHEE V bei modifizierter Zielfunktion und einer großen Anzahl von monotonen Kriterien gute Portfolios erzeugt werden. Da die Modifikation der Zielfunktion durch den Phi-Score zu einer besseren Bewertung großer Portfolios führt, werden hier die Nettoflüsse der Aktionen möglichst wenig modifiziert, d. h. durch

$$\Phi'(a) = \Phi(a) + t \quad (3.38)$$

mit

$$t = \min_{a \in A} \phi(a). \quad (3.39)$$

Die hier bestimmte Bewertung  $\Phi'$  wird im Folgenden weiterhin als Phi-Score bezeichnet. Das vom Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerin präferierte Portfolio hat sicherlich einen hohen Zielfunktionswert<sup>12</sup>; allerdings muss es nicht das Portfolio mit dem größten Phi-Score sein. Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass das so erzeugte Portfolio auch das präferierte Portfolio ist, werden mithilfe des Optimierungsmodells mehrere gute Portfolios erstellt und anschließend mit PROMETHEE II bewertet. Das Vorgehen ist in Abbildung 3.10 dargestellt.

Das Optimierungsmodell basiert auf dem Modell von PROMETHEE V und ist im Folgenden dargestellt. Gegeben seien eine Menge an Aktionen  $a_i \in A$ , die mithilfe von PROMETHEE II bewertet wurden. Darüber hinaus sei  $\phi_a$ ,  $a \in A$  der Nettofluss der Aktion  $a$  und  $t = \min_{a \in A} \phi_a$  der Wert des kleinsten Nettoflusses. Die Einschränkungen und Abhängigkeiten zwischen den Aktionen können über allgemeine Ungleichungen der Form  $\sum_{i=1}^n \lambda_{qi} x_i \sim \beta_q$

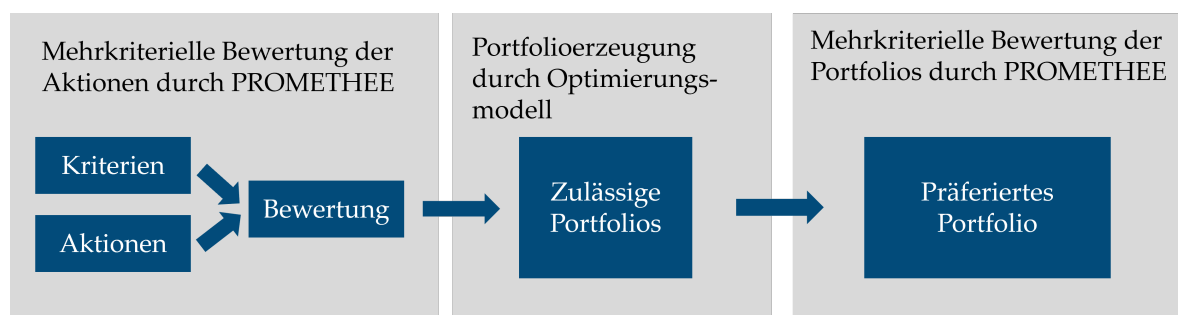


Abbildung 3.10: Ablauf der Portfolioerzeugung. Eigene Darstellung.

12 Der Phi-Score des Portfolios ist hier die Summe der Phi-Scores der enthaltenen Aktionen, d. h. die Zielfunktion des Optimierungsmodells aus Gleichung 3.35

für gegebene  $\lambda_q$  und  $\beta_q$  dargestellt werden. Dann berechnet das folgende Modell ein Portfolio aus den Aktionen:

$$\max \sum_{i=1}^n (\phi(a_i) + t)x_i \quad (3.40)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \lambda_{qi}x_i &\sim \beta_q \quad q = 1, 2, \dots, Q \\ x_i &\in \{0, 1\} \quad \forall i = 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (3.41)$$

Um iterativ mehrere gute Portfolios zu erzeugen, können *integer-Cuts* verwendet werden. Die Idee ist es, in jeder Iteration die zuvor gefundene Lösung zu verbieten, um im anschließenden Durchlauf die nächstbeste Lösung zu finden. So wird iterativ eine zuvor festgelegte Anzahl an guten Lösungen für das Optimierungsmodell erzeugt. Die integer-Cuts sind hier Nebenbedingungen, die eine bestimmte Lösung im Optimierungsmodell ausschließen. Hierfür sei  $x^*$  eine Lösung des Modells, die im folgenden Durchlauf ausgeschlossen werden soll. Dann kann durch die folgende Nebenbedingung die Lösung  $x^*$  verboten werden:

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^n |x_i - x_i^*| \neq 0 \\ \Rightarrow &\sum_{i=1}^n |x_i - x_i^*| \geq 1 \\ \Rightarrow &\sum_{\{i|x_i^*=0\}} x_i + \sum_{\{i|x_i^*=1\}} (1 - x_i) \geq 1 \\ \Rightarrow &\sum_{\{i|x_i^*=1\}} x_i - \sum_{\{i|x_i^*=0\}} x_i \leq |\{i | x_i^* = 1\}| - 1. \end{aligned} \quad (3.42)$$

Die obige Berechnung gilt nur für binäre Entscheidungsvariablen  $x_i \in \{0, 1\}$ . Alternativ zu dieser Nebenbedingung bieten viele aktuelle Solver für Optimierungsprobleme Funktionen an, die mehrere Lösungen der Programme erzeugen. Diese können im Lösungsprozess des ganzzahligen Modells durch weitere Suche im Branch-and-Cut<sup>13</sup> Baum gefunden werden und führen damit schneller zum Ergebnis.

Das hier vorgestellte Modell wird im folgenden Abschnitt in den bekannten strukturierten Ablauf für Portfolioentscheidungen eingebettet.

### 3.9 DER STRUKTURIERTE ABLAUF VON PORTFOLIOENTSCHEIDUNGEN

Mehrkriterielle Portfolioentscheidungen wurden in der aktuellen wissenschaftlichen Literatur nicht intensiv untersucht. So gibt es nur wenige Analysen verschiedener Methodiken

<sup>13</sup> Das Branch-and-Cut-Verfahren ist ein Verfahren der kombinatorischen Optimierung zur Lösung ganzzahliger Optimierungsmodelle. Aufgrund der hohen Adaptionenmöglichkeiten wird es von allen aktuellen Solvoren für Optimierungsmodelle implementiert (vgl. z. B. Wolsey, 2014).

und Anwendungen (Liesiö u. a., 2020). Neben einigen Anwendungsfällen gibt es wenige theoretische Untersuchungen für spezielle MADM-Methoden, wie in den vorangegangenen Abschnitten dargestellt wurde. Neben den MADM-Methoden ist der strukturelle Ablauf einer MCDA wichtig für das Treffen von fundierten Entscheidungen. Für mehrkriterielle Portfolioentscheidungen gibt es nur wenige Veröffentlichungen, die sich mit der Problemstrukturierung beschäftigen. Einen allgemeinen Ansatz für mehrkriterielle Portfolioentscheidungen wurde von Lahtinen u. a. (2017) entwickelt. Dort wird ein Vorgehen vorgeschlagen, das sehr generisch gehalten ist und das sehr von dem Vorgehen in (Belton und Stewart, 2002) abweicht, um allen Anwendungsgebieten gerecht zu werden. Hierbei werden wichtige Details im Entscheidungsprozess verallgemeinert, so dass der Prozess nur schwer von Entscheidungsträgern und Entscheidungsträgerinnen angewendet werden kann. Aus diesem Grund wird im Folgenden ein strukturiertes Vorgehen für Portfolioentscheidungen entwickelt, das auf der oben vorgeschlagenen Methode beruht (vgl. Abbildung 3.11). Dieser Prozess liegt auch dem Vorgehen der Fallstudie am CTT im folgenden Kapitel 4 zugrunde.

Der Prozess der mehrkriteriellen Portfolioentscheidung beginnt mit der Definition des Portfolioentscheidungsproblems. Hier soll, analog zum Prozess der MCDA, die Entscheidung eingegrenzt und der Entscheidungskontext definiert werden. Dazu gehört eine vorläufige Festlegung der Ressourcenanforderungen und -einschränkungen sowie eine erste Definition der Ziele der Entscheidung. Darüber hinaus werden hier die Entscheidungsträgerin oder der Entscheidungsträger sowie alle weiteren Stakeholder und deren Beteiligung am Entscheidungsprozess festgelegt.

Der nächste Schritt im Entscheidungsprozess besteht aus der Aufstellung der Entscheidungsmatrix und der Bestimmung der Abhängigkeiten zwischen den Aktionen. Bereits hier sei darauf verwiesen, dass auch dieser Prozess als iterativ rückgekoppelter Prozess zu verstehen ist. Auch in diesem Schritt ist eine Änderung der Definition des Portfolioentscheidungsproblems sinnvoll und kann zu einer genaueren Definition führen. Die Entscheidungsmatrix wird analog zum Prozess für allgemeine MCDA-Probleme aufgestellt. Zuerst wird das Zielsystem ermittelt und eine Kriterienhierarchie aufgestellt und anhand dieser dann die möglichen Aktionen abgeleitet. Die Aktionen können dann verwendet werden, um weitere Ziele zu definieren oder zu ändern.

Da bei Portfolioentscheidungen die Interaktionen der Aktionen im Entscheidungsprozess berücksichtigt werden sollen, werden diese im folgenden Schritt ermittelt und definiert. Dieser Schritt wird nur im Rahmen von Portfolioentscheidungen durchgeführt. Darüber hinaus werden mit dem Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerin die Einschränkungen an mögliche Portfolios bestimmt. Hierzu gehören Einschränkungen bzgl. der Kriterienausprägung der Portfolios, z. B. das vorhandene Budget und Ziele, die mindestens erreicht werden sollen. Diese Ziele und Einschränkungen können im weiteren Verlauf durch die iterative Rückkopplung erneut angepasst und verändert werden. Vor allem zum Ende des Entscheidungsprozesses können diese Einschränkungen durch Sensitivitätsanalysen weiter untersucht werden.

Im Anschluss sollte hier bereits festgehalten werden, wie die Kriterienausprägungen der Aktionen im Portfolio aggregiert werden. Die oben eingeführte Einteilung in monotone, nicht-monotone und unbestimmbare Kriterien sollte hier verwendet werden. Im Fall von monotonen und nicht-monotonen Kriterien können die Aggregationsfunktionen bestimmt

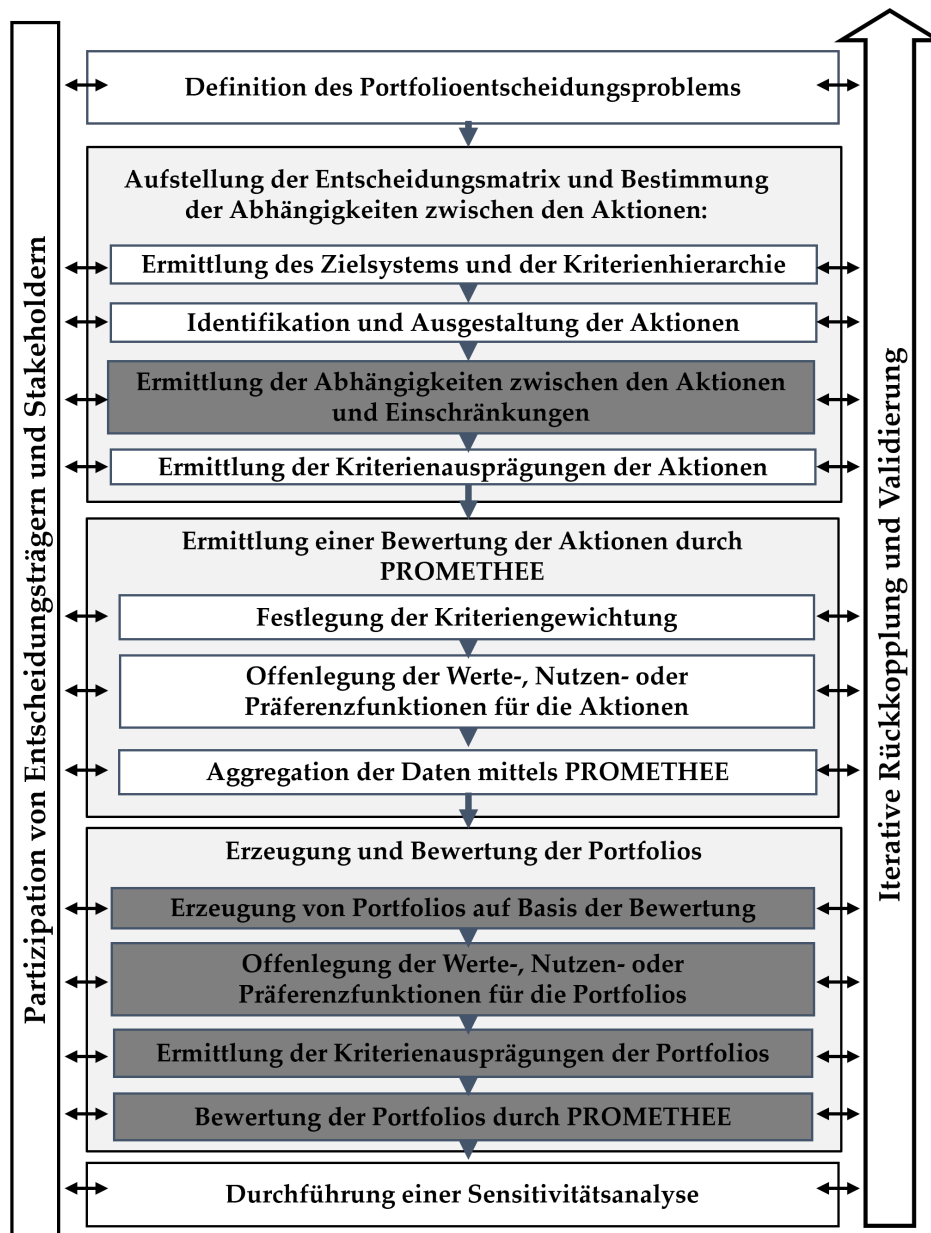


Abbildung 3.11: Der strukturierte Ablauf einer Portfolioentscheidung. Unterschiede zum strukturierten Ablauf der MCDA sind grau hinterlegt. Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Belton und Stewart, 2002; Keeney, 1992; Lahtinen u. a., 2017; Lerche, 2016)

werden. Darüber hinaus kann hier bereits abgeschätzt werden, wie aufwändig die Ermittlung der unbestimmbaren Kriterien der Portfolios ist. Diese Information kann verwendet werden, die Anzahl der Portfolios, die durch das Optimierungsmodell erzeugt werden, zu begrenzen. Je weniger Portfolios erzeugt werden, desto kleiner ist der Aufwand der Bestimmung der Kriterienausprägungen. Allerdings steigt die Möglichkeit, dass das präferierte Portfolio nicht gefunden wird.

Im Anschluss werden nun die Kriterienausprägungen der Aktionen mit Blick auf die Kriterien bestimmt. Die hierzu verwendeten Methoden und Modelle sollten eng mit dem Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerin abgestimmt werden.

Der nächste Schritt besteht nun aus der Bewertung der Aktionen durch [PROMETHEE](#). Hierfür werden zunächst die Kriteriengewichtungen mithilfe des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin bestimmt (vgl. Abschnitt [3.6.1](#)) und die Präferenzfunktionen und deren Parameter für jedes Kriterium festgelegt. Im Anschluss werden die Aktionen mit [PROMETHEE](#) bewertet.

Eine erste Auswertung und Analyse der Ergebnisse kann bereits hier Aufschluss über mögliche gute Portfolios geben. Darüber hinaus kann hier, im Sinne der [MCDA](#), das Ergebnis mithilfe von Sensitivitätsanalysen untersucht und dargestellt werden.

Als nächster Schritt werden nun Portfolios erzeugt und bewertet. Hierfür werden mithilfe des Optimierungsmodells aus Gleichung [3.40](#) und der Nebenbedingung [3.41](#) iterativ mehrere Portfolios erzeugt. Es bietet sich an, erst eine kleine Anzahl, z. B. 2 – 3 Portfolios zu erzeugen. Die so erzeugten Portfolios werden im Anschluss mit [PROMETHEE](#) bewertet. Hierfür müssen erneut die Präferenzfunktionen und deren Parameter bestimmt werden. Da die Bewertungskriterien unverändert bleiben, können die Präferenzfunktionen aus dem vorhergehenden Schritt übernommen werden. Die Kriterienausprägungen für die Portfolios können sich in den Größenordnungen signifikant von denen der Aktionen unterscheiden. Es empfiehlt sich, die Präferenzfunktionsparameter in Zusammenarbeit mit der Entscheidungsträgerin oder dem Entscheidungsträger erneut zu bestimmen oder entsprechend anzupassen.

Falls das Portfolioentscheidungsproblem unbestimmbare Kriterien enthält, müssen diese Kriterienausprägungen für die erzeugten Portfolios erneut ermittelt werden. Hierbei sollte die gleiche Methodik wie bei den Kriterienausprägungen der Aktionen zur Bestimmung verwendet werden. Die anderen Kriterienausprägungen können mithilfe der Aggregationsfunktionen bestimmt werden.

Die erzeugten Portfolios werden nun mit [PROMETHEE](#) bewertet und mithilfe der Sensitivitätsanalysen für [PROMETHEE](#) analysiert. Die Ergebnisse können nun visualisiert mit dem Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerin und den Stakeholdern besprochen werden. Auch bei der Portfolioerzeugung ist ein iterativ-rückgekoppelter Entscheidungsprozess vorgesehen der es erlaubt, die Parameter, Aktionen und Kriterien entsprechend zu überarbeiten. Darüber hinaus können mithilfe des Optimierungsmodells weitere Portfolios erzeugt werden, die dem Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerin präsentiert werden können.

### 3.10 ZUSAMMENFASSUNG

Das Treffen von Portfolioentscheidungen gilt allgemein als anspruchsvolles Problem, da hier mehrere verschiedene Faktoren die Entscheidung beeinflussen können. Ähnlich zu MCDA-Problemen sollen durch eine Portfolioentscheidung mehrere, zumeist konfligierende Ziele erreicht werden. Im Rahmen des Nachhaltigkeitsmanagements in Unternehmen sollen so zum Beispiel die CO<sub>2</sub>e-Emissionen und Betriebskosten gesenkt werden. Auch hier gilt es, diese Ziele gemäß den Präferenzen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin zu berücksichtigen und in die Bewertung des Portfolios mit einfließen zu lassen. Da die Anzahl möglicher Portfolios exponentiell mit der Anzahl an Aktionen steigt, wurde hier eine Methode zur Erzeugung von Portfolios entwickelt und dargestellt, die, mithilfe eines Optimierungsmodells, auf Basis einer mehrkriteriellen Bewertung mit PROMETHEE Portfolios erzeugt. Diese Portfolios werden anschließend erneut mit PROMETHEE bewertet, um das präferierte Portfolio zu bestimmen (vgl. Abbildung 3.11).

Die MCDA-Methode PROMETHEE eignet sich sowohl zur Bewertung der Aktionen als auch Portfolios, da sie keine hohen Anforderungen an den Entscheidungsträger bzw. die Entscheidungsträgerin stellt und einfach anzuwenden ist (vgl. Abschnitt 3.6). Insbesondere ist die Methode nur teilweise kompensierend, so dass Kriterien verschiedener Unterziele oder Ziele nicht, oder nur teilweise miteinander verrechnet werden. Dies ist insbesondere bei Entscheidungsproblemen im Nachhaltigkeitsmanagement wünschenswert, da vor allem hier die Verrechnung von ökologischen, ökonomischen und sozialen Zielen nicht erwünscht ist.

Viele Ansätze in der Literatur verwenden nur monotone Kriterien oder behandeln auch nicht-monotone und unbestimmbare Kriterien als monotone Kriterien (vgl. Abschnitt 3.8). Durch das Erstellen von Portfolios mithilfe des Optimierungsmodells und die anschließende erneute Bewertung durch PROMETHEE können erstmals nicht-monotone und unbestimmbare Kriterien bei Portfolioentscheidungen berücksichtigt werden. Insbesondere die Betrachtung von unbestimmbaren Kriterien stellt eine Neuerung dar.

Die entwickelte Methode wurde in ein strukturiertes Verfahren für mehrkriterielle Portfolioentscheidungen integriert, das den Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerin in der Aufbereitung, Strukturierung und Lösung des Portfoliosproblems unterstützt (siehe Abbildung 3.11).





# 4

## PORTFOLIOENTSCHEIDUNGEN AM CONTAINERTERMINAL TOLLERORT

Der Hamburger Hafen ist der größte Seehafen Deutschlands und nach den Häfen in Rotterdam und Antwerpen der drittgrößte in Europa. Über vier Containerterminals im Hafen wurden im Jahre 2021 8,7 Mio. TEU umgeschlagen. Damit gehört der Hafen, gemessen an den umgeschlagenen Containern, zu den 20 größten Häfen der Welt (Hafen Hamburg, 2022). Die Containerterminals im Hamburger Hafen sind das EUROGATE Terminal, das Containerterminal Altenwerder (CTA), das Containerterminal Burchardkai und das Containerterminal Tollerort (CTT). Aufgrund der Vorgaben der Bundesregierung müssen auch die Terminals im Hamburger Hafen ihre Treibhausgasemissionen reduzieren. Darüber hinaus orientieren sich die Terminalbetreiber an den SDGs zur ganzheitlichen Verbesserung der Nachhaltigkeit des Terminalbetriebs.

Den Entscheidungsträgern und Entscheidungsträgerinnen in Containerterminals und Häfen sind viele Maßnahmen bekannt, die zu einer potenziellen Steigerung der Energienachhaltigkeit und Reduktion der Umweltwirkung von Häfen und Terminals führen. Eine Analyse der konkreten Auswirkungen der Maßnahmen auf das Terminal und eine fundierte Entscheidungsunterstützung für die Auswahl von Maßnahmenportfolios fehlt allerdings in vielen Veröffentlichungen (vgl. Kapitel 2).

In diesem Kapitel werden Energienachhaltigkeitsmaßnahmen<sup>1</sup> für das CTT vorgestellt, analysiert und mithilfe der Ergebnisse aus Kapitel 3 zu Maßnahmenportfolios zusammengefasst. Dies ermöglicht dem Terminalbetreiber eine fundierte Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl und Umsetzung von Maßnahmen zur Steigerung der Nachhaltigkeit.

In Abschnitt 4.1 wird zunächst ein Überblick über das CTT gegeben. Insbesondere werden die Ziele des Terminalbetreibers, die technische Daten, Verbrauchsdaten und Möglichkeiten zur Reduktion des Energiebedarfs des CTT dargestellt. Im Anschluss werden in Abschnitt 4.2 Maßnahmen zur Steigerung der Energienachhaltigkeit und die dazugehörigen Bewertungskriterien vorgestellt. Darüber hinaus werden die Maßnahmen mit PROMETHEE bewertet. In Abschnitt 4.3 wird auf Basis der Bewertung Maßnahmenportfolios erzeugt und in Abschnitt 4.4 mit Blick auf die Präferenzen des Entscheidungsträgers analysiert. Das Ergebnis ist ein präferiertes Maßnahmenportfolio, das dem Entscheidungsträger zu Umsetzung empfohlen werden kann.

<sup>1</sup> Die in diesem Kapitel dargestellten Energienachhaltigkeitsmaßnahmen, Kriterien und Kriterienausprägungen wurden im Rahmen des Projekts SuStEnergyPort erhoben. Die Experten vom Projektpartner Hamburg Port Consulting GmbH (HPC), des CTTs und aus dem Vorstand der Hamburger Hafen und Logistik AG (HHLA) haben maßgeblich zur Definition des Entscheidungsproblems und dem iterativen Ablauf der Entscheidungsfindung in mehreren Workshops beigetragen. Die Abschlussberichte des Projektes sind in den Veröffentlichungen von Kemme und Schmidt (2020), Lemke u. a. (2020) und Pohl u. a. (2020b) zu finden.

## 4.1 CONTAINERTERMINAL TOLLERORT IN HAMBURG

Das CTT wurde im Jahr 1977 eröffnet und im Jahr 1994 von der HHLA übernommen (Hamburg Hafen Logistik AG, 11.05.2022a). Zwischen 1999 und 2003 wurde das CTT auf die heutige Größe erweitert (Grube, 11.05.2022). Im Jahr 2008 wurde ein neuer Güterbahnhof errichtet, der zu einer signifikanten Steigerung der Terminalkapazität führte (Hafen Hamburg, 2008).

Das CTT erstreckt sich über eine Fläche von 0,6 km<sup>2</sup> mit einer Kaikante von 1.065 m Länge. Dies ermöglicht insgesamt vier Liegeplätze. Das CTT wird mit 14 STS und 61 SCs betrieben. Das CTT verfügt über acht Lkw-Spuren am Tor und 36 Spuren in der Abfertigung. Neben der Abfertigung der Lkw verfügt das CTT über drei schienengebundene Portalkrane, die insgesamt fünf Gleise bedienen. Abbildung 4.1 gibt einen Überblick über das CTT. Das CTT ist ein eher typisches Terminal mit einem horizontalen Transportsystem auf Basis von SCs, wie es in Kapitel 2 dargestellt wurde.

### 4.1.1 Entscheidungen zur Energienachhaltigkeit am CTT

Als Betreiberin verschiedener Terminals versucht die HHLA bis zum Jahr 2040 klimaneutral zu handeln (Hafen Hamburg, 2008). Dies soll zum einen durch die Verwendung klimaneutralen Stroms und Kompensation aller anderen Emissionen erreicht werden. Die Nachhaltigkeitsstrategie der HHLA besteht aus den folgenden Handlungsfeldern, die sich stark an den in Abschnitt 2 diskutierten SDG orientieren (Hamburg Hafen Logistik AG, 11.05.2022b):

- klimafreundliche Logistikketten,
- Umwelt- und Ressourcenschutz,
- Gesundheits- und Arbeitsschutz,
- gesellschaftliches Engagement,
- Geschäftspartner und nachhaltige Geschäftsbeziehungen,
- Flächenschonung,
- Klimaschutz und Energieeffizienz,
- Arbeitswelt und
- Wertschöpfung und Innovation.

Mit Blick auf den Klimaschutz und der Energieeffizienz, Gesundheits- und Arbeitsschutz sowie Umwelt- und Ressourcenschutz gilt es dementsprechend, die eigenen Terminals umzurüsten. Im Falle des CTT, das bereits seit mehreren Jahren im Betrieb ist und somit ein vorgegebenes Terminallayout besitzt, gilt es Maßnahmen umzusetzen, die die Emissionen und Umweltwirkungen reduzieren. Neben den CO<sub>2</sub>e Emissionen werden auch andere Emissionen, wie z. B. Feinstaubemissionen und Sommersmog, berücksichtigt.

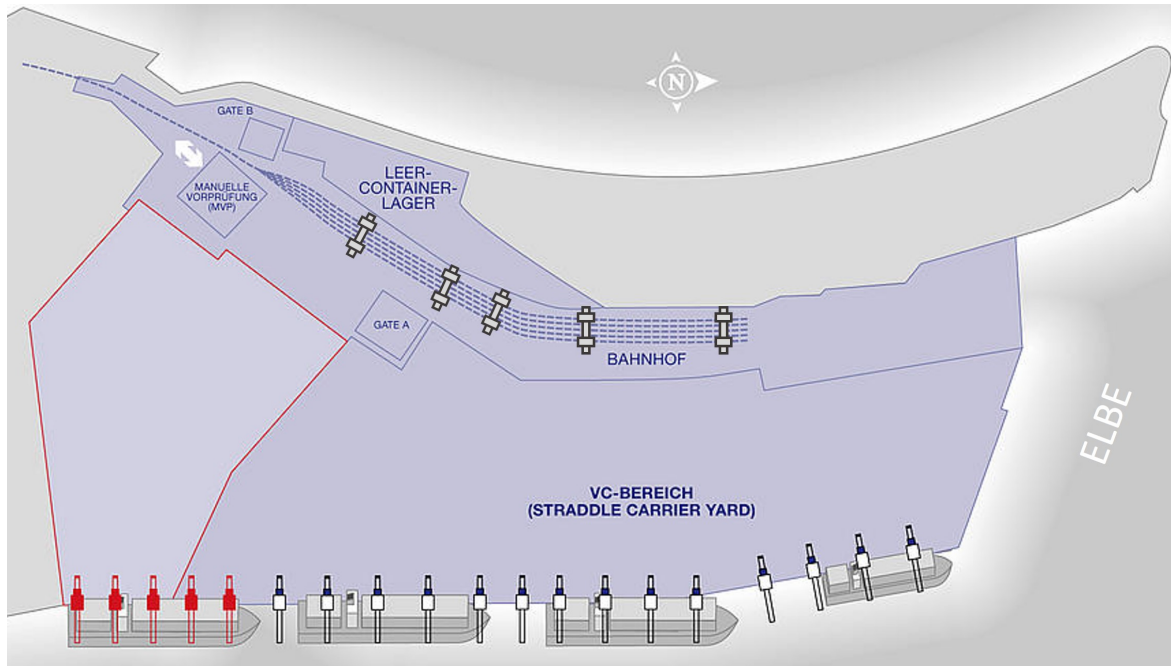


Abbildung 4.1: Layout des CTT. Quelle: (HHLA, 2022)

Betrachtet man das vorliegende Portfolioentscheidungsproblem, ist es nicht ohne Weiteres möglich, einen Entscheidungsträger oder eine Entscheidungsträgerin zu identifizieren. Aus operativer Sicht ist die HHLA verantwortlich für alle Entscheidungen, die das Terminal betreffen. Allerdings befindet sich das CTT im Hamburger Hafen und unterliegt somit der Hamburger Hafenbehörde, engl. Hamburg Port Authority (HPA). Die HPA ist als Behörde verantwortlich für das Hafenmanagement der Stadt Hamburg, insbesondere für die Hafenentwicklung und Unterhaltung der Infrastruktur. Vor allem im Bereich der Installation von neuen Anlagen, wie z. B. eine Landstromversorgung (vgl. z. B. Maßnahme A3 in Kap. 4.2.1), die zur Infrastruktur der Terminals zählt, kann die HPA mitbestimmen.

Weiterhin betreffen einige Maßnahmen nicht nur den Terminal, sondern benötigen auch eine Umrüstung der Containerschiffe. Betrachtet man diese Maßnahmen, gehören die Eigner und Reeder der Schiffe auch zu der Gruppe der Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen.

Der Hafen Hamburg und insbesondere das CTT befinden sich sehr nah am Stadtzentrum. Maßnahmen, die z. B. einen Einfluss auf die Luftqualität am und in der Umgebung des Terminals haben, betreffen auch umliegende Anwohner und Menschen in der Stadt.

Weitreichende Entscheidungen am Terminal betreffen mehrere Akteure im Hafen und in dessen Umgebung. Die Identifizierung eines Entscheidungsträgers oder einer Entscheidungsträgerin ist also nur schwer möglich. Im vorliegenden Fall wird daher nur der Einflussbereich des Hafensbetreibers, d. h. das Terminalgelände an sich betrachtet. Die Systemgrenzen der folgenden Portfolioentscheidung orientieren sich am Terminalgelände. Die Entscheidungsträger werden hier durch ein Konsortium aus einem Vorstandsmitglied der HHLA, verschiedenen Experten des CTT und Projektmitgliedern von HPC gestellt. Diese werden im

Folgenden als Entscheidungsträger im Prozess der mehrkriteriellen Portfolioentscheidung betrachtet. Nichtsdestotrotz werden auch durch dieses Entscheidungsgremium die Interessen der anderen Stakeholder basierend auf den Erfahrungswerten der Vorstandsmitglieder und Berater berücksichtigt.

Das Ziel der Entscheidung ist die Identifizierung des Maßnahmenportfolios, das aus Sicht des Hafensbetreibers am sinnvollsten umgesetzt werden sollte. Hierbei sollen zunächst andere Akteure, z. B. Reeder und die [HPA](#) nicht berücksichtigt werden. Nichtsdestotrotz werden auch Maßnahmen betrachtet, die über die gerade definierte Systemgrenze hinausgehen. Falls diese Maßnahmen im präferierten Portfolio enthalten sind, müssen diese entsprechend mit der Unterstützung der anderen Akteure umgesetzt werden.

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick des [CTT](#) und stellt insbesondere den aktuellen Energiebedarf des Terminals dar.

#### 4.1.2 Überblick und aktueller Energiebedarf des CTT

Im Folgenden werden die größten Energieverbraucher des [CTT](#) für einen ersten Überblick dargestellt. Die Daten wurden im Rahmen des Projektes [SuStEnergyPort](#) erhoben. [Abbildung 4.2](#) zeigt den ermittelten Energiebedarf über ein Jahr pro umgeschlagenen Container. Hierbei wird deutlich, dass der Energiebedarf proportional zur Außentemperatur in den Wintermonaten steigt. Darüber hinaus sinkt der Energiebedarf bei steigenden Temperaturen im April und Mai. Analog steigt der Energiebedarf bei fallenden Temperaturen im August und September. In den Sommermonaten Juni und Juli steigt der Energiebedarf pro umgeschlagenen Container wieder, da hier viel elektrische Energie zum Kühlen der Kühlcontainer benötigt wird. Der Energieverbrauch ist damit größtenteils über den Zusammenhang von Wärmeenergie und benötigter Heizleistung für die Gebäude zu erklären. Die Last der elektrischen Energie verläuft nicht proportional zur Temperatur, da diese nur wenig zum Heizen verwendet wird und sich gleichmäßig über mehrere Verbraucher verteilt. Die unregelmäßige Last der elektrischen Energie kann am ehesten über die Menge an umgeschlagenen Containern und den Kühlcontainern erklärt werden (Pohl u. a., [2020b](#)).

Das [CTT](#) benötigt pro Jahr ca. 40 - 60 MWh Energie (elektrische Energie und Wärmeenergie), die von fixen und variablen Verbrauchern benötigt wird. Zu den fixen Energieverbrauchern am [CTT](#) gehören allgemeine Großgeräte, die Terminalbeleuchtung, Verwaltungsgebäude, Werkstätten, HCCR<sup>2</sup>- und Bahnbüro sowie das Zollgebäude und das Parkhaus. Die variablen Verbraucher bestehen aus den [SCs](#), [STS](#), Kühlcontainern und Bahnkränen.

Zu den größten Energieverbrauchern insgesamt am [CTT](#) gehören die [SCs](#), die ca. 70 % der Jahresenergie benötigen. Von den 61 [SCs](#) am Terminal sind die meisten älter als zehn Jahre (Pohl u. a., [2020b](#)). Der Energiebedarf der [SC](#) variiert je Modell, ist aber nicht vom Alter abhängig. Die [SC](#) werden üblicherweise mit einem dieselektrischen Antrieb angetrieben. Neuere Modelle verwenden Rekuperationsenergie der Brems- und Senkvorgänge für eine folgende Beschleunigung oder sind vollelektrisch. Im Allgemeinen ist der Energiebedarf der [SC](#) stark abhängig von der zurückgelegten Strecke und dem Gewicht der transportierten Container. Die größten Verbraucher elektrischer Energie auf dem Terminal sind die [STS](#)

<sup>2</sup> Container- und Chassis-Reparatur-Gesellschaft mbH

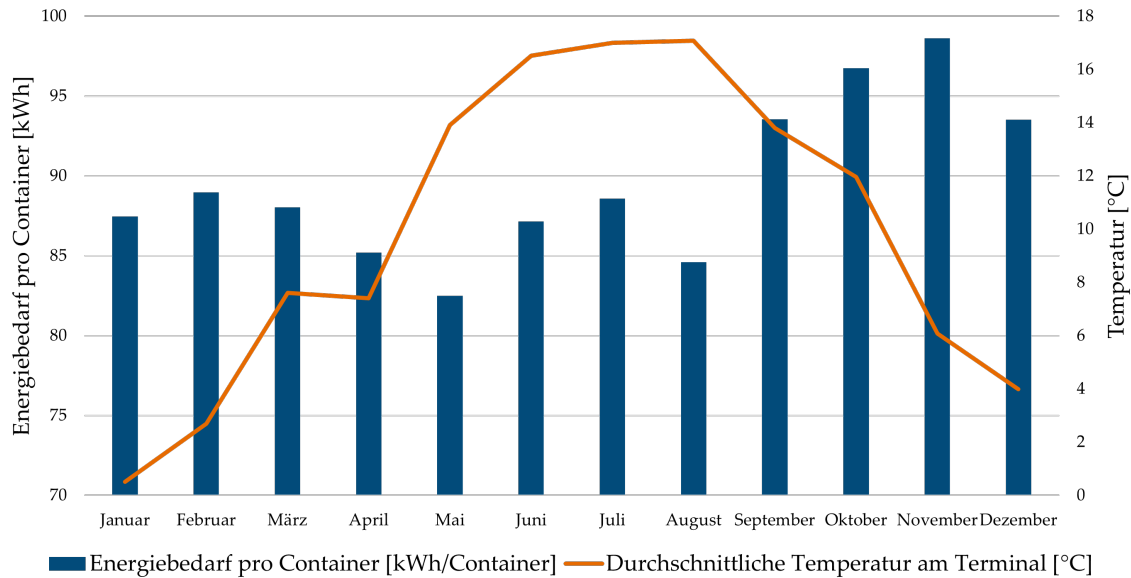


Abbildung 4.2: Energiebedarf und Außentemperatur am CTT. Der Energiebedarf ist dargestellt pro umgeschlagenes TEU. Quelle: (Pohl u. a., 2020b)

mit ca. 10 % des Gesamtbedarfs. Am Kai des CTT stehen insgesamt 14 STS verschiedener Hersteller. Insgesamt gibt es fünf STS des Herstellers Liebherr und fünf von ZPMC, die zusammen die meisten ankommenden Schiffe abfertigen. Eine Analyse im Rahmen des Projektes SuStEnergyPort hat gezeigt, dass die neueren ZPMC STS einen kleineren variablen und einen höheren fixen Strombedarf haben im Vergleich zu den STS von Liebherr.

Mit ca. 5 % des Gesamtenergiebedarfs stehen die Kühlcontainer an dritter Stelle beim Strombedarf des Terminals. Der Strombedarf pro Kühlcontainer ist abhängig vom Container, der benötigten Kühltemperatur und der Außentemperatur (vgl. auch Abbildung 4.2). So steigt der Strombedarf der Container am CTT im Juni und Juli um knapp 70 % im Vergleich zu den Wintermonaten. Auf dem CTT werden die Kühlcontainer auf offener Fläche gelagert.

Die Terminalbeleuchtung benötigt weniger als 5 % der Gesamtenergie eines Terminals. Der Strombedarf ist stark abhängig von den Sonnenstunden, sodass in den Sommermonaten weniger Strom benötigt wird als in den Wintermonaten.

Mit den genannten Energiebedarfen als Durchschnitt über ein Jahr kann nur bedingt auf mögliche Energieeinsparungen auf stündlicher oder täglicher Basis geschlossen werden. Das CTT erhebt diese Daten nicht in dieser Auflösung, sodass sie im Rahmen des Projektes über das Simulationsmodell abgebildet wurden. Abbildung 4.3 zeigt beispielhaft den Energiebedarf des CTT aufgelöst pro Verbraucher über den Zeitraum von einer Woche im Januar.

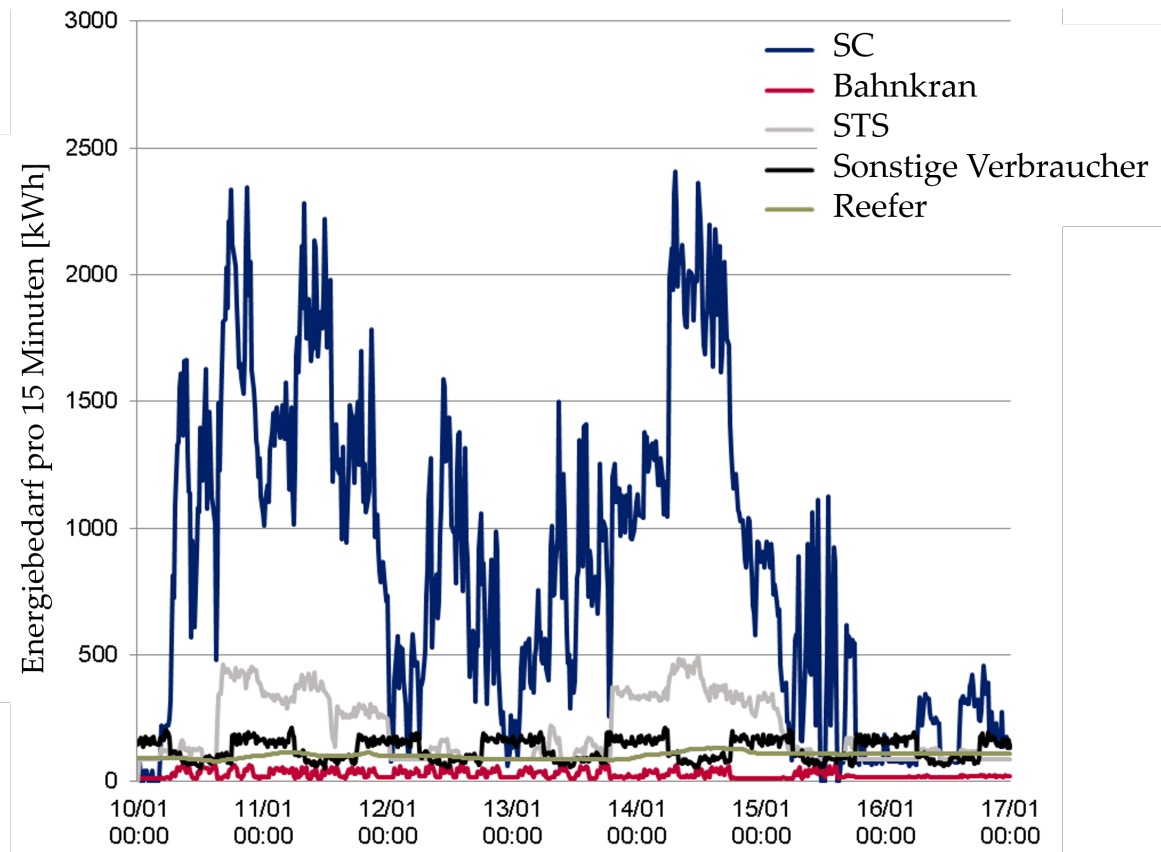


Abbildung 4.3: Energiebedarf des CTT nach Verbraucher für sieben Tage im Januar. Die dargestellten Daten sind aufgelöst in 15-Minuten-Intervallen. Quelle: (Pohl u. a., 2020b)

## 4.2 MEHRKRITERIELLE BEWERTUNG DER MASSNAHMEN DURCH PROMETHEE

Maßnahmen zur Steigerung der Nachhaltigkeit in Containerterminals sollten terminalspezifisch ausgewählt werden (vgl. Kapitel 2). Im folgenden Abschnitt 4.2.1 werden zunächst Nachhaltigkeitsmaßnahmen für das CTT dargestellt. Diese Maßnahmen werden anschließend in Abschnitt 4.2.3 unter einer mit dem Entscheidungsträger abgestimmten Menge an Kriterien analysiert und mit PROMETHEE bewertet. Die für die Bewertung notwendigen Kriterienhierarchie und -gewichte werden in Abschnitt 4.2.2 dargestellt.

### 4.2.1 Bestimmung der Maßnahmen

Die im Rahmen des Projektes *SuStEnergyPort* definierten Maßnahmen wurden in enger Zusammenarbeit mit den Entscheidungsträgern und Experten aus Hafenbehörden und Terminalbetreibern analysiert und mit Bezug auf das Terminal CTT eingeschätzt. Hierbei wurden insgesamt 14 Maßnahmen definiert, die, nach Meinung der Experten, für das CTT sinnvoll umzusetzen sind und sowohl die Emissionen reduzieren und finanziell vertretbar sind. Die Maßnahmen werden im Folgenden näher definiert. Eine nach Terminalbereichen aufgegliederte Übersicht ist in Tabelle 4.1 zu finden.

Die Maßnahme A1 **Installation einer Photovoltaik (PV)-Anlage** auf dem Gelände des Terminals sieht vor, die Dachflächen der Verwaltungsgebäude und Werkstätten des CTT mit Solarmodulen auszustatten. Diese Maßnahme wurde von den Experten und Entscheidungsträgern aus mehreren Gründen ausgewählt. Zum einen kann durch eine PV-Anlage günstig und mit niedrigen Emissionen Strom erzeugt werden, zum anderen besitzt das CTT ausreichend Dachfläche, die eine entsprechend große Anlage zulässt<sup>3</sup>. Die Errichtung von PV-Anlagen in Containerterminals wird auch in anderen Terminals und Veröffentlichungen thematisiert (vgl. z. B. Alzahrani u. a., 2020; Froese u. a., 2014, S. 4). Die nutzbare Dachfläche des CTT beträgt nach eigenen Berechnungen ca. 900 m<sup>2</sup>, die im Rahmen dieser Maßnahme mit PV-Modulen ausgestattet werden sollen (s. Abbildung 4.4).

Bei der Maßnahme A2 **Flüssiggas, engl. liquefied natural gas (LNG) Power Packs** werden die an der Kaimauer liegenden Schiffe mithilfe eines oder mehrerer LNG-Generatoren mit Strom versorgt. Ein mit LNG betriebener Generator, der in einem mobilen Standardcontainer untergebracht ist, ermöglicht es den Schiffen, ihre Hilfsmotoren im Hafen abzuschalten. Der LNG Power Pack kann sowohl auf dem Schiff als auch an Land platziert werden und kann eine Leistung von bis zu 30 MW liefern (z. B. becker marine systems, 2022). Im Hamburger Hafen werden LNG Power Packs bereits für die Stromversorgung von einigen Kreuzfahrtschiffen verwendet, da dadurch vor allem die Stickoxide (NO<sub>x</sub>-Emissionen) gesenkt werden können (HHLA, 2018). Die Maßnahme sieht vor, diese Power Packs auch für Containerschiffe zu verwenden. Ein Vorteil dieser Stromversorgung ist, dass die Containerschiffe schnell

<sup>3</sup> Eine alternative Möglichkeit der Stromerzeugung ist die Errichtung einer Windenergieanlage (vgl. z. B. Gutierrez-Romero u. a., 2019), die allerdings auf dem Gelände des CTT keinen Platz gefunden hätte und aus diesem Grund nicht ausgewählt wurde. Nichtsdestotrotz hat die HHLA im umliegenden Hafengebiet seit 1990 mehrere Windenergieanlagen errichtet (Acciaro u. a., 2014).

**Tabelle 4.1:** Überblick der Energienachhaltigkeitsmaßnahmen für das CTT. Die englische Bezeichnung der Maßnahmen wurde aus dem Forschungsprojekt übernommen. Quelle: (Pohl u. a., 2020b, S. 22)

Nr.	Terminalbereich	Name (engl.)
A1	Bürogebäude	Solar Photovoltaic
A2	Schiff	LNG Power Pack
A3	Schiff	Onshore-Power Supply
A4	Horizontaltransport	Full Electric SCs
A5	Horizontaltransport	Hybrid SCs
A6	Horizontaltransport	SC Speed Controlling
A7	Horizontaltransport	Eco Driving SCs
A8	Horizontaltransport	Pooling
A9	Horizontaltransport	SC Idle Reduction
A10	Kaikräne	LED Floodlights for STS
A11	Kaikräne	STS Eco Driving
A12	Kaikräne	Electric Spreader
A13	Gesamtes Terminal	LED Floodlights and Walkway Lights
A14	Gebäude	Adaptive Lighting Buildings



**Abbildung 4.4:** Für PV geeignete Dachfläche des CTT. Grüne Flächen können mit PV-Modulen ausgestattet werden. Die blauen Flächen sind verschattet, Quelle: Google Maps, eigene Berechnung



umgerüstet werden können, da die Generatoren in der Nähe der herkömmlichen Hilfsmotoren geladen werden können. Als Nachteile werden vor allem der logistische Aufwand, d. h. das auf- und abladen der Power Packs genannt. Dies benötigt weitere Zeit bei der Abfertigung des Schiffes. Ein Containerschiff benötigt für seine Stromversorgung zwei LNG-Generatoren. Da das CTT insgesamt vier Liegeplätze zur Verfügung stellen kann, müssten acht LNG-Generatoren betrieben werden. Nach Rücksprache mit den Entscheidungsträgern und Entscheidungsträgerinnen wurden in dieser Maßnahme nur zwei LNG-Generatoren berücksichtigt, da man nicht davon ausgehen kann, dass alle Schiffe diese Technologie unterstützen werden.

Die Maßnahme A3 **Onshore-Power Supply** sieht die landseitige Versorgung der Schiffe mit Strom vor. Dieser Ansatz der Stromversorgung wird auch mit dem Begriff „Landstrom“ oder „Cold Ironing“ bezeichnet und wurde in der wissenschaftlichen Literatur bereits mehrfach untersucht (vgl. z. B. Ericsson, 2008; Gutierrez-Romero u. a., 2019; Krämer und Czernański, 2020; Wang u. a., 2021). Die Installation dieser Technologie erlaubt es Schiffen am Liegeplatz, den Strom des Terminals zu verwenden. Durch die Verwendung des Netzstroms fallen im Hafen keine lokalen Emissionen an und der Lärm der Schiffe wird reduziert. Eine Reduktion der lokalen Emissionen von 5 % bis 99 % für die Zeit im Hafen werden in der wissenschaftlichen Literatur für die Landstromversorgung bei Schiffen ermittelt (vgl. z. B. Hall, 2010; Winnes u. a., 2015). Für die Landstromversorgung müssen an Terminals Umspannwerke errichtet und die Containerschiffe umgerüstet werden, siehe Abbildung 4.5. Die hohen Investitionen in eine Landstromversorgung stehen hier hohen Emissionsreduktionen bei den Containerschiffen gegenüber. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Installation einer Landstromanlage am CTT durch die HPA erfolgen muss, da die Kaimauer der Hafenbehörde gehört. Die Koordination der Installation liegt also nicht beim Terminalbetreiber. Diese Maßnahme liegt also nicht in den oben definierten Systemgrenzen. Da eine Landstromversorgung der Schiffe in viele Häfen thematisiert wird, wurde sie auch hier betrachtet. Bei einigen Terminals in den USA ist diese Art der Stromversorgung vorgeschrieben (Ericsson, 2008). Eine Landstromversorgung für Containerschiffe gibt es z. B. in Antwerpen und Shanghai (Alamouh u. a., 2020).

Die Maßnahme A4 **Full Electric SCs** beinhaltet die sukzessive Ersetzung der diesel-elektrischen SCs durch batterieelektrische SCs. Elektromotoren bieten mit ihrem hohen Wirkungsgrad und Drehmoment eine sinnvolle Alternative für den Horizontaltransport in Containerterminals (Protic u. a., 2019; Schmidt u. a., 2015b). Darüber hinaus können durch den Einsatz elektrifizierter Geräte sowohl die Emissionen als auch die Lärmbelastung erheblich reduziert werden (Barrero Fernandez u. a., 2013). Idealerweise sollte ein fortgeschrittener Grad der Elektrifizierung Hand in Hand mit der zunehmenden Nutzung erneuerbarer Energien gehen, um einen wirklich emissionsfreien Hafenbetrieb zu gewährleisten. Ein weiterer Vorteil von elektrifizierter Ausrüstung ist die Möglichkeit, sie sowohl in Gebäuden als auch im Freien zu betreiben. Die Elektrifizierung von Umschlaggeräten, wie z. B. Gabelstaplern, benötigt jedoch nicht nur hohe Investitionen in die Ausrüstung, sondern führt auch zu Veränderungen im logistischen Prozess und betrieblichen Ablauf, vor allem aufgrund der Batterieladeprozesse und der Installation von Ladestationen. Die hier dargestellte Maßnahme sieht eine Elektrifizierung der SCs mit Schnellladefunktion und relativ kleiner Batterie vor. Die SCs sollen an Schnellladepunkten mit bis zu 600 kW geladen

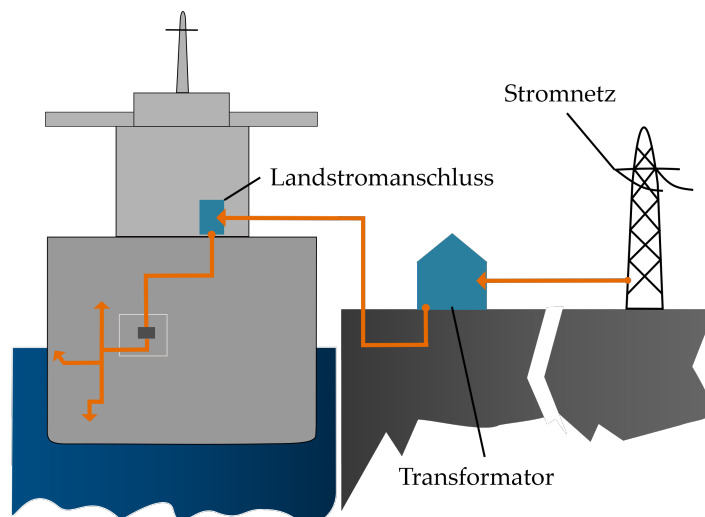


Abbildung 4.5: Konzept der Landstromversorgung eines Schiffes

werden (Leskinen und Häggblom, 2019). Batterieelektrische SCs mit Schnellladefunktion sind erst seit wenigen Jahren erhältlich, z. B. von Kalmar (Kalmar, 2017, 2018).

Eine weitere Möglichkeit der lokalen Emissionsreduktion im Horizontaltransport stellt die Maßnahme A5 **Hybrid SCs** dar. Hier werden die dieselelektrischen SCs durch hybride SCs ersetzt. Als hybride SCs werden SCs bezeichnet, die eine kleine Batterie oder Schwungrad mit kinetischer Energie durch Rekuperation aufladen und diese bei der nächsten Bewegung wieder verwenden. Die Nutzung der Rekuperationsenergie senkt den Dieselverbrauch und daher die lokalen Emissionen. Die Maßnahme sieht vor, die aktuellen dieselelektrischen SCs stückweise, nach Erreichen der Lebensdauer, zu ersetzen. Hierbei können sie ohne Anpassung des Terminals und des logistischen Prozesses ersetzt werden (Alamouh u. a., 2020; Protic u. a., 2019).

Die Maßnahme A6 **Speed Controlling SCs** sieht vor, den Kraftstoffverbrauch der SCs durch technische Reduktion der möglichen Geschwindigkeit zu reduzieren. Nicht jeder Dieselmotor kann die für den Betrieb erforderliche Energie im Bereich seiner optimalen Auslastung liefern. Die SCs am CTT können durch einfache Modifikation entsprechend umgerüstet werden, sodass diese Maßnahme nach Einschätzung der Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen sinnvoll erscheint. Einige Publikationen, die diese Möglichkeiten aufzeigen, geben bis zu 50 % Einsparung bei der benötigten Energie an (Port Equipment Manufacturers Association, 2011). Diese Maßnahme könnte sich allerdings negativ auf den Durchsatz und den allgemeinen logistischen Prozess des Terminals auswirken.

Mit Maßnahme A7 **Eco Driving SCs** sollen die Emissionen im Terminal durch gezielte Schulungen der Mitarbeitenden zum umweltbewussten Fahren gesenkt werden. Diese Maßnahme hat sich in anderen Terminals als sehr wirksam erwiesen, um Treibhausgas-, Lärm- und Luftemissionen zu reduzieren. Das Eco-Driving-Training kann in Form eines Trainings auf der Straße oder mit Simulatoren durchgeführt werden. Dazu gehören vorausschauendes Fahren, um verschiedene Ereignisse vorzusehen und unnötige Stopps zu vermeiden und eine gut geplante Logistik, die Umwege vermeidet, das Fahren mit gleichmäßiger Geschwin-

digkeit, das Fahren und Bedienen der SCs im gleichen Drehzahlbereich und das langsame Beschleunigen und Bremsen (Hippinen und Federley, 2014; Protic u. a., 2019). In den Häfen von Kopenhagen und Malmö wurde durch diese Maßnahme den Dieserverbrauch um bis zu 15 % gesenkt (FEPORT, 2016, S. 17).

Die Maßnahme A8 **SCs Water-Side Pooling** betrifft den logistischen Ablauf auf dem Terminal. In der aktuellen Situation sind die STS bestimmten Gruppen von SCs zugeordnet, von denen sie bedient werden. Diese Zuordnung führt dazu, dass SCs häufig Wartezeiten haben, falls der zugeordnete STS einen anderen SC bedient. Diese Maßnahme sieht vor, die Zuordnung von SCs zu STS aufzuheben, sodass Wartezeiten bei den SCs und STS reduziert werden können. Durch eine Aufhebung der Zuordnung der SCs zu den STS besteht ein hoher Koordinierungsaufwand zwischen den SCs. Ein anschließender Schritt, der hier nicht weiter betrachtet wird, ist die Planung des Einsatzes der SCs auf einer übergeordneten Ebene. Hier bieten sich Modelle der operativen Touren- und Routenplanung an (Stahlbock und Voß, 2008). Diese Maßnahme könnte auf Seiten des Terminals mit wenigen Kosten umgesetzt werden.

Die Maßnahme A9 **Idle Reduction** betrifft, ähnlich zu Maßnahme A6, technische Ausrüstung und Einstellungen der SCs. Durch die Installation von Start-Stopp-Routinen in den SCs sollen der Dieserverbrauch und die Emissionen im Leerlauf gesenkt werden. Die Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen im Hafen bewerten diese Maßnahme als einfach umzusetzen. Allerdings sei auch keine große Senkung in den Emissionen der SCs zu erwarten. Maßnahmen, die die Umrüstung alter Geräte und die damit einhergehend Erhöhung der Effizienz beinhalten, werden in der wissenschaftlichen Literatur wenig untersucht (Alamouh u. a., 2020).

Die Maßnahme A10 **Leuchtdiode, engl. light-emitting diode (LED) Floodlights for STS** betrifft die Terminalbeleuchtung. Hier werden die Natriumdampflampen der STS durch LED ersetzt. Die LED Beleuchtung gilt als vorteilhaft, da diese Lampen deutlich weniger Strom benötigen als vergleichbare Dampflampen. Da LED in vorgefertigten Fassungen geliefert werden, müssen die STS bei dieser Maßnahme umgerüstet werden. Darüber hinaus können die Dampflampen nicht eins zu eins durch LED ersetzt werden, da der Lichtkegel der LED breiter gefächert ist. Die Beleuchtung der STS muss für die LED neu geplant werden. Nach Aussage der Terminalbetreiber können die Kosten für die Umrüstung durch den deutlich geringeren Energiebedarf der LED-Leuchten schnell ausgeglichen werden.

Die Maßnahme A11 **STS Eco Driving**, sieht, analog zur Maßnahme A7, Schulungen der Mitarbeiter zum umweltbewussten Bedienen der Krane vor. Da der Durchsatz eines Terminals an der Kaimauer gemessen wird, sehen die Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen diese Maßnahme kritisch. Eine Reduktion des Durchsatzes des Terminals wirkt sich direkt auf dem Umsatz aus und sollte vermieden werden. Nichtsdestotrotz soll die Maßnahme hier untersucht werden, da der Durchsatz eines Terminals zusätzlich abhängig von der Verfügbarkeit des Horizontaltransports ist.

Die STS verwenden zum Greifen von Containern sogenannte Spreader, die sich in die Aufhängung der Container verkeilen können, um diese zu bewegen. Die Mechanik der Spreader ist hydraulisch, d. h. die Energieübertragung vom STS zur Greifmechanik erfolgt über Flüssigkeiten, insbesondere Öle. Neuere Entwicklung bei Spreadern sehen eine rein elektrische Greifmechanik vor, die in der Maßnahme A12 **Electric Spreader** untersucht

werden soll. Elektrische Spreader reduzieren die Umweltwirkung durch Verringerung von Leckagen und effiziente Energieübertragung. Darüber hinaus benötigen elektrische Spreader weniger Energie, was eine Reduktion der Betriebskosten zur Folge hat.

Die Maßnahme A13 **LED Floodlights and Walkway Lights** betrifft das ganze Terminal. Hier soll die komplette Terminalbeleuchtung auf **LED** umgestellt werden. Da der Strombedarf der Terminalbeleuchtung vor allem im Winter sehr hoch ist, kann durch den Einsatz von **LED** der Strombedarf deutlich gesenkt werden. Der Einsatz von **LED** auf Containerterminals wurde sowohl in Forschungsprojekten als auch in wissenschaftlichen Veröffentlichungen bereits mehrfach untersucht. Die Ergebnisse von anderen Terminals werden von den Entscheidungsträgern und Entscheidungsträgerinnen als vielversprechend eingeordnet.

Der Energiebedarf der Bürogebäude soll mit Maßnahme A14 **Adaptive Lighting Buildings** durch bedarfsgerechte Steuerung der Beleuchtung gesenkt werden. Hierfür sollen in den Gebäuden entsprechende Bewegungsmelder installiert werden, über die Beleuchtung der Flure und Bewegungsflächen der Gebäude gesteuert wird.

Die Maßnahmen A2 **LNG Power Pack** und A3 **Onshore-Power Supply** verletzen zum Teil die am Anfang des Abschnitts definierten Systemgrenzen der Entscheidung, da sie sich teilweise außerhalb des Zugriffs der Terminalbetreiber befinden. Sowohl bei A2 als auch bei A3 müssen die Reeder bzw. Eigner der Containerschiffe die Umrüstung dieser veranlassen, um die Maßnahme erfolgreich umzusetzen. Da allerdings schon heute einige Schiffe mit Landstrom oder **LNG** Containern versorgt werden können und ein Großteil der Umstellung durch den Terminalbetreiber umgesetzt werden müssen, wurde diese Maßnahmen berücksichtigt.

Als abschließender Schritt bei der Definition der Maßnahmen wurden die Abhängigkeiten zwischen den Maßnahmen zusammen mit den Entscheidungsträgern bestimmt. Die Maßnahmen A4 **Full Electric SC** und A5 **Hybrid SC** schließen sich gegenseitig aus, da ein Terminal sinnvollerweise entweder hybride dieselelektrische oder vollelektrische **SC** betreibt. Bei der Erzeugung der Portfolios im Verlauf der Entscheidungsunterstützung muss diese Bedingung über eine Nebenbedingung im Optimierungsmodell abgebildet werden. Darüber hinaus ist es aus ökonomischer Sicht für ein Terminal sinnvoll, entweder eine Landstromversorgung zu implementieren oder auf **LNG** Power Packs zu setzen. Aus diesem Grund kann bei der Erstellung der Portfolios nur eine dieser Maßnahmen pro Portfolio ausgewählt werden.

#### 4.2.2 Bestimmung der Kriterienhierarchie und -gewichtung

Für die Bewertung der Maßnahmen wurden im Rahmen des Projektes **SuStEnergyPort** ökologische, ökonomische, technische und soziale Kriterien mithilfe der **SDGs** und den Entscheidungsträgern abgeleitet. Abbildung 4.6 operationalisiert die verwendeten **SDGs** und zeigt die daraus abgeleiteten Unterziele und Kriterien. Die Ableitung einzelner Kriterien aus den **SDGs** erlaubt eine quantitative Bestimmung der Kriterienausprägungen für viele Kriterien. Eine **MCDA** auf Basis von quantitativen Werten liefert genauere Ergebnisse im Vergleich zu einer **MCDA** auf Basis von qualitativen Einschätzung der Alternativen bzgl. der **SDGs**. Die Bestimmung der Kriterienhierarchie wurde in enger Zusammenarbeit mit

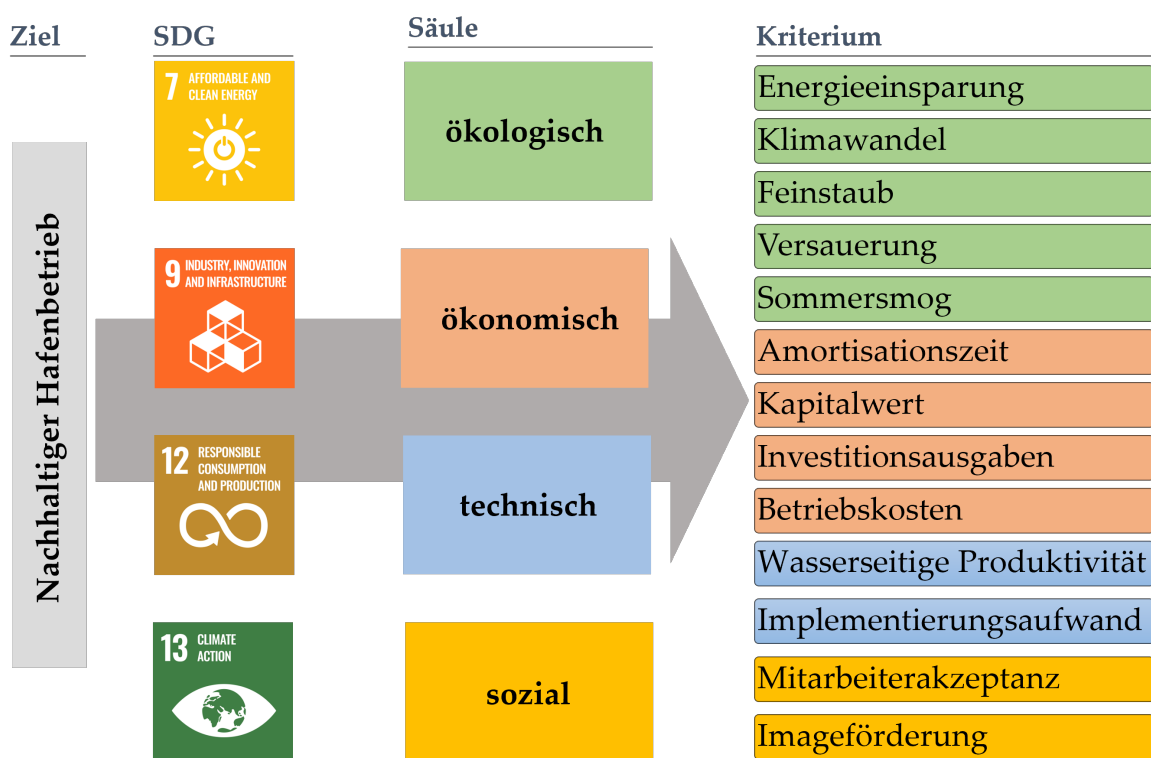


Abbildung 4.6: Ziele, SDG und Kriterien am CTT

den Entscheidungsträgern durchgeführt, um ihr Verständnis der Energienachhaltigkeit abzubilden. Eine Übersicht über die Kriterien ist in Tabelle 4.2 zu finden und werden im Folgenden näher beschrieben.

Die ökologischen Kriterien umfassen Energieeinsparung, Klimawandel, Feinstaub, Versauerung und Sommersmog. Die Energieeinsparung wird dabei in kWh/a gemessen und wurde nach Absprache mit den Entscheidungsträgern den ökologischen Kriterien zugeordnet, da sie die direkten Emissionen reduziert. Allerdings kann die Energieeinsparung der Maßnahmen auch als ökonomisches Kriterium gewertet werden, da die Reduktion der benötigten Energie zum Betrieb sich direkt auf z. B. die Betriebskosten auswirkt. Die Kriterien Klimawandel, Feinstaub und Versauerung sind oft verwendete Kriterien zur ökologischen Bewertung aus dem Bereich der Ökobilanz (Frischknecht, 2020, S. 109ff.).

Der Klimawandel, auch Treibhauspotenzial (engl. Global Warming Potential, GWP) oder Klimaschädigung genannt, ist der Wirkungsparameter, der die Klimawirkung der emittierten Gase zusammenfasst (IPCC, 2013). Berechnet wird der Klimawandel über die Absorptionskoeffizienten für Wärmestrahlung, erwartete Immisionsentwicklung und Verweildauer der Gase in der Atmosphäre (Frischknecht, 2020, S. 110). Als Bezugseinheit wird hier oft, und insbesondere im Rahmen des SuStEnergyPort-Projektes, die Klimawirkung der Gase auf CO<sub>2e</sub>-Einheiten auf einen Zeithorizont von 100 Jahren gerechnet.

Der Feinstaub oder auch Partikelbildung ist die Wirkungskategorie, die die Emissionen von primären oder sekundären Partikeln misst (Frischknecht, 2020, S. 112). Ein Großteil

**Tabelle 4.2:** Unterziele und Kriterien des Projektes [SuStEnergyPort](#). Die rechte Spalte gibt die Maßeinheiten der Kriterien an, Quelle: (Pohl u. a., 2020b)

	Kriterium	Maßeinheit
Ökologisch	Energieeinsparung	[kWh/a]
	Klimawandel	[kg CO <sub>2</sub> e/a]
	Feinstaub	[kg PM <sub>10</sub> e/a]
	Versauerung	[kg SO <sub>2</sub> e/a]
	Sommersmog	[kg NMVOCe/a]
Ökonomisch	Amortisationszeit	[a]
	Kapitalwert	[€]
	Investitionsausgaben (CAPEX)	[€]
	Betriebskosten (OPEX)	[€a]
Technisch	Wasserseitige Produktivität	[%]
	Implementierungsaufwand	[Punkte]
Sozial	Mitarbeiterakzeptanz	[Punkte]
	Imageförderung	[Punkte]

von eingeatmeten Partikel verbleibt in der Lunge und den Atemwegen von Menschen, was zu Krankheiten führen kann. Als Maßeinheit dient hier die Partikelbildung infolge der Emission von einem Kilo feinstaubbildender Gase bezogen auf die Referenzsubstanz PM<sub>10</sub>, d. h. Partikel mit einem Durchmesser von weniger als 10 µm. Vor allem im Hafen spielen Feinstaubemissionen eine große Rolle, da Häfen und Containerterminals oft in der Nähe von Städten liegen (Martínez-Moya u. a., 2019). Die Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen am CTT legten viel Wert auf eine Reduktion der NO<sub>x</sub>-Emissionen durch die Umschlaggeräte. NO<sub>x</sub>-Emissionen werden anteilig in der Partikelbildung mit berücksichtigt. Eine Übersicht über die Faktoren zur Umrechnung auf die Referenzeinheit kann in (Frischknecht, 2020, S. 113) gefunden werden.

Die Wirkungskategorie Versauerung misst die Versauerung von aquatischen und terrestrischen Systemen über die durch Emissionen einhergehende pH-Senkung in Gewässern und Böden. Als Referenzeinheit dienen hier SO<sub>2</sub>-Emissionen (Frischknecht, 2020, S. 114).

Das nächste Kriterium, der Sommersmog oder photochemische Oxidantenbildung, misst die Bildung von troposphärischen Ozon. Der Sommersmog ist ein relatives Maß, das als Referenzwert ein unspezifisches Gemisch aus Nichtmethankohlenwasserstoffen, engl. non-methane volatile organic compound (NMVOC) besitzt. Nach van Zelm u. a. (2008) entspricht die Emission eines Kilos NMVOC, genau der eines Kilos NO<sub>x</sub>. Wie oben angeführt, werden die NO<sub>x</sub>-Emissionen am CTT stark diskutiert, sodass dieses Kriterium nach Rücksprache mit den Entscheidungsträgern berücksichtigt wurde. Hier sei angemerkt, dass die Kategorie nicht ausschließlich NO<sub>x</sub>-Emissionen berücksichtigt, sondern auch andere Gase, deren äquivalente Einheit hier bezüglich der Bildung von Ozon berücksichtigt werden.

Die ökonomischen Kriterien untergliedern sich in die Amortisationszeit, den Kapitalwert, die Investitionsausgaben und die Betriebskosten. Die Amortisationszeit bestimmt die Zeit, nach der sich eine Investition durch die kumulierten Einzahlungsüberschüsse ausgeglichen hat. Die Amortisationszeit gehört zur statischen Investitionsrechnung und sagt nichts über die Rentabilität einer Investition aus. Sie wird oft eingesetzt, um dem Risiko der Investition Rechnung zu tragen. Je länger die Amortisationszeit, desto größer kann das Risiko sein, dass sich die Investition nicht bezahlt macht (vgl. z. B. Thommen u. a., 2017, S. 346f.). Da das Risiko nicht nur von der Amortisationsdauer abhängt und sie sonst auch keine einfach zu vergleichende Bewertung von Investitionen ermöglicht, wird die Amortisationszeit nicht oft verwendet. Nach Rücksprache und Hinweis auf die Nachteile dieser Bewertung haben sich die Entscheidungsträger des CTT durchgesetzt und dieses Kriterium wurde berücksichtigt.

Ein Maß der dynamischen Investitionsrechnung zur Bewertung von Investitionen ist der Kapitalwert. Der Kapitalwert einer Investition ergibt sich durch das Summieren und Abzinsen aller Ein- und Auszahlungen über einen bestimmten Zeithorizont. Eine Investition gilt als vorteilhaft, wenn der Kapitalwert positiv ist. Der Kapitalwert ist definiert als

$$K_0 = \sum_{t=0}^n \frac{e_t - a_t}{(1+i)^t} + \frac{L_n}{(1+i)^n} - I_0. \quad (4.1)$$

Hierbei ist  $n$  die Nutzungsdauer in Jahren,  $I_0$  die Höhe der anfänglichen Investition,  $a_t$  die Auszahlungen in Periode  $t$  und  $e_t$  die Einzahlungen. Am Ende der Nutzungsdauer kann ein Liquidationserlös von  $L_n$  für die Investition erzielt werden, die hier berücksichtigt wird (vgl. z. B. Thommen u. a., 2017, S. 350).

Das Kriterium der Investitionsausgaben beschreibt das anfänglich benötigte Kapital, um eine Maßnahme umzusetzen. Für Schulungen der Mitarbeiter werden hier die Schulungskosten angesetzt, für hybride SCs wird bspw. das Kapital zum Kauf der Geräte angesetzt.

Die Betriebskosten einer Maßnahme beschreiben die Kosten, die regelmäßig anfallen. Bei den SC sind das z. B. Kraftstoffkosten und Wartungskosten.

Die ökonomischen Kriterien sind nicht unabhängig voneinander gewählt und sollten aus diesem Grund nicht als Grundlage einer mehrkriteriellen Bewertung dienen (vgl. Abschnitt 3.4). Insbesondere sind die Amortisationszeit und der Kapitalwert darstellbar als Funktion der variablen und fixen Kosten, d. h. Investition und der Betriebskosten. Verwendet man diese Kriterien, werden sie durch die MADM-Methode stärker gewichtet. Im Rahmen des Projektes SuStEnergyPort wurden die dargestellten ökonomischen Kriterien dennoch verwendet, da nach Rücksprache mit den Entscheidungsträgern deutlich wurde, dass Containerterminals von Investitionen absehen, falls sie oder die Betriebskosten zu hoch ausfallen. Andererseits werden nach Informationen der Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen die anderen Kriterien, d. h. die Amortisationszeit und der Kapitalwert zur Bewertung von Investitionen herangezogen. Maßnahmen mit kurzer Amortisationszeit von weniger als zwei Jahren werden, nach Aussage der Entscheidungsträger direkt umgesetzt (Pohl u. a., 2020b). Die Abhängigkeit wurde darüber hinaus in der Bestimmung der Kriteriengewichte auf Seiten der Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen berücksichtigt.

Andere Kennzahlen zur Kapitalrentabilität, wie z. B. der Return on Investment (ROI), werden von den Entscheidungsträgern hier nicht zur Bewertung von Investitionen verwendet und werden daher nicht über Kriterien im Entscheidungsproblem abgebildet.

Die technischen Kriterien setzen sich zusammen aus der wasserseitigen Produktivität und dem Implementierungsaufwand einer Maßnahme. Die wasserseitige Produktivität ist eine wichtige Kennzahl für Containerterminals und beschreibt den Durchsatz über die Kaikante. Im Rahmen des Projektes wurde sie in Prozent zum aktuellen Durchsatz des CTT gemessen (Pohl u. a., 2020b).

Der Implementierungsaufwand einer Maßnahme ist ein qualitatives Maß, das durch Befragungen von Experten angegeben soll, wie lange die Umsetzungsdauer, der Platzbedarf und die allgemeine Komplexität einer Maßnahme ist. Der Implementierungsaufwand wurde auf einer Punkteskala von 0 bis 10 Punkten angegeben (Pohl u. a., 2020b). Die Einschätzungen zum Implementierungsaufwand beruhen auf den Befragungen zweier Mitarbeitenden der HPC GmbH.

Analog zum Implementierungsaufwand sind die beiden Kriterien der sozialen Ziele, die Mitarbeiterakzeptanz und Imageförderung, qualitative Maße auf Basis von Expertenbefragungen. Erstere beschreibt die Akzeptanz der Belegschaft für eine der Maßnahme, zweitere die öffentliche Wahrnehmung und Möglichkeit zur Promotion. Beide Kriterien werden in Punkteskalen von 0 bis 4 ausgedrückt (Pohl u. a., 2020b).

Die Kriteriengewichtung wurde im Rahmen von Workshops mit den Projektpartnern, Hafenbehörden und der HHLA erhoben. Hierbei wurde die revised Simos-Methode von Figueira und Roy (2002) angewandt (vgl. Abschnitt 3.6). Tabelle 4.3 zeigt die Kriteriengewichtung der Entscheidungsträger. Hierbei wurden die Präferenzen der einzelnen Entscheidungsträger mit der Simos-Methode bestimmt und anschließend durch Bilden des Mittelwerts aggregiert. Während der Workshops wurden die Teilnehmenden auf die Abhängigkeit zwischen den ökonomischen Kriterien hingewiesen, um dies bei der Bewertung berücksichtigen zu können.

Die ökonomischen Kriterien Kapitalwert und Amortisationszeit werden mit jeweils 13,6 % am höchsten gewichtet, gefolgt von der Energieeinsparung mit 10,4 %. Am wenigsten stark gewichtet wurde der Sommersmog mit 3,5 % und die Mitarbeiterakzeptanz mit 3,2 %. Insgesamt werden die ökonomischen Kriterien mit 44,7 % am höchsten gewichtet. Die zweitwichtigste Säule der Nachhaltigkeit ist hier die ökologische Säule mit 29,1 %. Die technischen Kriterien sind mit 17,5 % an dritter Stelle gefolgt von den sozialen Kriterien mit insgesamt 8,5 %.

#### 4.2.3 Bestimmung der Kriterienausprägungen

Die Bestimmung der Kriterienausprägungen stellt im Projekt SuStEnergyPort den größten Arbeitsaufwand dar. Bis auf den Implementierungsaufwand, die Mitarbeiterakzeptanz und die Imageförderung wurden alle Kriterienausprägungen als Potenzial berechnet, d. h. es wird ermittelt, um wie viel eine Maßnahme die Kriterienausprägung des gesamten Terminals bzgl. eines Kriteriums verändert. Diese Differenz wird dann im Folgenden als Kriterienausprägung der Maßnahme bzgl. des Kriteriums verwendet. Im Folgenden wird die Bestimmung der Kriterienausprägung exemplarisch für einige Maßnahmen geschildert. Eine detaillierte Beschreibung ist in Kemme und Schmidt (2020), Lemke u. a. (2020), Pohl u. a. (2020b) und



Tabelle 4.3: Durchschnittliche Kriteriengewichtung der Projektpartner des Projektes [SuStEnergyPort](#),  
Quelle: Pohl u. a. (2020b)

	Kriterium	Gewichtung	
Ökologisch	Energieeinsparung	10,4 %	} 29,1 %
	Klimawandel	7,2 %	
	Feinstaub	4,1 %	
	Versauerung	3,9 %	
	Sommersmog	3,5 %	
Ökonomisch	Investition	8,8 %	} 44,9 %
	Wirtschaftlichkeit (Kapitalwert)	13,6 %	
	Wirtschaftlichkeit (Amortisation)	13,6 %	
	Betriebskosten	8,9 %	
Technisch	Implementierungsaufwand	8,6 %	} 17,5 %
	Wasserseitige Produktivität	8,9 %	
Sozial	Mitarbeiterakzeptanz	3,2 %	} 8,5 %
	Imageförderung	5,3 %	

Scharpenberg u. a. (2018) dargestellt. Die Bestimmung der Kriterienausprägungen wird im Folgenden anhand der einzelnen Kriterienkategorien dargestellt.

#### 4.2.3.1 Ökologische Kriterien

Für die ökologischen Kriterienausprägungen (Klimawandel, Feinstaub, Versauerung und Sommersmog) der Maßnahmen wurden vergleichende Ökobilanzen nach ISO 14040 erstellt. Im Folgenden wird die Erstellung der Ökobilanzen für die hybriden und batterieelektrischen [SC](#), sowie für die dieselelektrischen [SC](#) skizziert. Die Erstellung aller drei Ökobilanzen ist nötig, um im Anschluss das jeweilige Einsparpotenzial für die [SCs](#) der Maßnahmen bestimmen zu können. Mithilfe der Ökobilanzen können dann die Kriterienausprägungen der ökologischen Kriterien der Maßnahmen [A4 Full Electric SC](#) und [A5 Hybrid SC](#) bestimmt werden.

Als funktionelle Einheit wird für die Umschlaggeräte am [CTT](#) die Nutzung eines Gerätes für eine Betriebsstunde gewählt. Dies erlaubt einen Vergleich der Geräte und die Bestimmung der Umweltwirkung der Geräte auf die volle Lebenszeit, indem mit der durchschnittlichen Lebensdauer multipliziert wird.

Die Systemgrenze der Ökobilanzen für die Geräte orientiert sich am Lebenszyklus der Geräte und umfasst die Produktion, den Transport zum Terminal, die Nutzung und die Entsorgung. Die dieselelektrischen [SCs](#) besitzen einen Dieselgenerator zur Stromerzeugung. Der Strom wird für den Antrieb sowie zum Heben und Senken der Container verwendet. Die hybriden [SC](#) besitzen zusätzlich eine Batterie, die ausschließlich mit Rekuperationsenergie durch Brems- und Senkvorgänge aufgeladen wird und im Anschluss für die Beschleunigung

oder das Heben von Containern verwendet wird. Die batterieelektrischen SC besitzen eine große Batterie, die an Ladepunkten geladen wird und die Energie für alle Bewegungen bereitstellt. Bei der Ökobilanz der rein elektrischen SC konnte nur auf Herstellerangaben zurückgegriffen werden, da die Geräte noch nicht produktiv eingesetzt werden.

Die vier Phasen der Ökobilanz für die SC wurde mithilfe der Software Umberto LCA+ und Ecoinvent 3.5 erstellt und sind in Abbildung 4.7 dargestellt. Modelliert wird die Produktion der SC je nach Hersteller in verschiedenen Ländern, der Transport zum CTT, die Nutzungsphase inklusive Wartung und Verschleißteile sowie die stoffliche und energetische Verwertung am Ende der Lebenszeit. Aufgrund der bilanziellen Betrachtung werden durch die Verwertung der Produkte Gutschriften bei einzelnen Emissionen berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Ökobilanzen für alle drei Antriebsarten und die untersuchten Wirkungskategorien sind in Abbildung 4.8 zu finden. Hierbei wird für die Ökobilanz der batterieelektrischen SC der aktuelle Strommix des CTT angesetzt. Eine genaue Darstellung des CTT-Strommix ist in (Pohl u. a., 2020b, S. 38) zu finden. Der Strommix am CTT entspricht bzgl. der CO<sub>2e</sub>-Emissionen dem deutschen Durchschnitt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die größten Emissionen in allen Wirkungskategorien in der Nutzungsphase anfallen. Durch den Einsatz von hybriden SC können die Emissionen in allen Kategorien um ca. 15 % gesenkt<sup>4</sup> werden. Durch den Einsatz von batterieelektrischen SC kann der Klimawandel um 52 % reduziert werden. Der Einsatz von Strom aus erneuerbaren Quellen kann die Klimawirkung der SC noch weiter senken. Aufgrund der langen Lebensdauer von 20 Jahren spielen die Emissionen bei der Produktion und Recycling der SC eine untergeordnete Rolle (Pohl u. a., 2020b, S. 38f.).

Für die Bestimmung des Minderungspotenzials in den ökologischen Kriterien wird nun davon ausgegangen, dass, falls eine Maßnahme umgesetzt wird, die dieselektrischen SC nach Erreichen der Lebensdauer durch ein neues Gerät des anderen Typs ersetzt wird. Das Potenzial der Maßnahme „hybride SC“ errechnet sich nun aus den reduzierten Emissionen pro Jahr multipliziert mit der Anzahl der SCs auf dem Terminal.

Zur Ermittlung des Energieeinsparpotenzials der Maßnahmen wurden sowohl ein Simulationsmodell als auch statische Analysen verwendet. Das Simulationsmodell wurde von den Projektpartnern für das CTT entwickelt (vgl. Lemke u. a., 2020, S. 22 ff.) und beruht auf einem ursprünglichen Modell von Kemme (2013). Hierdurch konnte nicht nur die Energieeinsparung der Maßnahmen abgeschätzt werden, sondern auch der Einfluss verschiedener Maßnahmen auf Produktivitätsindikatoren des Terminals.

Für die Bestimmung des Energieeinsparpotenzials der Maßnahme A9 Idle Reduction SCs wurden verschiedenen Abschaltzeiten für die SC-Motoren simuliert. Aktuell werden die Motoren nach 10 Minuten Stillstand abgeschaltet. Im Rahmen des Projektes wurden Abschaltzeiten von sowohl 5 Minuten als auch 3 Minuten simuliert. Die Ergebnisse in Abbildung 4.9 zeigen, dass der Energiebedarf der SC pro umgeschlagenen Container jeweils um 0,2 % und 0,7 % leicht sinkt. Die Abbildung zeigt darüber hinaus, dass die Produktivität der STS und die Zykluszeit der externen Lkw sinkt. Diese Kennzahlen aus dem Simulationsmodell werden in den technischen Kriterien durch die wasserseitige Produktivität berücksichtigt.

<sup>4</sup> Die HHLA testet die hybriden Antriebe auf dem Gelände des CTT und geht aktuell von bis zu 35 % Einsparung aus.

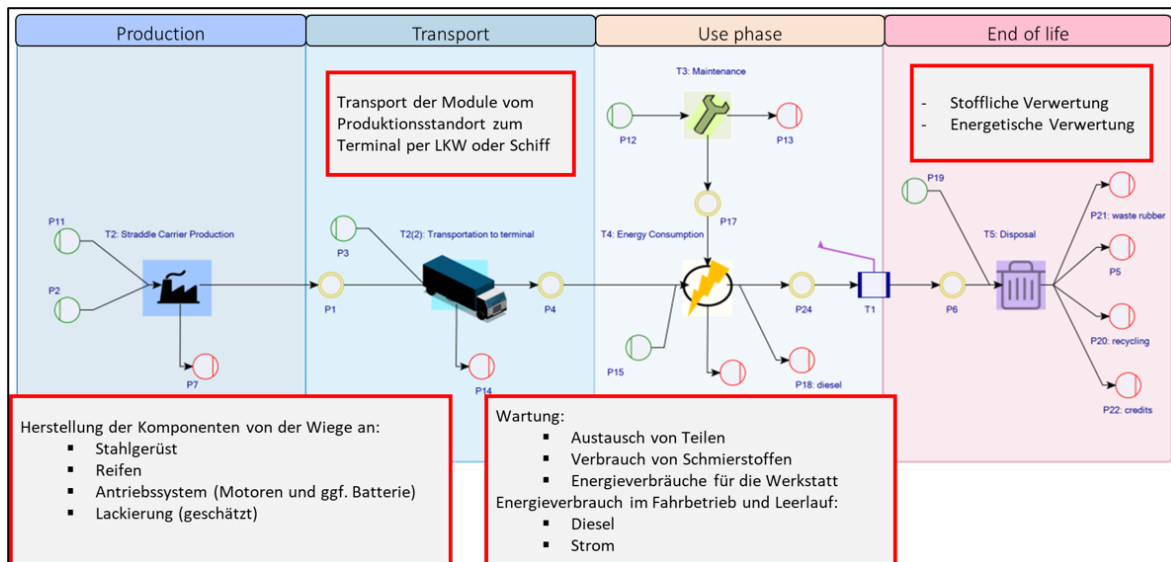


Abbildung 4.7: Lebenszyklusphasen am Beispiel des SC. Quelle: (Pohl u. a., 2020b)

Zur Bestimmung der ökologischen Kriterienausprägungen der weiteren Maßnahmen wurden verschiedene Ökobilanzen erstellt und verschiedene Energiebedarfe mithilfe des Simulationsmodells bestimmt. Eine detaillierte Darstellung kann in (Pohl u. a., 2020b) gefunden werden.

#### 4.2.3.2 Ökonomische Kriterien

Die Ermittlung der Kriterienausprägungen der ökonomischen Kriterien sollen am Beispiel der Maßnahme A13 Floodlights and Walkway Lights dargestellt werden. Zurzeit werden am CTT wie an vielen anderen Containerterminals auch, Natriumdampflampen, engl. High Intensity Discharge Lamp (HID)-Leuchten zur Beleuchtung der Verkehrsfläche, Umschlagfläche und Containerlager eingesetzt. Die modernen LED-Leuchten bieten im Vergleich mehrere Vorteile. So müssen insgesamt weniger Leuchten installiert werden, da die LED-Leuchten eine deutlich höhere Ausleuchtung erzielen und dabei insgesamt weniger Energie benötigen. Am CTT können alle HID-Leuchten durch ca. 40 % weniger LED-Leuchten ersetzt werden.

Die Umstellung von HID-Leuchten auf LED benötigt zwar anfangs eine hohe Investition, allerdings rentiert (in Bezug auf den Kapitalwert) sich diese Investition bereits nach gut 3 Jahren aufgrund des geringeren Strombedarfs und Wartungsaufwands. Darüber hinaus geht die Terminalbetreiberin bei LED-Leuchten von einer längeren Lebenszeit aus. Abbildung 4.10 zeigt die Kapitalwerte der HID- und LED-Leuchten über einen Zeitraum von 15 Jahren. Die HID-Leuchten müssen durchschnittlich nach vier Jahren und die LED-Leuchten nach elf Jahren ausgewechselt werden. Nach 15 Jahren entsteht ein Vorteil von ungefähr 2 Mio. € (vgl. Abbildung 4.10). Aus Sicht des Kapitalwerts ist diese Maßnahme also vorteilhaft.

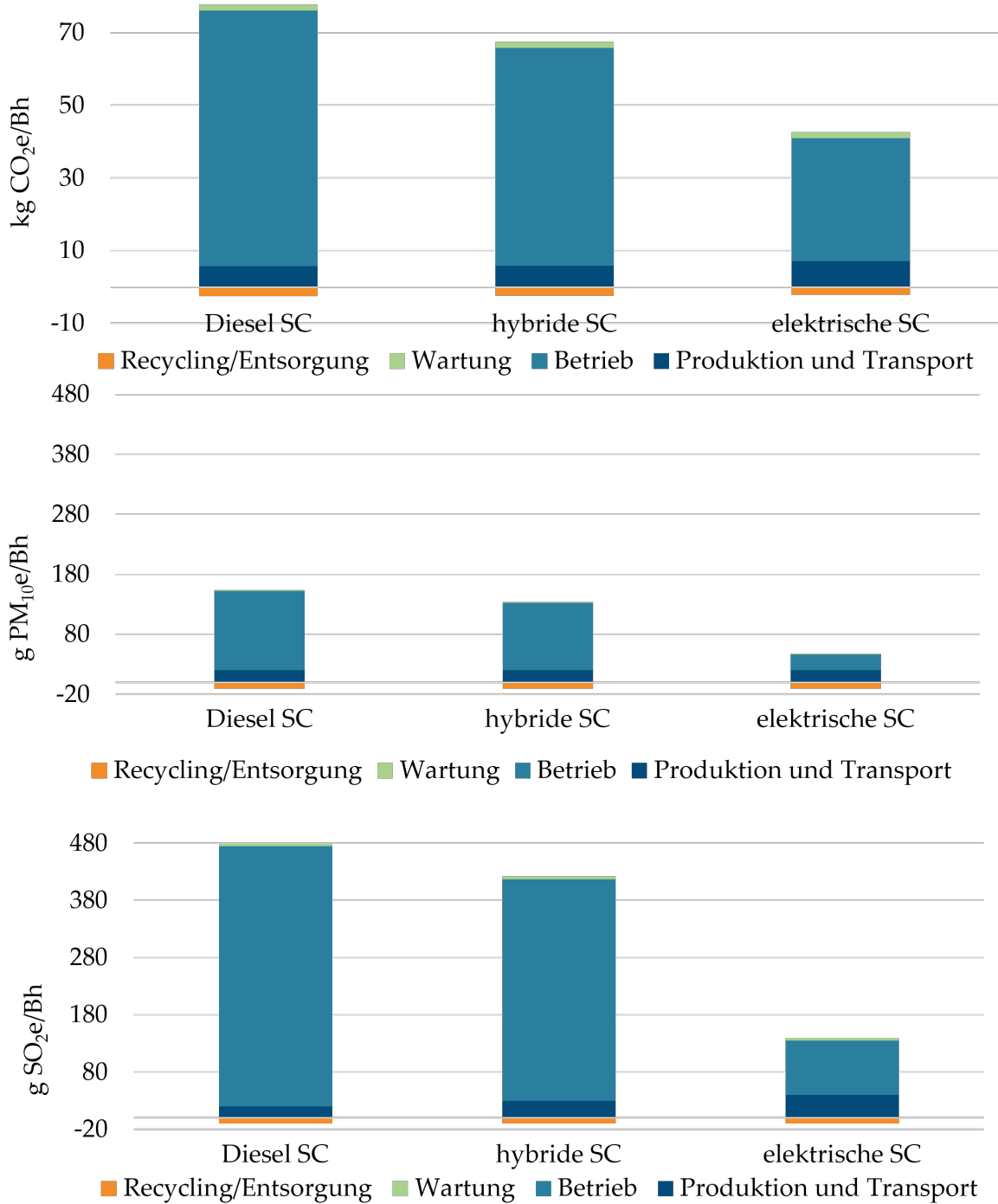
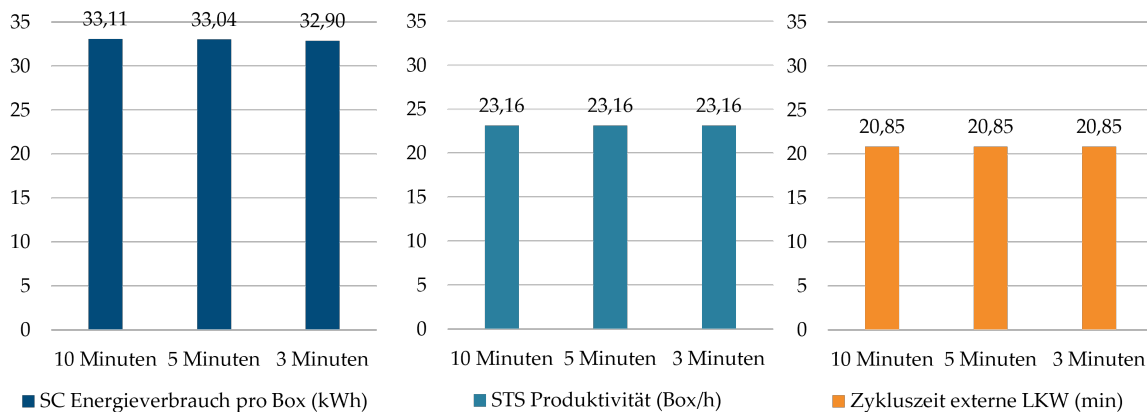
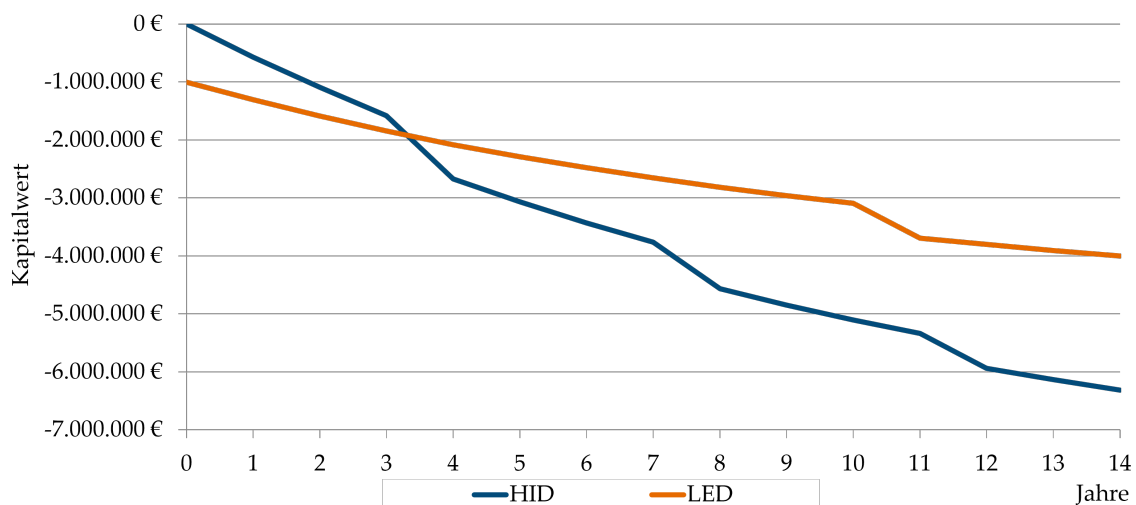


Abbildung 4.8: Emissionen der untersuchten SC pro funktioneller Einheit, d. h. pro Betriebsstunde (Bh). Dargestellt sind die Emissionen der Kategorien Klimawandel, Feinstaub und Versauerung. Quelle: Pohl u. a. (2020b)



**Abbildung 4.9:** Simulationsergebnisse für die Maßnahme A9 SC Idle Reduction. Der Energiebedarf der SC sinkt um 0,2 % bei einer Start-Stopp-Zeit von 5 Minuten und um 0,7 % bei 3 Minuten im Vergleich zu den aktuell verwendeten 10 Minuten Abschaltzeit. Quelle: (Kemme und Schmidt, 2020; Pohl u. a., 2020b, S. 58)



**Abbildung 4.10:** Ökonomische Bewertung der LED und HID. Trotz der anfänglich hohen Investition in LED-Leuchten sind diese ökonomisch vorteilhaft und rentieren sich bzgl. des Kapitalwerts nach gut 3 Jahren. Quelle: (Lemke u. a., 2020; Pohl u. a., 2020b)

Im Fall des CTT amortisieren sich LED-Leuchten nach ca. drei Jahren. Darüber hinaus sind die Betriebskosten der LED-Leuchten sowohl in den Stromkosten als auch bei der Wartung deutlich niedriger als bei HID-Leuchten<sup>5</sup>.

Die ökonomischen Kennzahlen wurden für alle untersuchten Maßnahmen bestimmt. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden darüber hinaus weitere Kennzahlen zur Charakterisierung der Maßnahmen berechnet (vgl. z. B. Kemme und Schmidt, 2020).

#### 4.2.3.3 Technische und soziale Kriterien

Die Bestimmung der technischen Kriterien, d. h. die Bestimmung der wasserseitigen Produktivität, erfolgt mithilfe des Simulationsmodells. Die in Abbildung 4.9 dargestellte STS-Produktivität wird durch einen Vergleich mit der aktuellen Situation umgerechnet und beschreibt dann die wasserseitige Produktivität des Terminals.

Der Implementierungsaufwand einer Maßnahme setzt sich aus Einzelbewertungen der Umsetzungsdauer einer Maßnahme, dem Platzbedarf einer Maßnahme und der Komplexität zusammen. Alle Bewertungen wurden durch Experteninterviews auf einer Kardinalskala von 1 bis 10 Punkte geschätzt. Bei der Komplexität einer Maßnahme heißt der Wert 1, dass das Terminal die Maßnahme selbst umsetzen kann, 10 bedeutet, dass die Maßnahme komplett durch externe Dienstleister umgesetzt werden muss. Der Mittelwert (aufgerundet) der Einzelbewertungen ergibt dann den Implementierungsaufwand einer Maßnahme.

Beide Kriterien der sozialen Ziele, d. h. die Mitarbeiterakzeptanz und die Imageförderung werden auf einer Kardinalskala in Form von Punkten zwischen 0 und 4 angegeben. Die Kriterienausprägungen wurden auch hier durch Experteninterviews ermittelt.

#### 4.2.4 Bewertung der Maßnahmen durch PROMETHEE

Die Entscheidungstabelle mit allen Kriterienausprägungen der analysierten Maßnahmen ist in Tabelle 4.4 und 4.5 dargestellt. Aufgrund von Betriebsgeheimnissen des CTT werden dort die Kriterienausprägungen der Maßnahmen in Prozent der größten Kriterienausprägung eines Kriteriums dargestellt.

Die Methode PROMETHEE ist invariant bezüglich einer Skalierung der Kriterienausprägungen, solange die Präferenzfunktionsparameter entsprechend auch skaliert werden. Aus diesem Grund führt die Skalierung nicht zu verfälschten Ergebnissen. Ein Beweis dieser Eigenschaft ist im Anhang zu finden.

Für die Ermittlung der PROMETHEE-spezifischen Informationen, d. h. die Präferenzfunktionen und deren Parameter, wurden im Rahmen des Projektes SuStEnergyPort verschiedene Workshops durchgeführt. Die Präferenzfunktionen, -parameter und die Orientierung der Kriterien sind in Tabelle 4.6 dargestellt. Zunächst wurden im Rahmen des Workshops die Orientierung der Kriterien festgelegt, d. h. ob eine hohe Kriterienausprägung oder eine niedrige Kriterienausprägung zu bevorzugen ist. Da viele Kriterienausprägungen als Potenzial, d. h. als Verbesserung zum aktuellen Status des Terminals, angegeben sind, wurde hier eine einheitliche Berechnung des Potenzials festgelegt.

<sup>5</sup> Aufgrund von Betriebsgeheimnissen des CTT können die genauen Werte an dieser Stelle nicht genannt werden.

Tabelle 4.4: Entscheidungstabelle der Energienachhaltigkeitsmaßnahmen am CTT (1/2). Die Kriterienausprägungen sind dargestellt in Prozent der größten Kriterienausprägung pro Kriterium.

	Solar Photovoltaics	LNG Power Pack	Onshore-Power supply	Full Electric SC	Hybrid SC SC	Speed Controlling SC	Eco Driving SC
Energieeinsparung [%]	0,000	0,000	62,744	100,000	23,686	-0,012	1,999
Klimawandel [%]	2,206	90,388	68,606	100,000	29,021	-0,019	-0,526
Feinstaub [%]	-0,244	94,606	59,694	100,000	18,647	-0,008	-0,453
Versauerung [%]	0,250	100,000	58,901	93,025	15,787	-0,008	-0,447
Sommersmog [%]	-0,033	71,183	60,379	100,000	17,243	-0,007	-0,457
Investition [%]	5,454	24,366	100,000	16,890	8,445	0,000	0,026
Kapitalwert [%]	35,976	34,869	-821,384	-135,681	100,000	1,700	-0,202
Amortisation [%]	4,374	7,210	100,000	100,000	2,780	1,000	3,813
Betriebskosten [%]	-5,573	-549,593	-1.217,541	-54,267	100,000	1,866	0,000
Implementierungsaufwand [%]	62,500	87,500	100,000	100,000	25,000	25,000	25,000
Wasserseitige Produktivität [%]	97,144	97,144	97,144	97,144	97,144	92,326	96,437
Mitarbeiterakzeptanz [%]	100,000	66,667	33,333	66,667	100,000	33,333	33,333
Imageförderung [%]	75,000	75,000	100,000	100,000	75,000	50,000	50,000

Tabelle 4.5: Entscheidungstabelle der Energienachhaltigkeitsmaßnahmen am CTT (2/2). Die Kriterienausprägungen sind dargestellt in Prozent der größten Kriterienausprägung pro Kriterium.

	Idle Reduction SC	LED Floodlights for STS	STS Eco Driving	Electric Spreader	LED Floodlights	Adaptive Lighting Buildings	Pooling
Energieeinsparung [%]	0,244	-0,006	-0,355	0,334	3,074	0,438	4,083
Klimawandel [%]	0,040	-0,074	-2,126	0,961	4,693	0,709	0,101
Feinstaub [%]	0,010	-0,066	-1,321	0,141	0,926	0,185	0,059
Versauerung [%]	0,011	-0,043	-1,312	0,145	1,093	0,190	0,059
Sommersmog [%]	0,007	-0,031	-1,254	0,182	0,680	0,120	0,055
Investition [%]	0,000	0,932	0,123	2,492	-3,099	0,312	0,000
Kapitalwert [%]	4,501	0,445	-0,216	6,982	21,306	-0,186	0,000
Amortisation [%]	1,000	7,189	100,000	100,000	3,143	0,000	0,000
Betriebskosten [%]	74,106	2,116	0,000	13,423	62,176	1,400	0,000
Implementierungsaufwand [%]	25,000	37,500	25,000	25,000	37,500	50,000	62,500
Wasserseitige Produktivität [%]	97,144	97,144	95,973	97,144	97,144	97,144	100,000
Mitarbeiterakzeptanz [%]	66,667	100,000	33,333	100,000	100,000	33,333	33,333
Imageförderung [%]	50,000	50,000	50,000	50,000	75,000	50,000	50,000



Tabelle 4.6: Präferenzfunktionsparameter der Entscheidungsträger im Projekt [SuStEnergyPort](#), Quelle (Pohl u. a., 2020b)

Kriterium	Präferenzfunktion	Parameter	Orientierung
Energieeinsparung	Linear mit Indifferenz	q=350.000 p=715.000	max
Klimawandel	Linear mit Indifferenz	q=1.250.000 p=2.500.000	max
Feinstaub	Linear	p=100	max
Versauerung	Linear	p=500	max
Sommersmog	Linear	p=300	max
Investition	Linear mit Indifferenz	q=0,5 p=2	min
Kapitalwert	Linear mit Indifferenz	q=50.000 p=200.000	max
Amortisation	Linear mit Indifferenz	q=100.000 p=850.000	min
Betriebskosten	Linear mit Indifferenz	q=50.000 p=100.000	max
Implementierungsaufwand	Linear	p=1	max
Wasserseitige Produktivität	Linear	p = 0,01	min
Mitarbeiterakzeptanz	Level	q=1 p=2	max
Imageförderung zu erwarten	Level	q=1 p=2	max

Im Anschluss wurden die PROMETHEE-Präferenzfunktion für jedes Kriterium festgelegt. Bei vielen Kriterien lag auf Seiten der Entscheidungsträger eine lineare Präferenz vor. Je nachdem, ob bei einem Kriterium ein Indifferenzschwellenwert gewünscht war, wurde eine einfache lineare Präferenzfunktion oder eine mit Indifferenzschwellenwert verwendet. Für die sozialen Kriterien wurde wegen der zugrundeliegenden Kardinalskala eine Level-Präferenzfunktion verwendet (vgl. Tabelle 4.6).

In Abhängigkeit der gewählten Präferenzfunktion wurden anschließend die Präferenzfunktionsparameter erfragt. Wie in Abschnitt 3.6.4 dargestellt, können die Präferenzfunktionsparameter ohne viel Aufwand erfragt werden.

Die folgende Auswertung und Analyse des Entscheidungsproblems mit PROMETHEE wurde mithilfe der PROMETHEE-Cloud erstellt. Tabelle 4.7 zeigt die PROMETHEE-Flüsse der Maßnahmen und Abbildung 4.11 die Ergebnisse als Balkendiagramm.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Entscheidungsträger die Maßnahme Hybrid Propulsion SC präferiert, gefolgt von den Maßnahmen LED Floodlights und Idle Reduction SC. Die beiden Maßnahmen Pooling und LNG Power Pack haben darüber hinaus ebenfalls einen positiven Nettofluss  $\Phi$ , d. h. dass bei den genannten Maßnahmen der Eingangsfluss  $\Phi^+$  größer ist als der Ausgangsfluss  $\Phi^-$ . Sie werden somit gegenüber den Maßnahmen mit negativen Nettofluss bevorzugt. Am wenigsten präferiert wird die Maßnahme STS Eco Driving. Zu beachten ist, dass die Maßnahme Full Electric SC, obwohl sie in den ökologischen Kriterien am besten abschneidet, nur im Mittelfeld landet. Dies begründet sich vor allem in den ökonomischen Kriterien, bei denen diese Maßnahme nicht so gut abschneidet.

Eine genauere Analyse der Maßnahmen unter den Kriterien erlaubt Abbildung 4.12. Die Abbildung zeigt die Nettoflüsse  $\Phi_j(a)$  der Maßnahmen  $a \in A$  auf den Kriterien  $j \in J$  sowie den aggregierten Nettofluss. Hierbei werden die Kriterien auf der Abszisse mit ihrer jeweiligen Gewichtung als Balken dargestellt und werden die auf der rechten Ordinate abgelesen. Der Nettofluss der Maßnahmen pro Kriterium ist als Liniendiagramm dargestellt und wird auf der linken Ordinate abgelesen.

Aufgrund der, im Vergleich zu den ökonomischen Kriterien, niedrigen Gewichtung der Feinstaubemissionen, Versauerung und Sommersmog haben diese Kriterien keinen großen Einfluss auf das Ergebnis. In Abbildung 4.12 ist zu erkennen, dass der Nettofluss der Maßnahmen auf den genannten Kriterien nahezu identisch ist. Bei den ökonomischen Kriterien ist zu erkennen, dass der Kapitalwert und die Investition einen hohen Einfluss auf das Ergebnis haben. Insbesondere fächern die Linien im Diagramm, d. h. die Bewertungen unter den genannten Kriterien, stark auf. So gibt es Maßnahmen wie Hybrid SC, die beim Kapitalwert gut abschneiden, bei den Investitionen allerdings eher schlecht. Dies trifft darüber hinaus auf Maßnahmen zu, die eine hohe anfängliche Investition benötigen, aber durch den Kapitalwert als sinnvolle Investition bewertet werden (vgl. auch Tabellen 4.4 und 4.5).

Sind die Entscheidungsträger an dieser Stelle nur daran interessiert, eine präferierte Maßnahme zu bestimmen, so wird die Maßnahme Hybrid SC präferiert. Im vorliegenden Fall soll ein präferiertes Portfolio von Maßnahmen erzeugt werden, da das CTT mehrere Maßnahmen parallel umsetzen kann. Wie in Kapitel 3 dargestellt, werden im Folgenden Maßnahmenportfolios mithilfe eines Optimierungsmodells erzeugt und anschließend erneut

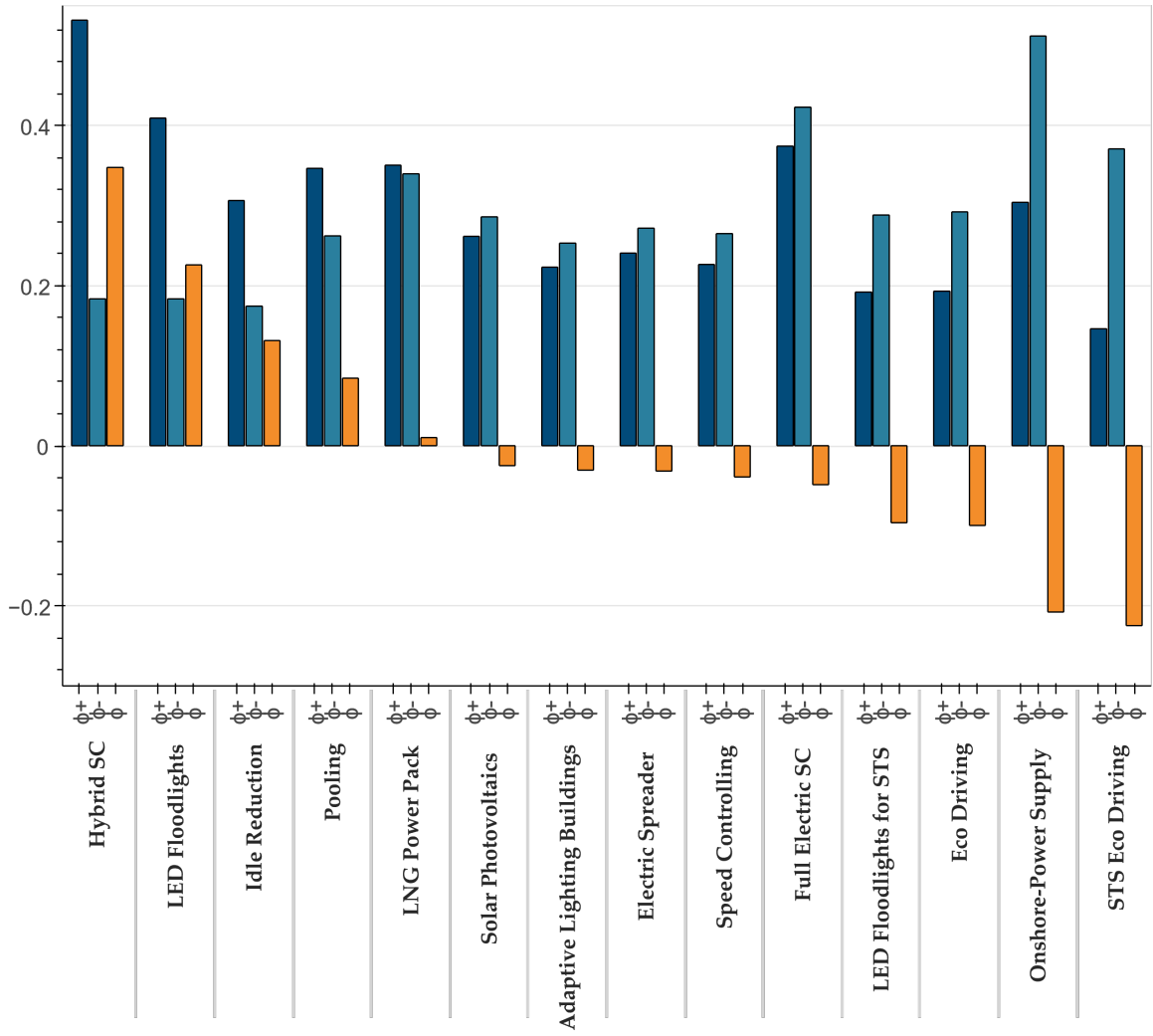


Abbildung 4.11: Ergebnisse der PROMETHEE-Bewertung der Maßnahmen

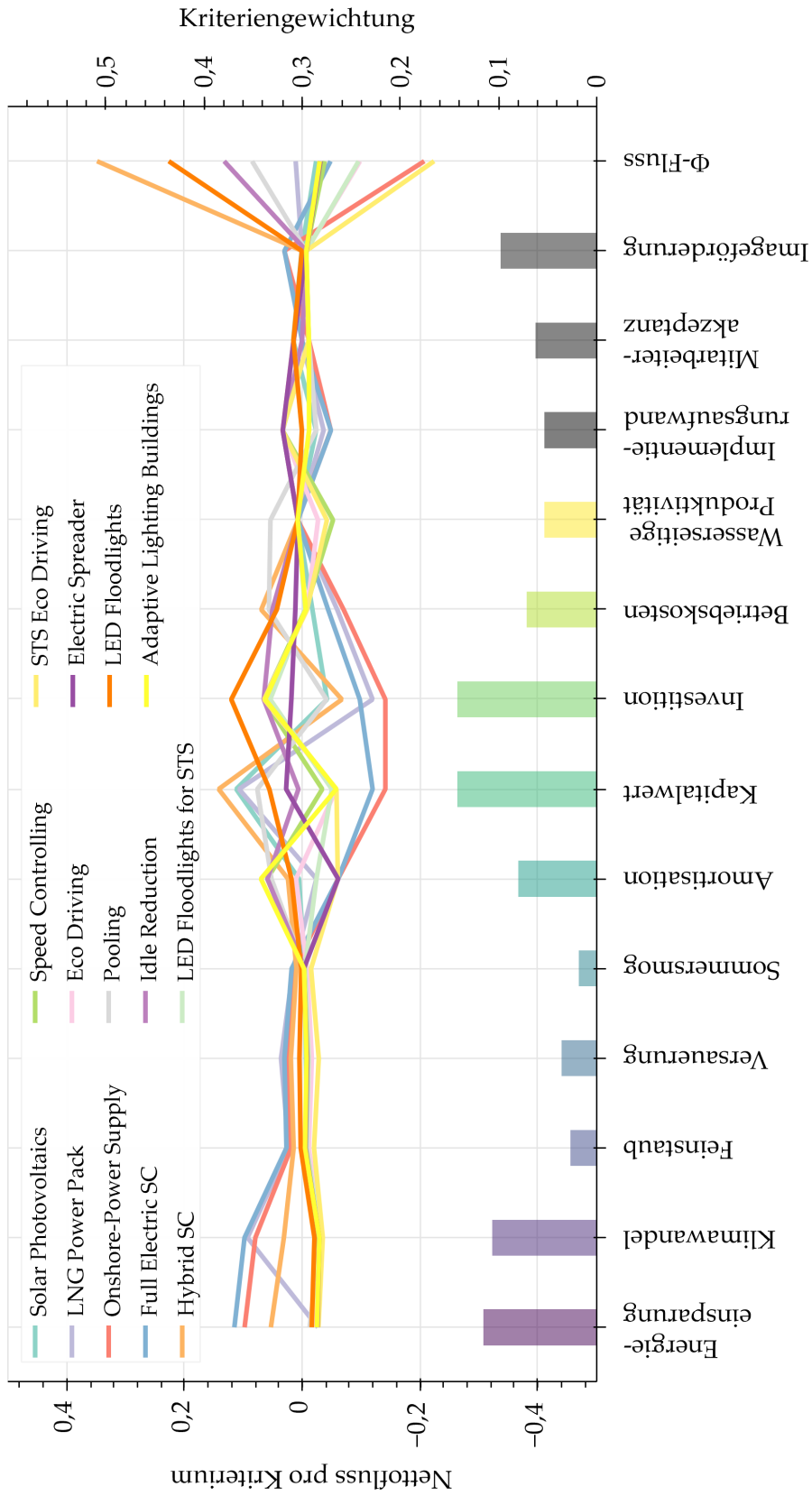


Abbildung 4.12: Ergebnisse der PROMETHEE-Bewertung der Maßnahmen pro Kriterium. Dargestellt sind die Nettoflüsse pro Kriterium und Maßnahme als Liniendiagramm. Die Kriteriengewichtung ist als Balkendiagramm dargestellt. Die Bewertungen der Maßnahmen fächern vorallem bei den ökonomischen Kriterien auseinander.

Tabelle 4.7: Ergebnisse der PROMETHEE-Bewertung der Maßnahmen

Maßnahme	$\phi^+$	$\phi^-$	$\phi^{\text{netto}}$
Hybrid SC	0,532	0,184	0,348
LED Floodlights	0,409	0,183	0,226
Idle Reduction	0,306	0,174	0,132
Pooling	0,347	0,263	0,084
LNG Power Pack	0,350	0,340	0,011
Solar Photovoltaics	0,261	0,286	-0,025
Adaptive Lighting Buildings	0,223	0,253	-0,030
Electric Spreader	0,241	0,272	-0,031
Speed Limitation SC	0,226	0,265	-0,039
Full Electric Propulsion	0,374	0,423	-0,048
LED Floodlights for STS	0,192	0,288	-0,096
Eco Driving	0,193	0,292	-0,099
Onshore-Power Supply	0,304	0,512	-0,208
STS Eco Driving	0,146	0,371	-0,225

mit PROMETHEE bewertet. Das Vorgehen orientiert sich hierbei an dem in Kapitel 3 definierten Entscheidungsprozess für mehrkriterielle Portfolioentscheidungen.

### 4.3 PORTFOLIOERZEUGUNG

Mithilfe der Bewertung der Maßnahmen aus Tabelle 4.7 kann nun das Optimierungsmodell zur Portfolioerzeugung aufgebaut werden. Hierfür wird, wie in Abschnitt 3.8 definiert, die Konstante  $t_{\min} = -\min_{a \in A} \Phi_a = 0,225$  auf den Nettofluss der Maßnahmen addiert.

In diesem Projekt streben die Entscheidungsträger eine parallele Implementierung von maximal vier Maßnahmen an, um das Management mit der Umsetzung nicht zu überfordern. Darüber hinaus sollen durch die Maßnahmen mindestens fünf Mio. Kilowattstunden (kWh) Energie eingespart werden bei weniger als zwei Mio. € zusätzlicher Investitionen. Die Einschränkungen an die Anzahl der Maßnahmen ergibt sich aus der praktischen Überlegung, dass das Terminal nur eine beschränkte Anzahl Maßnahmen parallel zum laufenden Betrieb umsetzen kann.

Darüber hinaus werden in dem Optimierungsmodell die Abhängigkeiten zwischen den Maßnahmen berücksichtigt, die bereits am Anfang des Kapitels dargestellt wurden. Analog

zu der Notation aus Kapitel 3 wird folgendes Optimierungsmodell für die Erzeugung der Portfolios verwendet:

$$\max \sum_{i=1}^n (\phi(\alpha_i) + 0,225)x_i \quad (4.2)$$

$$\text{so dass} \quad \sum_{i=1}^n x_i \leq 4, \quad (4.3)$$

$$\sum_{i=1}^n I_i x_i \leq 2.000.000, \quad (4.4)$$

$$\sum_{i=1}^n E_i x_i \geq 5.000.000, \quad (4.5)$$

weitere Abhängigkeiten zwischen den Maßnahmen

$$x_i \in \{0,1\}, \quad i = 1, \dots, n \quad (4.6)$$

In der Zielfunktion 4.2 wird der modifizierte Nettofluss des Portfolios maximiert. Die Nebenbedingung 4.3 beschränkt die maximale Anzahl an Maßnahmen pro Portfolio auf vier. Die Nebenbedingungen 4.4 und 4.5 stellen sicher, dass das Portfolio maximal ein Investitionsausgabepotenzial von zwei Mio. € und mindestens fünf Mio. kWh Energie einspart. Hierbei bezeichnen  $I_i$  die Investitionen und  $E_i$  die Energieeinsparungen der Maßnahme  $i$ .

Entsprechend des in Abschnitt 3.8 vorgestellten Vorgehens, wird das oben definierte Modell mithilfe des Solvers *Gurobi 8* gelöst. Gurobi bietet über sogenannte *Pool*-Lösungen eine Funktion zur Bestimmung mehrerer Lösungen, die hier verwendet wurde, um die fünf besten Portfolios zu erzeugen. Im Rahmen dieser Analyse wurden fünf Portfolios erzeugt, um den Aufwand zur Bestimmung der Kriterienausprägungen der unbestimmbar Kriterien der Portfolios überschaubar zu halten. Wie in Kapitel 3 ausgeführt, müssten für das finale Ranking die Kriterienausprägungen aller  $2^{14}$  Portfolios bestimmt und mit PROMETHEE miteinander verglichen werden.

Die so erzeugten Portfolios sind in Tabelle 4.8 dargestellt. Es fällt auf, dass alle Portfolios die Maßnahmen Hybrid SC, LED Floodlights und Idle Reduction beinhalten. Darüber hinaus unterscheiden sich die Portfolios bei der verbleibenden Maßnahme. Die verbleibende Maßnahme ist entweder Pooling bei Portfolio 1, Adaptive Lighting Building bei Portfolio 2, Solar Photovoltaics bei Portfolio 3, Electric Spreader bei Portfolio 4 und Speed Controlling bei Portfolio 5. Betrachtet man den Zielfunktionswert der Portfolios, fällt auf, dass der Zielfunktionswert von Portfolio 1 um 0,1 besser ist als der von Portfolio 2. Bei den verbleibenden Portfolios unterscheidet sich der Zielfunktionswert nicht so stark.

Entsprechend dem Prozess für mehrkriterielle Portfolioentscheidungen werden im folgenden Kapitel die Kriterienausprägungen der Portfolios bestimmt. Anschließend werden die Portfolios erneut mit PROMETHEE bewertet, um das von den Entscheidungsträgern präferierte Portfolios zu bestimmen.

Tabelle 4.8: Die fünf besten Maßnahmenportfolios für das CTT mit den Einschränkungen der Entscheidungsträger

Portfolio/ Maßnahme	Hybrid Propulsion SC	LED Floodlights	Idle-Reduction SC	Pooling	Adaptive Lighting Buildings	Solar Photovoltaics	Electric Spreader	Speed Controlling SC	Zielfunktionswert
Portfolio 1	✓	✓	✓	✓					1,675
Portfolio 2	✓	✓	✓		✓				1,574
Portfolio 3	✓	✓	✓			✓			1,570
Portfolio 4	✓	✓	✓				✓		1,552
Portfolio 5	✓	✓	✓					✓	1,550

#### 4.3.1 Mehrkriterielle Bewertung der Portfolios

Für die mehrkriterielle Bewertung der Portfolios mithilfe von PROMETHEE werden im Folgenden die Kriterienausprägungen der Portfolios ermittelt. Hierbei wird für jedes Kriterium eine Aggregationsmethode definiert, die in Tabelle 4.9 dargestellt ist. Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass ein Großteil der Kriterienausprägungen über monotone Aggregationsfunktionen bestimmt werden. Darüber hinaus werden nicht-monotone und unbestimmbare Kriterien definiert.

Für die ökologischen Kriterien wird eine einfache lineare Summation der Kriterienausprägungen angesetzt. Diese ergibt sich intuitiv für die Energieeinsparung, da die kombinierte Energieeinsparung verschiedener Maßnahmen die Summe der Energieeinsparungen ist. Hierbei wird davon ausgegangen, dass sich die Maßnahmen nicht gegenseitig beeinflussen. Etwaige Abhängigkeiten werden nur über das Optimierungsmodell abgebildet. Da man bei Ökobilanzmodellen davon ausgeht, dass sich die Umweltwirkung eines Produktes oder Prozesses additiv aus allen assoziierten Umweltwirkungen vorgelagerter Produkte und Prozesse ergibt, wird dies auch hier bei der Bewertung der Portfolios angesetzt.

Die Amortisationszeit eines Portfolios kann nicht aus den Amortisationszeiten der enthaltenen Maßnahmen bestimmt werden. Aus Sicht der Kostenrechnung muss ein Portfolio als Einheit bewertet werden und ist somit nicht als Funktion der Amortisationszeiten der Maßnahmen darstellbar. Dieses Kriterium gehört somit zu den unbestimmbaren Kriterien und die Amortisationszeit muss für jedes Portfolio erneut ermittelt werden. Der Kapitalwert, die Investitionen und die Betriebskosten für ein Portfolio errechnen sich aus der Summe der entsprechenden Einzelwerte der Maßnahmen. Insbesondere beim Kapitalwert ist hier eine

**Tabelle 4.9:** Aggregationsmethode zur Bestimmung der Kriterienausprägungen der Maßnahmenportfolios am CTT. Die Aggregationsmethode wird verwendet, um die Kriterienausprägungen der Portfolios aus den Kriterienausprägungen der Maßnahmen zu bestimmen.

	Kriterium	Typ	Funktion
Ökologisch	Energieeinsparung	monoton	$\sum$
	Klimawandel	monoton	$\sum$
	Feinstaub	monoton	$\sum$
	Versauerung	monoton	$\sum$
	Sommersmog	monoton	$\sum$
Ökonomisch	Amortisationszeit	unbestimmbar	--
	Kapitalwert	monoton	$\sum$
	Investitionsausgaben	monoton	$\sum$
	Betriebskosten	monoton	$\sum$
Technisch	Wasserseitige Produktivität	unbestimmbar	$\bar{x}$
	Implementierungsaufwand	nicht-monoton	max
Sozial	Mitarbeiterakzeptanz	nicht-monoton	min
	Imageförderung	unbestimmbar	$\bar{x}$

einfache Addition möglich, da der Kapitalwert für alle Maßnahmen für einen Zeithorizont von 15 Jahren bestimmt wurde.

Die wasserseitige Produktivität einer Maßnahme, als Maß der Auswirkung der Maßnahme auf die Logistik, wird in Prozent angegeben. Die wasserseitige Produktivität einer Maßnahme wurde mithilfe des Simulationsmodells bestimmt. Da die Maßnahmen in einem Portfolio verschiedene Auswirkungen auf die Logistik im CTT haben können, und so die wasserseitige Produktivität beeinflussen, gehört dieses Kriterium zu den unbestimmbaren Kriterien. Da die Abbildung der Maßnahmen im Simulationsmodell ein sehr umfangreicher Prozess ist und die Implementierung verschiedener Portfolios ähnlich aufwändig ist, wird für die wasserseitige Produktivität eines Portfolios der Mittelwert der wasserseitigen Produktivität der Maßnahmen verwendet.

Der Implementierungsaufwand ist ein qualitatives Maß, das auf den Einschätzungen von Experten beruht. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass der Implementierungsaufwand mehrerer Maßnahmen mindestens so hoch ist wie der größte Implementierungsaufwand der einzelnen Maßnahmen. Die Implementierung verschiedener Maßnahmen wird also nicht einfacher, wenn man mehrere parallel umsetzt. Um die vorgegebene Kardinalskala des Kriteriums zu berücksichtigen, ergibt sich der Implementierungsaufwand eines Portfolios daher aus dem größten Implementierungsaufwand der enthaltenen Maßnahmen. Die entsprechende Aggregationsmethode ist also die max-Funktion.

Auch die sozialen Kriterien wurden durch Experteneinschätzungen bestimmt und auf einer Kardinalskala abgebildet. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die Umsetzung



mehrerer Maßnahmen die Mitarbeiter nicht erhöht. Die Mitarbeiterakzeptanz eines Portfolios ergibt sich aus dem Minimum der Mitarbeiterakzeptanz der Maßnahmen. Die min-Funktion wurde nach Rücksprache mit den Entscheidungsträgern angewandt.

Die Imageförderung sollte für jedes Portfolio neu ermittelt werden. Da diese im Rahmen des Projektes als Kardinalskala aus Experteninterviews abgeleitet wurde, wird sie für die Portfolioerstellung als Mittelwert definiert.

Die resultierenden Kriterienausprägungen für die ermittelten Portfolios sind in Tabelle 4.10 dargestellt. Die Kriterienausprägungen wurden mithilfe der oben definierten Funktionen bestimmt bzw. neu berechnet. Insbesondere wurde die Amortisationszeit der Portfolios auf Grundlage einer ökonomischen Bewertung bestimmt. Die Kriterienausprägungen der Portfolios bilden im Folgenden die Entscheidungstabelle für die erneute Bewertung durch PROMETHEE.

Für die anschließende Bewertung durch PROMETHEE werden die Präferenzfunktionsparameter und die Gewichtung aus der ersten Bewertung übernommen. Nach Rücksprache mit den Entscheidungsträgern wurde im Rahmen des Projektes festgelegt, dass die Präferenzinformationen, d. h. die Gewichtung und Präferenzfunktionen und -parameter für die Bewertung der Maßnahmen und der Portfolios gleich sind. Die Entscheidungsträger legt als für die Auswahl des Portfolios die gleichen Kriterien, Präferenzfunktionen und -parameter wie für die Bewertung der Maßnahmen an. Auch die folgende Analyse der Portfolios wurde mithilfe der PROMETHEE-Cloud erstellt.

Die Ergebnisse der PROMETHEE-Bewertung der Portfolios sind in Tabelle 4.11 und in Abbildung 4.13 als Balkendiagramm dargestellt. Von den Entscheidungsträgern wird demnach das Portfolio 4 präferiert, gefolgt von Portfolio 1 bis 3 in aufsteigender Reihenfolge. Portfolio 5 wird am wenigsten präferiert. Der Nettofluss  $\Phi$  der Portfolios 2, 3 und 5 liegt sehr nah beieinander, sodass man hier kaum von Präferenz zwischen den Portfolios sprechen kann. Eine genauere Analyse kann über die partielle Präordnung der Portfolios erfolgen.

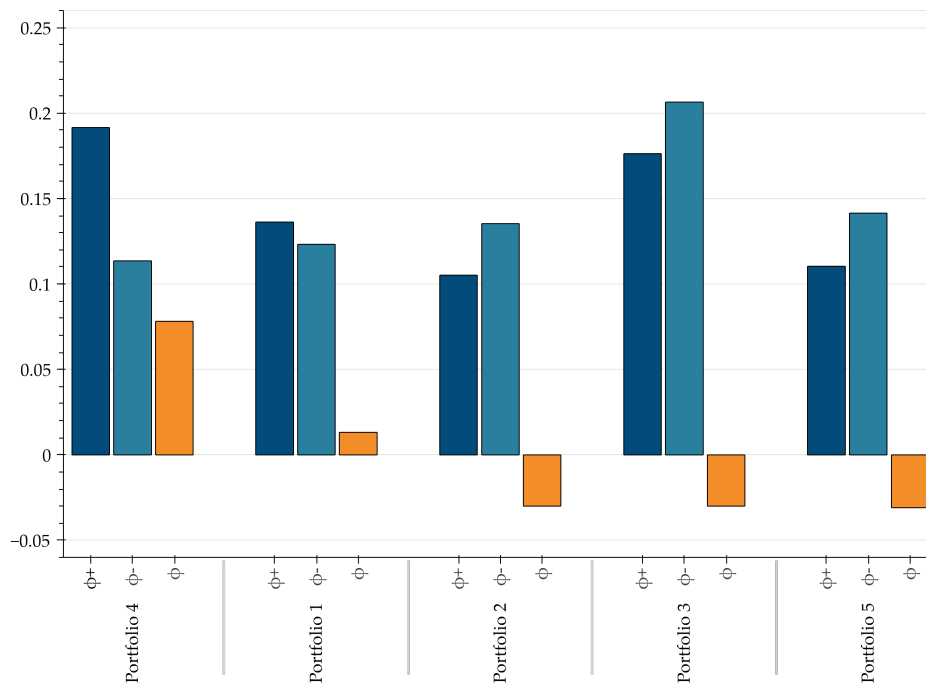
Abbildung 4.14 zeigt die partielle Präordnung der Portfolios nach PROMETHEE I. Demnach wird Portfolio 4 vor Portfolio 1, 2, 3 und 5 präferiert. Portfolio 1 wird vor Portfolio 2 und 5 präferiert. Die Portfolios 3, 5 und 2 sind nicht miteinander vergleichbar.

Neben der klassischen Darstellung der Präordnung als Graph, bei der insbesondere Informationen über die totale Ordnung der Alternativen fehlen, gibt es Darstellungen, die versuchen, beide Flüsse zu integrieren. Abbildung 4.15 zeigt die Präordnung der Portfolios zusammen mit dem Nettofluss als Achse. Diese Abbildung erlaubt sowohl die Darstellung der Unvergleichbarkeiten zwischen den Portfolios, als auch die totale Ordnung. Anhand der Abbildung wird nochmals verdeutlicht, dass die Nettoflüsse der Portfolios sehr nah beieinander liegen. Verglichen mit den Unterschieden der Nettoflüsse der anderen Portfolios, liegt Portfolio 4 recht weit entfernt. Dies kann als erster Indikator gesehen werden, dass Portfolio 4 auch unter eventueller Änderung der Kriteriengewichte und -ausprägungen präferiert wird.

Abbildung 4.16 zeigt sowohl die Kriteriengewichtung als auch die Nettoflüsse der Portfolios unter einzelnen Kriterien. Analog zu den Maßnahmen unterscheiden sich die Nettoflüsse der Portfolios bzgl. der ökologischen Kriterien nur minimal. Der Nettofluss der Portfolios unterscheidet sich bzgl. der ökonomischen Kriterien stark. So dominiert Portfolio 3 beim Kapitalwert und wird bei der Investition von den anderen Portfolios dominiert. Dies ist

**Tabelle 4.10:** Aggregierte Kriterienausprägungen der Nachhaltigkeitsportfolios am CTT. Die Kriterienausprägungen wurde mithilfe der Aggregationsmethoden aus den Kriterienausprägungen der Maßnahmen bestimmt.

	Portfolio 1	Portfolio 2	Portfolio 3	Portfolio 4	Portfolio 5
Energieeinsparung [t kWh]	7.079,99	6.249,78	6.150,08	6.226,08	6.14,32
Klimawandel [t kg CO <sub>2</sub> e]	1.998,40	2.034,31	2.122,67	2.049,14	1.991,31
Feinstaub [kg PM <sub>10</sub> e]	3.517,94	3.540,43	3.463,57	3.532,57	3.505,91
Versauerung [kg SO <sub>2</sub> e]	10.515,72	10.596,87	10.634,31	10.568,90	10.474,20
Sommersmog [kg NMVOC]	8.880,65	8.912,65	8.837,20	8.942,98	8.849,94
Investition [Mio. €]	0,96	1,02	1,95	1,41	0,96
Kapitalwert [Mio. €]	4,84	4,84	6,23	5,11	4,91
Amortisation [a]	2,71	4,54	3,16	3,87	2,96
Betriebskosten [Mio. €]	0,90	0,90	0,88	0,95	0,91
Implementierungsaufwand	5,00	3,00	5,00	3,00	3,00
Wasserseitige Prod. [%]	1,01	1,00	1,00	1,00	0,99
Mitarbeiterakzeptanz [Punkte]	1,00	2,00	2,00	2,00	1,00
Imageförderung [Punkte]	2,50	2,50	2,75	2,50	2,50



**Abbildung 4.13:** Ergebnisse der PROMETHEE-Bewertung der Portfolios. Portfolio 4 wird von den Entscheidungsträgern präferiert. Die Nettoflüsse der Portfolios 2, 3 und 5 liegen sehr nah beieinander

Tabelle 4.11: Ergebnisse der PROMETHEE-Bewertung der Portfolios

Portfolio	$\phi^+$	$\phi^-$	$\phi$
Portfolio 4	0,19156	0,11346	0,07810
Portfolio 1	0,13624	0,12309	0,01314
Portfolio 2	0,10510	0,13520	-0,03010
Portfolio 3	0,17627	0,20638	-0,03012
Portfolio 5	0,11035	0,14138	-0,03103

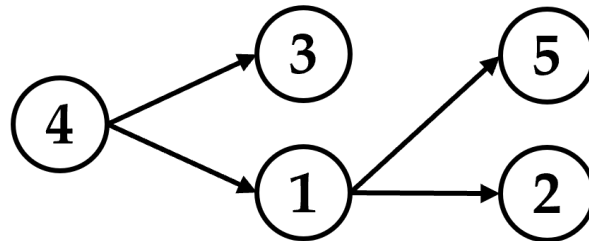


Abbildung 4.14: Partielle Präordnung der Portfolios nach PROMETHEE I

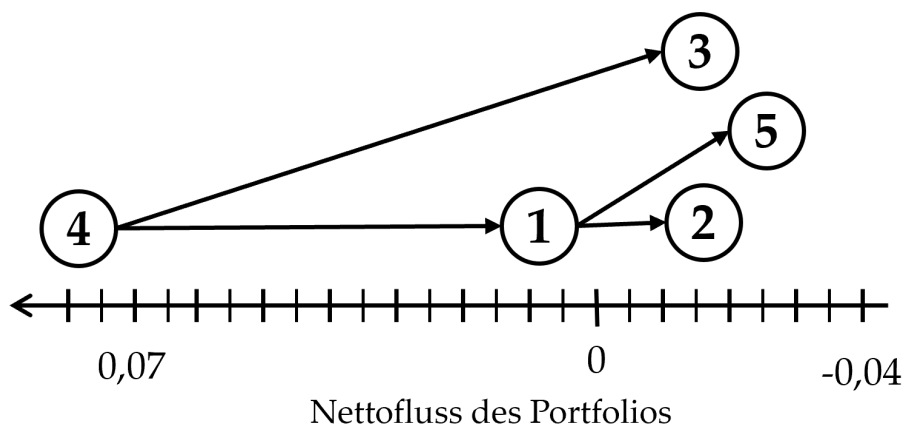


Abbildung 4.15: Partielle Präordnung der Portfolios nach PROMETHEE I mit Nettofluss

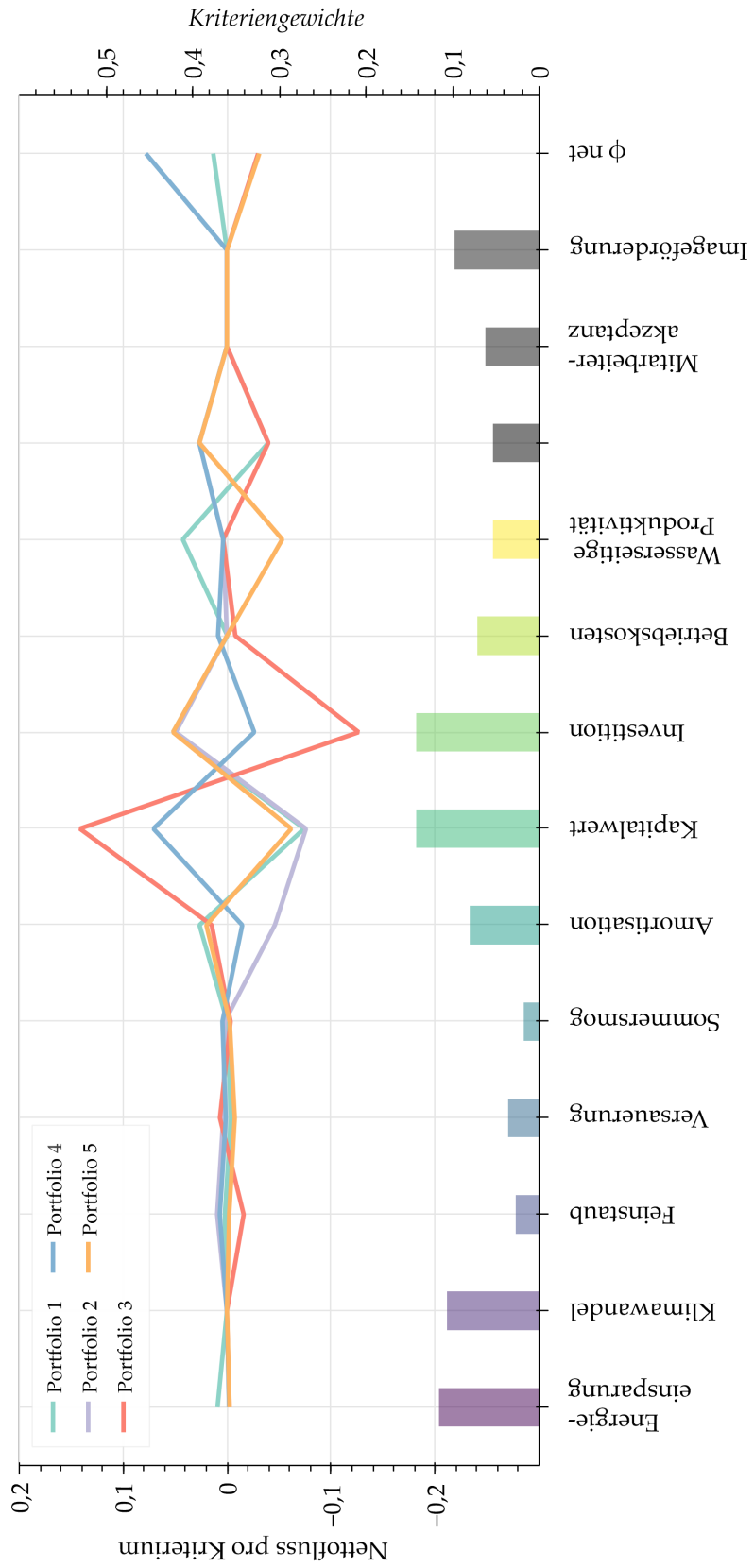


Abbildung 4.16: Ergebnisse der PROMETHEE-Bewertung der Portfolios pro Kriterium

bei genauerer Betrachtung der Kriterienausprägungen in Tabelle 4.10 zu erkennen. Der Nettofluss des präferierten Portfolios 4 bewegt sich meist zwischen den Extrempositionen der Kriterien. Der Nettofluss bzgl. der sozialen Kriterien ist bei allen Portfolios gleich. Diese Kriterien haben also unter den betrachteten Präferenzen des Entscheidungsträgers keinen Einfluss auf das Ergebnis, da die Kriterienausprägungen der Portfolios zu nah beieinander liegen. Sie sind damit nicht entscheidungsrelevant.

Die Bewertungen der Portfolios 2, 3 und 5 liegen sehr nah beieinander. Es bietet sich also an, die Sensitivität der ermittelten Rangfolge über weitere Analysen zu bestimmen. Darüber hinaus kann es durch Hinzufügen und Entfernen von Alternativen zum Rank Reversal kommen. Im folgenden Abschnitt wird das Ergebnis der PROMETHEE-Bewertung der Portfolios über Sensitivitätsanalysen analysiert und im Kontext des Entscheidungsproblems diskutiert.

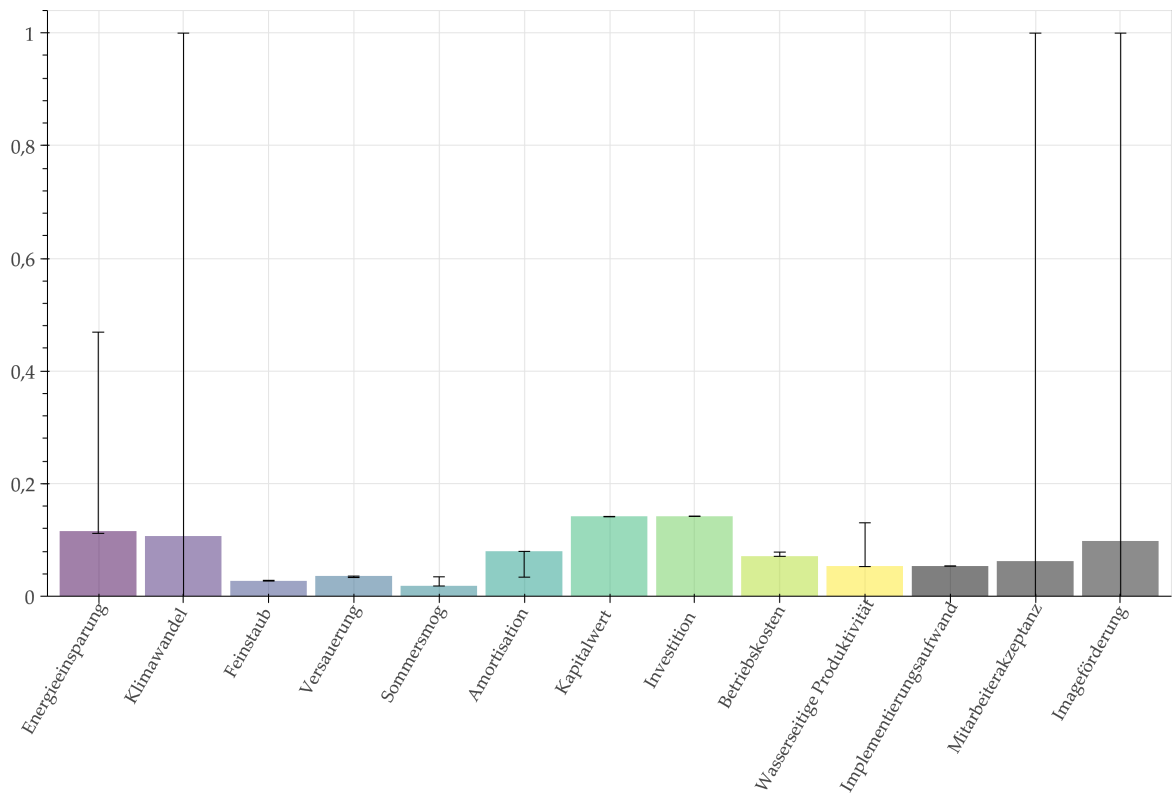
#### 4.4 SENSITIVITÄTSANALYSE UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Die Ergebnisse der PROMETHEE-Bewertung im vorherigen Abschnitt zeigen, dass das Portfolio mit dem höchsten Zielfunktionswert nicht das präferierte Portfolio ist. Wie eingangs hergeleitet liegt dies in den nicht-monotonen und unbestimmbaren Kriterien begründet. Die ermittelten Portfolios unterscheiden sich in einer Maßnahme und haben daher sehr ähnliche Kriterienausprägungen. Aus diesem Grund wird das Ergebnis aus dem vorherigen Abschnitt hier mittels Sensitivitätsanalysen überprüft und diskutiert.

Da die Nettoflüsse der Portfolios in der PROMETHEE-Bewertung sehr nah beieinander liegen, kann das Ergebnis mithilfe der in Kapitel 3 eingeführten Schranke in Gleichung 3.15 auf Rank Reversal überprüft werden. Man kann schnell überprüfen, dass zwischen allen Portfolios Rank Reversal auftreten kann. Da die betrachtete Menge an Portfolios nur eine kleine Teilmenge der möglichen Portfolios ist, muss davon ausgegangen werden, dass sich die Rangfolge durch Hinzufügen oder Entfernen von Portfolios ändert.

Abbildung 4.17 zeigt die Stabilitätsintervalle für die PROMETHEE-Bewertung der Portfolios (vgl. Kapitel 3). Es ist zu erkennen, dass bei vielen Kriterien eine kleine Änderung der Gewichtung zu einer Änderung der Rangfolge der Portfolios führt. Vor allem bei den ökonomischen Kriterien und einigen ökologischen Kriterien sind die Stabilitätsintervalle sehr klein. Die Änderung in der Rangfolge bezieht sich immer auf die Portfolios 2, 3 und 5, da hier die Nettoflüsse sehr nah beieinander liegen. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die Stabilitätsintervalle des Klimawandels, der Mitarbeiterakzeptanz und der Imageförderung das ganze Intervall  $[0, 1]$  umfassen. Die Kriteriengewichtung dieser Kriterien hat also keinen Einfluss auf das Ergebnis. Wie oben bereits vermutet, sind diese Kriterien nicht mehr entscheidungsrelevant. Eine detaillierte Analyse des Einflusses einer Variation der Gewichtung eines Kriteriums auf das Entscheidungsproblem ermöglichen die Insensitivitätsintervalle der Gewichte.

Abbildung 4.18 zeigt die Insensitivitätsintervalle für ausgewählte Kriteriengewichte. Die Abbildungen zeigen für ausgewählte Kriterien die Änderungen des Nettoflusses der Portfolios bei Änderung der entsprechenden Kriteriengewichtung. Abbildung 4.18b ist zu entnehmen, dass die aktuelle Kriteriengewichtung genau zwischen zwei Schnittpunkten



**Abbildung 4.17:** Stabilitätsintervalle der Portfolios. Die Rangfolge der Portfolios ist nicht stabil: bei vielen Kriteriengewichten führen kleine Änderungen schon zu Änderungen in der Rangfolge der Portfolios. Die Kriteriengewichtung des Klimawandels, der Mitarbeiterakzeptanz und der Imageförderung haben keinen Einfluss auf die Rangfolge der Portfolios.

der abgebildeten Geraden liegt. Eine Änderung der Gewichtung der Feinstaubemissionen führt also dazu, dass zwei Portfolios die Rangfolge tauschen. Wird die Gewichtung der Feinstaubemissionen beispielsweise ein wenig erhöht, wird Portfolio 5 vor Portfolio 3 präferiert.

Die Insensitivitätsintervalle erlauben darüber hinaus eine Analyse, ab welchen Kriteriengewichtungen Portfolio 4 nicht mehr präferiert wird. Es ist also möglich, die Stabilität des präferierten Portfolios in Abhängigkeit der Kriterienausprägungen zu charakterisieren. Betrachtet man z. B. die Amortisationszeit (Abbildung 4.18d), wird ab einer Gewichtung von 18 % Portfolio 1 vor Portfolio 4 präferiert. Ab einer Gewichtung von 30 % des Kapitalwerts wird Portfolio 3 präferiert (vgl. Abbildung 4.18e) und ab einer Gewichtung von 23 % für die Investition wird wieder Portfolio 1 präferiert (vgl. Abbildung 4.18f). Insgesamt kann man festhalten, dass die Präferenz von Portfolio 4 sehr robust gegenüber Variationen der Kriteriengewichtung ist. Erst ab einer großen Änderung der Gewichtung einzelner Kriterien verliert Portfolio 4 den ersten Rang.

Die bisherige Analyse der Sensitivität hat den Einfluss einzelner Kriterienausprägungen auf das Ergebnis untersucht. Um die interkriteriellen Abhängigkeiten des Entscheidungsproblems analysieren zu können, bieten sich Monte-Carlo-Simulationen auf den Kriteriengewichten an. Eine Monte Carlo Simulation ist eine Methode, bei der mehrfach Zufallsstichproben einer Wahrscheinlichkeitsverteilung gezogen und anschließend analysiert werden. Im Bereich der MCDA werden Monte-Carlo-Simulationen für die Kriteriengewichtungen ausgeführt, indem, basierend auf der vorliegenden Gewichtung, wiederholt neue Kriteriengewichtungen gezogen werden (Hyde u. a., 2003). Hierbei erlaubt man geringe Änderungen in den vorhandenen Kriteriengewichtungen und zieht z. B. mithilfe der Gleichverteilung neue Kriteriengewichtungen. Dies erlaubt die Analyse des Einflusses der Änderung der Kriteriengewichtungen mehrerer Kriterien auf das Ergebnis (vgl. auch Abschnitt 3.6). Die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation können dann über Boxplots des Nettoflusses der Alternativen des Entscheidungsproblems dargestellt werden.

Abbildung 4.19 zeigt Boxplots des Nettoflusses der Portfolios einer Monte-Carlo-Simulation auf den Kriteriengewichten. Hierbei wurden insgesamt 100 Stichproben gleichverteilt gezogen, die eine Variation der Kriteriengewichte pro Kriterium um 10 % erlauben. Die Monte-Carlo-Simulation erlaubt also die Analyse des Entscheidungsproblems unter Änderung von mehreren Kriteriengewichten. Hierbei wurde sichergestellt, dass die simulierten Kriteriengewichte den Anforderungen an Kriteriengewichte für PROMETHEE genügen. Insbesondere wurden nur diejenigen Kriteriengewichte verwendet, die in Summe 1 ergeben. Auch bei der interkriteriellen Analyse zeigt sich, dass Portfolio 4 weiterhin präferiert wird. Portfolio 2 ist durchgängig auf Rang 2. Die Portfolios 2, 3 und 5 tauschen je nach Kriteriengewichtung die Rangfolge.

Im Allgemeinen kann man schließen, dass Portfolio 4 vom Entscheidungsträger präferiert wird und sich diese Rangfolge nicht durch kleine Änderungen in den Kriteriengewichtungen ändert. Die Rangfolge der Portfolios ist, trotz der sehr ähnlichen Kriterienausprägungen der Portfolios, sehr robust.

Die hier dargestellten Daten und Analysen stammen aus den Jahren der Projektlaufzeit des Projekts SuStEnergyPort, d. h. sie wurden in den Jahren 2016 bis 2019 erhoben. Zum aktuellen Zeitpunkt (November 2022) wurden am CTT bereits einige Maßnahmen umgesetzt.

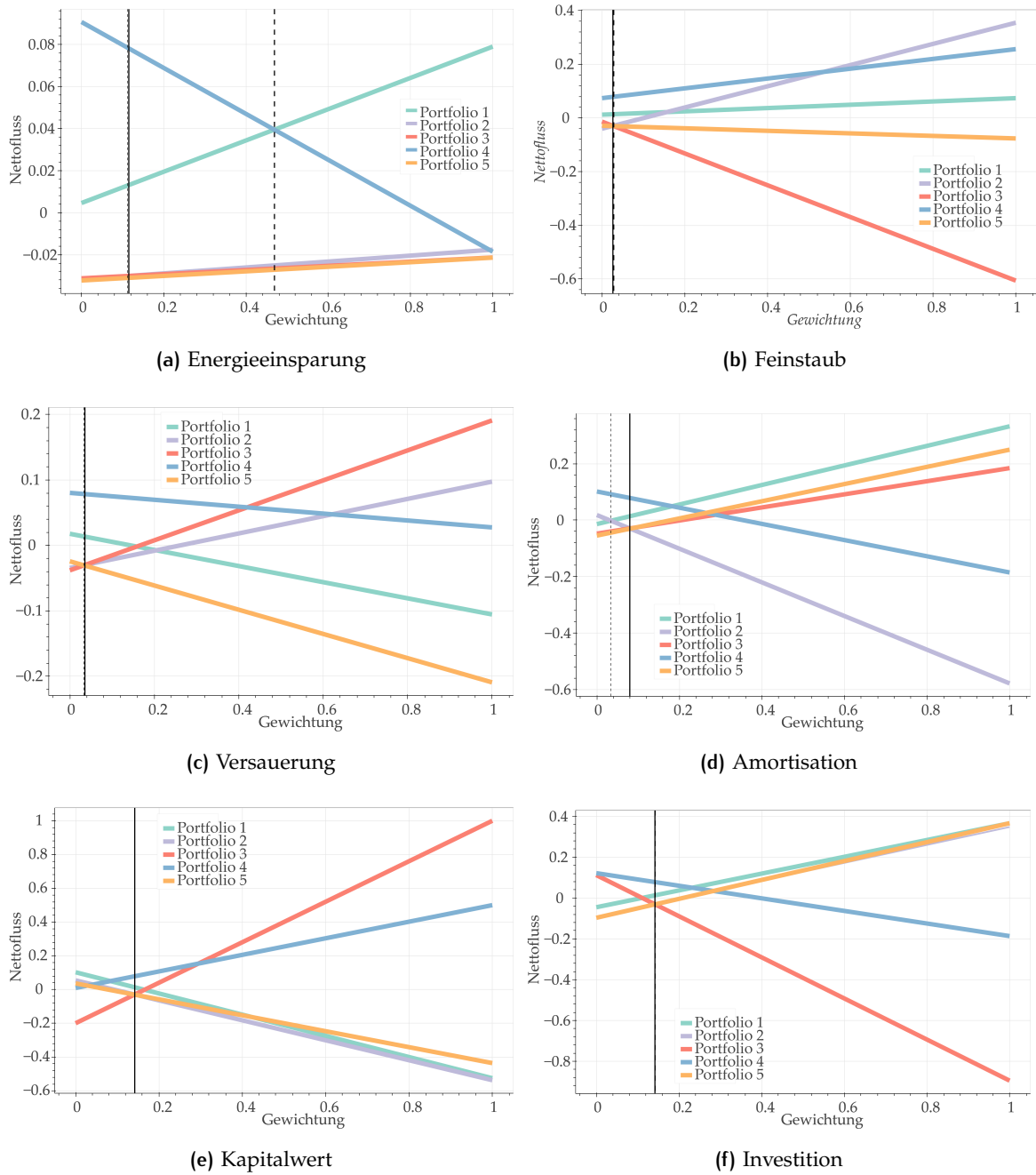


Abbildung 4.18: Insensitivitätsintervalle für ausgewählte Kriterien der Portfolio-Bewertung. Die senkrechten Linien stellen die aktuelle Kriteriengewichtung bzw. die Insensitivitätsintervalle dar.



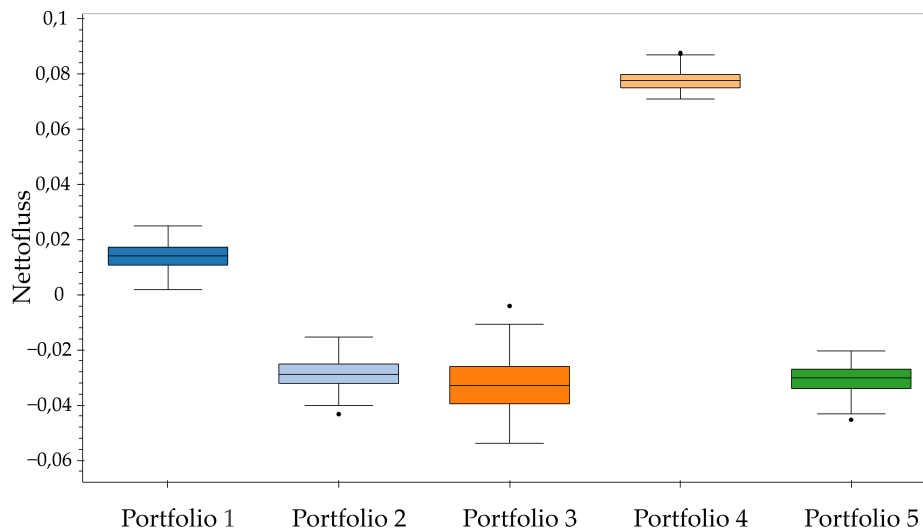


Abbildung 4.19: Boxplots des Nettoflusses der Portfolios einer Monte-Carlo-Simulation der Kriteriengewichte. Die Kriteriengewichte wurden gleichverteilt simuliert und erlauben eine Variation von 10 % pro Kriterium.

So hat die Terminalbetreiberin seit Dezember 2020 bereits mehrere hybride SC im Einsatz mit dem Ziel, den gesamten Horizontaltransport auf hybride SC umzurüsten (HHLA, 2021). Dies deckt sich mit den hier vorgestellten Ergebnissen, da die Einführung von hybrid SC die präferierte Maßnahme des Betreibers ist und auch im präferierten Portfolio vertreten ist. Darüber hinaus wurde Siemens im Jahr 2021 von der HPA beauftragt, für das CTT eine Landstromversorgung für Containerschiffe zu errichten (Siemens AG und Oellerich, 2021). Die Maßnahme wird in der vorliegenden Analyse von der Terminalbetreiberin weniger präferiert. Bei dieser Maßnahme stehen sehr hohe Reduktionen der Emissionen und Umweltwirkung hohen Investitionen und Betriebskosten gegenüber, was dazu führt, dass diese Maßnahme im Hafen schon vielfach diskutiert wurde. Aufgrund des hohen finanziellen Aufwands wurde die Maßnahme bis zum Projektende von der Terminalbetreiberin des CTT nicht weiter verfolgt. Der Pressemitteilung von Siemens AG und Oellerich (2021) ist zu entnehmen, dass die Landstromanlage über eine im November 2020 in Kraft getretenen Verwaltungsvereinbarung gefördert wird, die in der vorliegenden Analyse nicht berücksichtigt wurde. Durch Berücksichtigung der Förderung verbessern sich die ökonomischen Kriterienausprägungen der Maßnahme deutlich.

## 4.5 ZUSAMMENFASSUNG

Die Fallstudie am CTT demonstriert die Anwendbarkeit des in Kapitel 3 vorgestellten Ablaufs und der Methodik auf Basis von PROMETHEE. Die Daten für die Fallstudie stammen aus dem Projekt SuStEnergyPort und wurden dort in enger Zusammenarbeit mit den Entscheidungsträgern erhoben und durch verschiedene Experten und Expertinnen ermittelt. Von den 14

Maßnahmen des Projektes, die im Hinblick auf 13 Kriterien bewertet wurden, wurden insgesamt fünf Portfolios erstellt. Für diese Portfolios wurden erneut die Kriterienausprägungen unter Berücksichtigung der Aggregationsmethode der Kriterien bestimmt und anschließend durch [PROMETHEE](#) bewertet. Aufgrund der nicht-monotonen und unbestimmbaren Kriterien, d. h. Kriterien, deren Kriterienausprägung der Portfolios nicht als monotone Funktion der Kriterienausprägung der enthaltenen Maßnahmen dargestellt werden können, wird vom Entscheidungsträger nicht das optimale Portfolio, d. h. das Ergebnis des Optimierungsmodells, präferiert. Nichtsdestotrotz können durch das Optimierungsmodell gute Portfolios erzeugt werden, die anschließend nochmals mit [PROMETHEE](#) bewertet werden.

Alle Auswertungen und Analysen, die auf der [MADM-Methode PROMETHEE](#) beruhen, wurden mithilfe der *PROMETHEE-Cloud* durchgeführt. Insbesondere die Sensitivitätsanalysen und die Monte-Carlo-Simulation können mit dem Expertentool durchgeführt werden.

Die Anwendung der Methode zur Erzeugung und Bewertung von Maßnahmenportfolios unter Berücksichtigung von nicht-monotonen und unbestimmbaren Kriterien stellt die Neuerung dieses Kapitels dar. Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen können so auch nicht-monotone und unbestimmbare Kriterien im Portfolioentscheidungsprozess berücksichtigen.

Viele Studien zur Verbesserung der Nachhaltigkeit in Containerterminals enden bei der Definition und Charakterisierung der Maßnahmen. Das Betrachten von Portfolioentscheidungen im betrieblichen Kontext zur Steigerung der Nachhaltigkeit und Reduktion der Umweltwirkung, insbesondere in Containerterminals, ist bisher nicht in der wissenschaftlichen Literatur untersucht worden. Die Anwendung der vorgestellten Methode stellt daher eine Neuerung dar.

# 5

## ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im aktuellen Kapitel werden die wichtigsten Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst, die eingangs gestellten Forschungsfragen beantwortet und die Ergebnisse kritisch diskutiert. Hierzu wird im folgenden Abschnitt die Arbeit zusammenfassend dargestellt. In Abschnitt 5.2 werden die in Kapitel 1 formulierten Forschungsfragen im Gesamten beantwortet. Darauf aufbauend werden Schlussfolgerungen in Abschnitt 5.3 gezogen. Eine mögliche Übertragung der Ergebnisse, sowohl methodisch als auch praktisch, wird in Abschnitt 5.4 diskutiert. Die Arbeit endet mit der Darstellung des weiteren Forschungsbedarfs und einem Ausblick in Abschnitt 5.5.

### 5.1 ZUSAMMENFASSUNG

Der anthropogene Klimawandel wird von vielen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern als drängendes globales Umweltproblem gesehen und führt heute schon zu vermehrten Starkwetterereignissen. Die Emissionen von Treibhausgasen stehen in direktem Zusammenhang mit der Erhöhung der weltweiten Durchschnittstemperatur (IPCC, 2021). Aus diesem Grund hat die Bundesregierung das Ziel formuliert, bis zum Jahr 2030 die Treibhausgasemissionen um 65 % gegenüber 1990 zu senken und im Jahr 2050 netto negative Emissionen vorzuweisen. Das bedeutet, dass dann in Deutschland mehr Treibhausgase auf natürliche Weise gebunden als ausgestoßen werden sollen (BMU, 2021). Neben den Zielen zur Reduktion der Treibhausgase wurden von der Europäischen Union (EU) im Jahr 2016 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung (SDG), definiert, die weltweit eine Sicherung der nachhaltigen Entwicklung dienen sollen.

Viele Unternehmen stehen vor der Herausforderung, die eigene Umweltwirkung, insbesondere die Treibhausgasemissionen, ökonomisch nachhaltig zu senken. Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen in Unternehmen müssen festlegen, ob und in welchem Umfang eine oder mehrere Investitionen in Maßnahmen zur Reduktion der Umweltwirkung und Steigerung der Nachhaltigkeit getätigt werden sollen. Die Entscheidung hängt hierbei von verschiedenen, konfligierenden Zielen sowie den Präferenzen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin ab.

Im Rahmen von Forschungsprojekten und wissenschaftlichen Veröffentlichungen wurden für Containerterminals in den letzten Jahren viele Maßnahmen zur Reduktion der Umweltwirkung und insbesondere Senkung der Treibhausgase vorgestellt. Zum Beispiel können Treibhausgasemissionen durch die Verwendung von hybriden oder elektrischen Antriebssträngen oder durch gezielte Schulungen der Mitarbeiter gesenkt werden. Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen stehen vor dem Problem, die für das eigene Terminal sinnvollen Maßnahmen auszuwählen und umzusetzen. Die Auswahl beschränkt

sich hierbei oft nicht auf eine einzelne Maßnahme, sondern kann ein Maßnahmenbündel oder Portfolio sein, das auf Basis mehrerer Kriterien erzeugt, bewertet und ausgewählt werden muss.

In der aktuellen wissenschaftlichen Literatur gibt es keine Studien, die Nachhaltigkeitsmaßnahmen in Containerterminals auf Basis einer mit dem Terminalbetreiber abgestimmten Menge an Nachhaltigkeitskriterien miteinander vergleichen. Insbesondere gibt es keine Studien, die das Zusammenfassen in Portfolios untersuchen und eine anschließende Empfehlung zur Umsetzung bestimmter Maßnahmen bieten.

Ein methodisches Problem bei mehrkriteriellen Portfolioentscheidungen liegt in der Berücksichtigung von unbestimmbaren Kriterien, d. h. Kriterien, bei denen die Kriterienausprägung des Portfolios nicht als Funktion der Kriterienausprägungen der Maßnahmen dargestellt werden kann. Diese Kriterien sollten bei der Methode zur Lösung von mehrkriteriellen Portfolioentscheidungen berücksichtigt werden. Weiterhin sollten für Entscheidungsprobleme mit ökologischen Kriterien sinnvollerweise nicht-kompensierende oder teilweise-kompensierende Multi-Attribut-Entscheidungsunterstützung, engl. Multi Attribute Decision Making (**MADM**)-Methoden verwendet werden. Hier bieten sich insbesondere Outranking-Verfahren der **MADM** an. Auf Grundlage der genannten und weiterer Anforderungen wird in dieser Arbeit eine Methode zur Erzeugung und Bewertung von mehrkriterielle Portfolioentscheidungen entwickelt. Die Methode wird an einer umfangreichen Fallstudie für Portfolioentscheidungen im Containerterminal Tollerort (**CTT**), Hamburg angewandt und validiert.

In **Kapitel 1** wird das Ziel der Arbeit auf Basis der dargestellten Problemstellung definiert. Hierzu werden insgesamt vier Forschungsfragen formuliert, die kapitelübergreifend beantwortet werden.

In **Kapitel 2** wird eine Einführung in die Nachhaltigkeit von Containerterminals gegeben. Hierzu werden zunächst die logistischen Prozesse und der Aufbau sowie gängige Definitionen von Nachhaltigkeit beschrieben. Darauf aufbauend wird der Nachhaltigkeitsbegriff für Containerterminals definiert sowie verschiedene Ansätze und Maßnahmen zur Steigerung der Nachhaltigkeit in Containerterminals aus der Literatur abgeleitet. Unterschieden wird hier zwischen Reduktionen von Transportprozessen, Steigerung der Energieeffizienz und der Verwendung emissionsarmer Verkehrsmittel. Viele Bestrebungen zur Reduktion der Umweltwirkung in Containerterminals gehen auf Effizienzsteigerungen durch Optimierungsmodelle zurück. Zu den weiteren Maßnahmen gehören z. B. der Austausch von Geräten und Schulungen von Mitarbeitern. Weiterhin zeigt sich, dass es keine allgemeingültige Menge an Bewertungskriterien für Nachhaltigkeit in Containerterminals gibt, sodass eine Bewertung von Maßnahmen terminalspezifisch erfolgen muss. Das Kapitel endet mit der Fragestellung, wie verschiedene Maßnahmen miteinander verglichen und zu Portfolios zusammengefasst werden können.

In **Kapitel 3** werden zunächst die Begriffe der mehrkriteriellen Entscheidungsunterstützung und der mehrkriteriellen Portfolioentscheidung abgegrenzt. Anschließend folgt eine Einführung in die mehrkriterielle Entscheidungsunterstützung (**MCDA**), und bekannte Ansätze zu Portfolioentscheidungen auf Basis von **MADM**-Methoden. Insbesondere werden klassische und Outranking-Methoden als Grundlage für Portfolioentscheidung vorgestellt. Bislang kann keine der bekannten Methoden für Portfolioerzeugungen sinnvoll für das

vorliegende Problem verwendet. Insbesondere wird argumentiert, dass für Entscheidungen, die ökologische Kriterien umfassen, Outranking-Methoden geeignet sind, da sie nicht voll-kompensierend sind. Ein weiterer Aspekt ist der Umgang mit unbestimmbaren und nicht-monotonen Kriterien im Entscheidungsproblem, der bei Verwendung der klassischen MADM-Methoden vernachlässigt wird. Auf Basis der Outranking-Methode PROMETHEE wird ein methodisches Vorgehen für mehrkriterielle Portfolioentscheidungen vorgeschlagen und in einen Prozess für mehrkriterielle Portfolioentscheidungen eingebettet. Die entwickelte Methode berücksichtigt nicht-monotone und unbestimmbare Kriterien und beruht auf der Outranking-Methode PROMETHEE, bei der die Kompensation über die Präferenzfunktionen kontrolliert und gesteuert werden kann.

In **Kapitel 4** werden für das CTT in Zusammenarbeit mit dem Terminalbetreiber eine Kriterienhierarchie aus 13 Kriterien und eine Kriteriengewichtung für Nachhaltigkeitsmaßnahmen definiert. Darüber hinaus werden 14 Nachhaltigkeitsmaßnahmen vorgestellt und mithilfe von PROMETHEE miteinander verglichen. Im Anschluss wird, unter Verwendung der oben eingeführten Methode, ein präferiertes Maßnahmenportfolio bestimmt und analysiert. Sensitivitätsanalysen zeigen, dass das ermittelte Portfolio präferiert wird und den Anforderungen des Terminalbetreibers genügt.

## 5.2 BEANTWORTUNG DER FORSCHUNGSFRAGEN

Mehrkriterielle Portfolioentscheidungen sind im Allgemeinen schwierig zu lösen, da verschiedene Aspekte bei der Portfolioerstellung zu berücksichtigen sind. Die Schwierigkeit ergibt sich aus der methodischen Berücksichtigung der unbestimmbaren und nicht-monotonen Kriterien sowie der Präferenzen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin bei der Portfolioerzeugung. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit vier Forschungsfragen formuliert, die zur Erreichung einer sinnvollen Portfolioentscheidung am CTT beantwortet werden müssen.

1. Wie kann Nachhaltigkeit im Terminalbetrieb charakterisiert und durch welche Kriterien operationalisiert werden?

Bislang wird der Begriff Nachhaltigkeit für den Betrieb von Containerterminals nicht einheitlich definiert. Vielmehr muss für jedes Terminal, insbesondere in enger Zusammenarbeit mit den Terminalbetreibern, eine Definition des Begriffs erarbeitet werden. In dieser Arbeit werden die SDGs und Säulen der Nachhaltigkeit als Orientierungsmöglichkeit für diesen Prozess identifiziert (vgl. Abschnitt 2.3). Wichtige ökologische Kriterien in Containerterminals sind neben dem Klimawandel, dem Feinstaub und der Versauerung auch NO<sub>x</sub>-Emissionen, die im Rahmen der Fallstudie am CTT durch den Sommersmog abgebildet wurden (vgl. Abschnitt 4.2). Darüber hinaus sind, neben den ökonomischen Kriterien, auch technische Kriterien wichtig, insbesondere der Implementierungsaufwand und die wasserseitige Produktivität des Terminals. Allerdings werden auch hier von verschiedenen Terminals verschiedene Kriterien angelegt, sodass die technischen Kriterien keine Allgemeingültigkeit besitzen (vgl. Abschnitt 2.5).

Für das CTT wurde im Rahmen einer umfangreichen Fallstudie eine Kriterienhierarchie aus ökonomischen, ökonomischen, technischen und sozialen Kriterien erstellt. In enger Kooperation mit dem Terminalbetreiber wurden die Kriterien gewichtet und so in eine einheitliche Bewertungsgrundlage für verschiedene Maßnahmen überführt (vgl. Abschnitt 4.2.2).

2. Wie können Energienachhaltigkeitsmaßnahmen in Containerterminals identifiziert und miteinander verglichen werden?

In Kapitel 2 und 4 werden sinnvolle Energienachhaltigkeitsmaßnahmen für Containerterminals terminalspezifisch ausgewählt. In der wissenschaftlichen Literatur gibt es verschiedene Ansätze zur Reduktion von Emissionen und der Verbesserung der Nachhaltigkeit. Viele dieser Ansätze reduzieren die Umweltwirkung durch eine Erhöhung der Effizienz des Terminals (vgl. Abschnitt 2.4). Insbesondere werden die Terminalprozesse und der Einsatz der Geräte durch Optimierungsmodelle abgebildet und verbessert. Andere Ansätze richten sich nach den großen Emittenten in den Terminals, um spezifische Maßnahmen auszuwählen (vgl. Abschnitt 2.5).

Für das CTT wurden anhand der Emittenten in enger Kooperation mit dem Terminalbetreiber verschiedene potenziell gute Maßnahmen zur schnellen Senkung der Emissionen ausgewählt (vgl. Abschnitt 4.2.1). Der Terminalbetreiber und die Entscheidungsträger wurden durch ein Konsortium aus einem HHLA-Vorstandsmitglied, Mitarbeitenden der HPC GmbH und Mitarbeitenden des Terminals vertreten. Durch eine genaue Analyse auf Basis der ermittelten Kriterienhierarchie konnten diese Maßnahmen mithilfe von Methoden der MCDA verglichen werden. Aufgrund der ökologischen Kriterien wurde die nicht- bzw. teilweise kompensierende MCDA-Methode PROMETHEE verwendet. Bei MADM-Methoden die keine Kompensation erlauben oder nur teilweise kompensierend sind, können weniger gute Kriterienausprägungen nicht durch gute andere Kriterienausprägungen ausgeglichen werden. Insbesondere kann keine Verrechnung zwischen den Kriterien austreten, d. h. eine Maßnahme kann schlechte ökologische Kriterienausprägungen nicht durch gute ökonomische Ausprägungen ausgleichen (vgl. Abschnitt 3.6).

3. Wie können sinnvolle Maßnahmenportfolios identifiziert und erzeugt werden, sodass sie den Anforderungen der Terminalbetreiber genügen?

Im Rahmen der Arbeit wird ein zweistufiger Prozess zur Erzeugung der Maßnahmenportfolios verwendet. Zunächst werden die Maßnahmen mit PROMETHEE mehrkriteriell bewertet und anschließend mithilfe eines Optimierungsmodells zu Portfolios zusammengefasst. Diese Vorgehensweise bietet mehrere Vorteile: Zum einen können für die mehrkriterielle Bewertung Outranking-Verfahren verwendet werden, die, im Gegensatz zu klassischen MCDA-Methoden, nicht vollständig kompensierend sind. Zum anderen können so bei der Bewertung der Maßnahmen bereits die Präferenzen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 3.8). Die hier verwendete Methode PROMETHEE bietet sich insbesondere an, da sie verglichen mit anderen Outranking-Methoden besonders einfach zu verstehen und flexibel anzuwenden ist (vgl. Abschnitt 3.6.4). Über das Optimierungsmodell können weitere Abhängigkeiten zwischen den Maßnahmen,

sowie weitere Einschränkungen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin modelliert werden. Hierzu gehören z. B. Budget-Einschränkungen, die Anzahl der Maßnahmen und Mindestreduktionsziele für Kriterien, die durch das Maßnahmenportfolio erreicht werden sollen (vgl. Abschnitt 3.7). Die Zielfunktion maximiert die Gesamtbewertung der einzelnen Maßnahmen und liefert so ein gutes Portfolio, das aber nicht zwangsläufig vom Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerin nach PROMETHEE präferiert wird. Wie in Kapitel 3 dargelegt, ist die Güte des so ermittelten Portfolios stark abhängig von den Bewertungskriterien. Insbesondere ist die Güte auch abhängig von der zugrundeliegenden Aggregationsmethode pro Kriterium, d. h. wie die Kriterienausprägung des Portfolios aus den Kriterienausprägungen der Maßnahmen bestimmt werden kann.

Für das CTT wurden in der Fallstudie basierend auf der Kriterienhierarchie und den ermittelten Maßnahmen mithilfe des Optimierungsmodells Portfolios erstellt, die alle Einschränkungen des Entscheidungsträgers berücksichtigen. Hierzu gehören Einschränkungen, die das vorhandene Budget betreffen, Abhängigkeiten der Maßnahmen untereinander und Mindestreduktionen bestimmter Emissionen. Die so erstellten Portfolios enthalten jeweils vier Maßnahmen, die nach Aussage der Entscheidungsträger parallel umgesetzt werden können (vgl. Abschnitt 4.3).

4. Wie kann das vom Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerin präferierte Maßnahmenportfolio bestimmt werden?

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Typen Kriterien unterschieden: monotone Kriterien, nicht-monotone Kriterien und unbestimmbare Kriterien. Hierbei sind unbestimmbare Kriterien, deren Kriterienausprägung im Portfolio nicht als Funktion der Kriterienausprägungen der Maßnahmen dargestellt werden können. Je nachdem, wie viele nicht-monotone und unbestimmbare Kriterien in einem Portfolioentscheidungsproblem betrachtet werden, ist das optimale Portfolio des Optimierungsmodells nicht das von dem Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerin präferierte Portfolio (vgl. Abschnitt 3.7). Im Rahmen dieser Arbeit wurden mithilfe des Optimierungsmodells daher mehrere gute Portfolios erzeugt und erneut mit PROMETHEE bewertet (vgl. Abschnitt 3.8). Dies erlaubt es, das vom Entscheidungsträger oder der Entscheidungsträgerin präferierte Portfolio aus einer kleinen Menge möglicher Portfolios auszuwählen. Hierzu werden die Kriterienausprägungen der unbestimmbaren Kriterien der Portfolios erneut bestimmt. Dieses Vorgehen erlaubt es, die unbestimmbaren Kriterien bei mehrkriteriellen Portfolioentscheidungen zu berücksichtigen. Diese Methode wurde in einen strukturierten Prozess für mehrkriterielle Portfolioentscheidungen eingebettet (vgl. Abschnitt 3.9).

In der Fallstudie wurden insgesamt fünf Portfolios mithilfe des Optimierungsmodells erstellt. Nach einer erneuten Bestimmung der Kriterienausprägungen für die Portfolios wurden diese durch PROMETHEE bewertet (vgl. Abschnitt 4.3). Auch hier ist zu sehen, dass das Lösungsportfolio des Optimierungsmodells nicht das vom Entscheidungsträger präferierte Portfolio ist. Dies untermauert erneut das hier gewählte methodische Vorgehen bei der Portfolioerzeugung. Nichtsdestotrotz liegen die Bewertungen der Portfolios sehr nah beieinander. Die Robustheit der Bewertung eines Portfolios wurde anschließend über Sensitivitätsanalysen charakterisiert (vgl. Abschnitt 4.4). Das präferierte Portfolio der Fallstudie

liegt robust auf dem ersten Rang und wurde im Rahmen der Fallstudie zur Umsetzung empfohlen.

### 5.3 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Betrachtung von unbestimmbaren Kriterien und die Anwendung der Methode auf eine umfangreiche Fallstudie in Containerterminals stellt die methodische Neuerung dieser Arbeit dar. Mithilfe der vorgestellten Methodik ist es zum ersten Mal möglich, unbestimmbare Kriterien bei mehrkriteriellen Portfolioentscheidungen zu berücksichtigen. Durch die Verwendung der MADM-Methode PROMETHEE gelingt es, die Kompensation bei der Bewertung der Maßnahmen und Portfolios zu reduzieren. Die Reduktion der Kompensation ist vor allem bei Entscheidungsproblemen mit ökologischen Kriterien wichtig, da so eine einfach Verrechnung zwischen den Kriterien unterbunden wird.

Wie aus verschiedenen Veröffentlichungen zu entnehmen ist, wurden und werden am CTT verschiedene der hier untersuchten Maßnahmen umgesetzt (vgl. Abschnitt 4.4). Neben der Einführung von hybriden SC wird bereits eine PV-Anlage auf dem Terminalgelände betrieben. Im Jahr 2022 wurde der Bau einer Landstromanlage in Auftrag gegeben, die aufgrund neuer Förderprogramme unterstützt wird. In den analysierten Maßnahmen wurde die Landstromanlage von den Entscheidungsträgern nicht gut bewertet: Trotz guter Ausprägungen in den ökologischen Kriterien konnte die Maßnahmen aufgrund sehr hoher Ausprägungen in den ökonomischen Kriterien nicht überzeugen. Eine erneute Bewertung der ökonomischen Kriterien unter Einbeziehung der neuen Förderrichtlinien haben die Terminalbetreiber bzw. die HPA dann doch veranlasst, eine Landstromversorgung zu errichten.

Da die hier vorgestellten Daten, Kriterien und Maßnahmen den Stand des Terminals im Jahr 2019 abbilden, widerspricht die Errichtung einer Landstromanlage nicht den hier vorgestellten Ergebnissen. Im Gegenteil wirft dieser Umstand die Frage auf, inwieweit zukünftige Prognosen bei der Bewertung von Maßnahmen und Portfolios berücksichtigt werden sollten und können. Eine genauere Diskussion dazu ist in Abschnitt 5.5 zu finden.

### 5.4 ÜBERTRAGBARKEIT DER ERGEBNISSE

Vor dem Hintergrund der Energiewende und dem Ziel der Bundesregierung, bis zum Jahr 2040 CO<sub>2</sub>-neutral zu wirtschaften, stehen viele Unternehmen vor der Herausforderung, die eigenen Emissionen ökonomisch nachhaltig zu reduzieren. Zur Bewertung verschiedener Maßnahmen zur Reduktion und anschließenden Auswahl eines Maßnahmenportfolios kann die hier vorgestellte Methode verwendet werden.

Insbesondere können andere Terminalbetreiber sowohl einzelne Maßnahmen, die Bewertungen der Maßnahmen als auch das methodische Vorgehen übernehmen, um Nachhaltigkeitsportfolios zu erstellen. Wie in Kapitel 2 beschrieben, müssen zwar sowohl die Maßnahmen als auch die Bewertungskriterien terminalspezifisch bestimmt werden, für ähnliche Terminals kann aber ein Großteil der Ergebnisse übernommen werden. Insbe-



sondere das Simulationsmodell, die Ergebnisse der Ökobilanzen und die ökonomischen Bewertungen können ohne großen Aufwand auf neue Geräte und Terminals übertragen werden.

Das methodische Vorgehen für mehrkriterielle Portfolioentscheidungen für Nachhaltigkeitsmaßnahmen ist darüber hinaus auch in anderen Kontexten anwendbar. Bspw. können Nachhaltigkeitsmaßnahmen in Logistikunternehmen analysiert und miteinander verglichen werden. Insbesondere bei Logistikdienstleistern wie DHL oder GLS werden durch gezielte Maßnahmen die Emissionen reduziert. Hier können z. B. durch die Nutzung von elektrischen Zustellfahrzeugen und Zustellfahrrädern, eine Optimierung der Streckenwahl, Reduktion der Umschlagzeiten oder Bündelungen einzelner Sendungen die Nachhaltigkeit des Unternehmens gesteigert werden (vgl. z. B. Cosimato und Troisi, 2015; Deweerdt u. a., 2022). Ein Vergleich verschiedener Maßnahmen und eine anschließende Portfolioentscheidung können die Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen unterstützen, sinnvolle Maßnahmen für eine schnelle Reduktion der Emissionen umzusetzen.

Darüber hinaus gibt es weitere mehrkriterielle Portfolioentscheidungen, die mithilfe der entwickelten Methode gelöst werden können. So kann das Problem der Auswahl von förderfähigen Anträgen bei Fördermittelgebern entsprechend modelliert werden. Das Problem der statischen Auswahl des Projektportfolios für Forschung und Entwicklung stellt sich, wenn eine öffentliche Einrichtung ein Förderprogramm veröffentlicht. Anschließend muss ein Portfolio zusammengestellt werden, in dem die zu finanzierenden Projekte nach Oberzielen und Kriterien wie sozialen Zielen, Schwerpunktbereichen, geografischem Einfluss und anderen nicht-monetären Kriterien ausgewählt werden. Die Mittel werden in Abhängigkeit von den Zielen und Präferenzen der Einrichtung in verschiedene Ausgabenarten eingeteilt: Anschaffung von Ausrüstung, Reisekosten, Stipendien oder Publikationsgebühren. Das hier genannte Problem wurde mehrfach in der wissenschaftlichen Literatur untersucht, aber noch nicht als mehrkriterielle Portfolioentscheidung formuliert und gelöst (vgl. z. B. Arratia M. u. a., 2016; Litvinchev u. a., 2010; Liu u. a., 2019).

## 5.5 WEITERER FORSCHUNGSBEDARF UND AUSBLICK

Auf der Grundlage der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse kann weiterer Forschungsbedarf abgeleitet werden. Auf der methodischen Seite ergibt sich der Forschungsbedarf in einer weiteren Validierung der hier vorgestellten Methode für mehrkriterielle Portfolioentscheidungen mit PROMETHEE. Dies beinhaltet auch die Weiterentwicklung und Adaption der Methode auf andere Kontexte. Auf der praktischen Seite stellt sich die Frage, ob die Erzeugung der Portfolios auch die zeitliche Komponente zur Umsetzung berücksichtigen sollte und wie die Präferenzen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin schon während der Portfolioerzeugung berücksichtigt werden können. Darüber hinaus kann analysiert werden, wie sich Veränderungen in den Rahmenbedingungen auf die Portfolioentscheidung auswirken.

Im Allgemeinen sind für eine umfassende Validierung der Methode weitere Anwendungen nötig. Darüber könnten die in der Arbeit diskutierten positiven Eigenschaften der Methode in der Praxis weiter überprüft werden. Die Outranking-Methoden sind vom Rank

Reversal-Phänomen betroffen, d. h. die Rangfolge der Alternativen ist in bestimmten Fällen abhängig von den betrachteten Alternativen. Im Fall der Portfolioerzeugung sollte daher genauer analysiert werden, inwieweit das Rank Reversal bei der Bewertung der erzeugten Portfolios vorkommt. Eine umfassende Analyse der hier vorgestellten Methode kann z. B. über ein künstliches Entscheidungsproblem geschehen, bei der das präferierte Portfolio aus der Menge aller Portfolios bestimmt werden kann. Verschiedene Entscheidungsprobleme können über Monte-Carlo-Simulationen erzeugt und analysiert werden<sup>1</sup> (vgl. z. B. Vetschera und Almeida, 2012).

Weiterer Forschungsbedarf besteht bei der methodischen Berücksichtigung von unbestimmbareren Kriterien und den Präferenzen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin während der Portfolioerzeugung. Die hier vorgestellte Methode berücksichtigt die unbestimmbareren Kriterien nicht bei der Portfolioerzeugung, sondern erst anschließend bei der Auswahl des präferierten Portfolios. Inwiefern eine direkte Betrachtung der unbestimmbareren Kriterien bei der Portfolioerzeugung möglich ist, gilt es weiter zu untersuchen. Mögliche Ansätze sind die Approximation der Aggregationsmethode durch andere Funktionen oder das vorläufige Ignorieren dieser Kriterien. Diese Ansätze sollten sowohl analytisch untersucht als auch in der Praxis überprüft werden. Die Präferenzen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin fließen in die Bewertung der Maßnahmen und in die Bewertung der Portfolios ein. Sie werden nicht direkt bei der Portfolioerzeugung berücksichtigt. Möglichkeiten der Integration der Präferenzen in die Portfolioerstellung sind z. B. über ein mehrkriterielles Optimierungsmodell denkbar. Hier können die Präferenzen über eine entsprechende Gewichtung verschiedener Zielfunktionen des Optimierungsmodells zur Portfolioerzeugung abgebildet werden.

Wie oben bereits angedeutet, können neue Förderrichtlinien bzw. neue ökonomische Bewertungen, verbesserte Effizienz in der Produktion von Geräten oder neue Geräte die Kriterienausprägungen der Maßnahmen signifikant ändern. So konnte durch neue Förderprogramme für Landstromanlagen diese Maßnahme deutlich verbessert werden. Weiterer Forschungsbedarf besteht daher in einer möglichen Prognose der Kriterienausprägungen der Maßnahmen und deren Integration in die Portfolioerzeugung. Im Folgenden werden mögliche Ansätze für die Prognose von Umweltwirkungen der Maßnahmen durch prospektive Ökobilanzen kurz skizziert.

In sogenannten prospektiven Ökobilanzen werden Entwicklungen von Technologien berücksichtigt, um die zukünftige Umweltwirkung zu bestimmen. Diese bauen oft auf den *technological readiness level* auf und verwenden Szenarien, um zukünftige Entwicklungen zu modellieren (Hung u. a., 2020; Thonemann u. a., 2020). Für eine ganzheitliche Bewertung der zukünftigen Umweltwirkung von Technologien ist eine Quantifizierung der Unsicherheit bei der zukünftigen Produktion maßgeblich. Diese Unsicherheit kann im Anschluss durch unsichere Parameter bei der Portfolioerzeugung integriert werden. Mithilfe von Methoden der robusten Optimierung können diese Modelle anschließend gelöst werden (Ben-Tal u. a., 2004; Ben-Tal und Nemirovski, 1998).

<sup>1</sup> Durch eine Masterarbeit am Lehrstuhl für ABWL & Produktionsmanagement konnten hier bereits viele Vorteile der Methode validiert werden. Ein umfassender Vergleich, der den genauen Einfluss der unbestimmbareren und nicht-monotonen Kriterien analysiert, wurde noch nicht veröffentlicht.

Ein weiterer Aspekt, der bei einer Portfolioerstellung betrachtet werden kann, ist die Dauer der Umsetzung verschiedener Maßnahmen. Als Beispiel sei die Einführung von hybriden SC genannt, die mehrere Jahre in Anspruch nimmt. Parallel dazu können mehrere Maßnahmen mit kurzer Dauer umgesetzt werden. Die Portfolioerzeugung kann also um Aspekte der klassischen Projektplanung bzw. Reihenfolgeplanung erweitert werden. Mögliche Ansätze zur Lösung sind z. B. eine direkte Integration eines Zeithorizontes in die Portfolioerzeugung oder eine nachgelagerte Reihenfolgeplanung für das Portfolio. Dies kann den Entscheidungsträger oder die Entscheidungsträgerin unterstützen, die Maßnahmen über einen größeren Horizont zu planen. Erste Ansätze hierzu wurden zuletzt im klassischen Projektmanagement untersucht, z. B. von Kettunen und Lejeune (2022) und Song u. a. (2021).

Die webbasierte Implementierung der MADM-Methode PROMETHEE, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, soll der wissenschaftlichen Community als Experten-Tool zur Verfügung gestellt werden. Eine erste Version der Anwendung ist bereits online verfügbar<sup>2</sup>. Die Anwendung bietet neben den in Abschnitt 3.6 genannten Funktionen alle gängigen Analysen auf Basis von PROMETHEE und zusätzlich die Möglichkeit, Monte-Carlo-Simulationen auf den Kriteriengewichtungen und -ausprägungen durchzuführen. Die Anwendung wurde bereits mehrfach im Rahmen von Abschlussarbeiten und Lehrveranstaltungen des Lehrstuhls für ABWL und Produktionsmanagement der Universität Duisburg-Essen verwendet. Darüber hinaus wurden mithilfe der PROMETHEE-Cloud verschiedene Entscheidungsprobleme des Forschungsprojektes SALAM II<sup>3</sup> analysiert. Eine Erweiterung um weitere Darstellungen des betrachteten Entscheidungsproblems und die Möglichkeit, mehrere Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen zu berücksichtigen, ist geplant.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass bei mehreren Aspekten der mehrkriteriellen Portfolioentscheidungen Forschungsbedarf besteht. Insbesondere bei der Portfolioerzeugung können Aspekte wie die Präferenzen des Entscheidungsträgers oder der Entscheidungsträgerin, unsichere Kriterienausprägungen der Maßnahmen oder der Zeithorizont der Umsetzung der Maßnahmen betrachtet werden. Die vorgestellte Methode und der Prozess der mehrkriteriellen Portfolioentscheidungen kann sowohl von anderen Containerterminals, als auch allgemein von Unternehmen und Einrichtungen verwendet werden, die mehrkriterielle Portfolioentscheidungen treffen wollen. Weiterer Forschungsbedarf besteht insbesondere in einer weiteren Integration der Präferenzen während der Portfolioerzeugung durch mehrkriterielle Optimierungsmodelle und der Berücksichtigung von Unsicherheiten in den Kriterienausprägungen.

In dieser Arbeit wird zum ersten Mal eine Methode vorgeschlagen, die es ermöglicht, die oben beschriebenen mehrkriteriellen Portfolioentscheidungen für Nachhaltigkeitsmaßnahmen fundiert zu treffen. Die methodische Neuerung liegt unter anderem in der Berücksichtigung unbestimmbarer Kriterien. Die Methode wird an einer umfangreichen Fallstudie für Portfolioentscheidungen im CTT angewandt und validiert. In dieser Fallstudie werden zum ersten Mal Nachhaltigkeitsmaßnahmen in Containerterminals auf Basis einer mit dem Entscheidungsträger abgestimmten Menge an Kriterien miteinander verglichen und bewertet. Die Bewertung, der Vergleich der Maßnahmen und die anschließende Portfolioer-

<sup>2</sup> <https://promethee.pom.uni-due.de>

<sup>3</sup> <https://salam2.uni-goettingen.de/>, [https://www.uni-due.de/pom/forschung\\_salam.php](https://www.uni-due.de/pom/forschung_salam.php)

zeugung und -bewertung unterstützt den Entscheidungsträger bei der Auswahl sinnvoller Maßnahmen, die zum Teil im [CTT](#) bereits umgesetzt sind. Die hier entwickelte Methode kann darüber hinaus in anderen Kontexten bei der Bewertung von Maßnahmen zur Verbesserung der Nachhaltigkeit, aber auch generell bei Portfolioentscheidungen mit konfligierenden Kriterien, angewendet werden.

# ANHANG

## INVARIANZ VON PROMETHEE GEGENÜBER SKALIERUNGEN DER KRITERIENAUSPRÄGUNGEN

Die Methodenfamilie **PROMETHEE** ist invariant gegenüber Skalierungen der Kriterienausprägungen innerhalb eines Kriteriums, solange die Präferenzfunktionsparameter entsprechend skaliert werden. Hierbei kann für jedes Kriterium eine eigene Skalierung gewählt werden.

Diese Eigenschaft wurde nach Wissen des Autors bislang nicht eingehend untersucht oder publiziert. Vorteilhaft ist dies, wie hier in der Arbeit verwendet, zur Anonymisierung von Entscheidungsmodellen. Oft ist es von Entscheidungsträgern und Entscheidungsträgerinnen nicht gewünscht, Entscheidungsmodelle (in wissenschaftlichen Zeitschriften) zu veröffentlichen. Dies liegt vor allem an ökonomischen Kennzahlen eines Unternehmens, die in den Modellen verwendet werden. Durch eine Skalierung einzelner Kriterien, z. B. zu Prozentwerte, können die Daten so weit verändert werden, dass einer Veröffentlichung nichts mehr im Weg steht.

Im Folgenden soll gezeigt werden, dass **PROMETHEE** invariant gegenüber einer Skalierung der Kriterienausprägungen ist, solange man die Präferenzfunktionsparameter entsprechend mit skaliert. Das heißt, dass sowohl die Rangfolge der Alternativen, als auch alle Flüsse unverändert sind.

Sei hierfür  $A$  eine endliche Menge an Alternativen und eine endliche Menge an Kriterien  $G$ , sodass das Entscheidungsproblem als Entscheidungstabelle vorliegt:

$a$	$g_1(\cdot)$	$g_2(\cdot)$	...	$g_j(\cdot)$	...	$g_k(\cdot)$
$a_1$	$g_1(a_1)$	$g_2(a_1)$	...	$g_j(a_1)$	...	$g_k(a_1)$
$a_2$	$g_1(a_2)$	$g_2(a_2)$	...	$g_j(a_2)$	...	$g_k(a_2)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
$a_i$	$g_1(a_i)$	$g_2(a_i)$	...	$g_j(a_i)$	...	$g_k(a_i)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
$a_n$	$g_1(a_n)$	$g_2(a_n)$	...	$g_j(a_n)$	...	$g_k(a_n)$

Betrachte nun eine affin lineare Transformation eines Kriteriums  $j$  der Form

$$g_j(a) \mapsto \alpha g_j(a) + \beta,$$

mit zwei positiven Konstanten  $\alpha, \beta \in \mathbb{R}_+$ . Weiterhin sei  $P_j$  die Präferenzfunktion für Kriterium  $j$ . Die Präferenzfunktionsparameter werden nun auch um den Faktor  $\alpha$  skaliert. Im Folgenden wird gezeigt, dass der Präferenzindikator

$$p_j(a, b) = P_j(d_j(a, b)) = P_j(g_j(a) - g_j(b))$$

durch die Transformation unverändert bleibt. Der Präferenzindikator ist die Auswertung der Präferenzfunktion auf der Differenz der Kriterienausprägungen. Die Differenz  $d_j^*(a, b)$  zweier Alternativen  $a, b \in A$  unter den skalierten Ausprägungen ist

$$\begin{aligned} d_j^*(a, b) &= \alpha g_j(a) + \beta - \alpha g_j(b) - \beta \\ &= \alpha g_j(a) - \alpha g_j(b) \\ &= \alpha (g_j(a) - g_j(b)) \\ &= \alpha d_j(a, b). \end{aligned}$$

Es bleibt somit noch zu zeigen, dass diese skalierte Differenz durch die Präferenzfunktion auf den ursprünglichen Präferenzindikator abgebildet wird. Im Folgenden wird dies für das Kriterium mit linearer Präferenz und Indifferenz gezeigt. Sei hierfür

$$P_j^\alpha(d) = \begin{cases} 0 & d \leq \alpha q \\ \frac{d - \alpha q}{\alpha p - \alpha q} & \alpha q < d \leq \alpha p \\ 1 & d > \alpha p \end{cases}$$

die Präferenzfunktion mit skalierten Parametern. Es gilt

$$\begin{aligned} P_j^\alpha(\alpha d) &= \begin{cases} 0 & \alpha d \leq \alpha q \\ \frac{\alpha d - \alpha q}{\alpha p - \alpha q} & \alpha q < \alpha d \leq \alpha p \\ 1 & \alpha d > \alpha p \end{cases} \\ &= \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d - q}{p - q} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases} \\ &= P_j(d), \end{aligned}$$

da  $\alpha$  eine positive Konstante ist. Der Beweis für die anderen Präferenzfunktionen verläuft analog.

## LITERATUR

- Abdelmagid, A. M., Gheith, M. S. und Eltawil, A. B. (2022). „A comprehensive review of the truck appointment scheduling models and directions for future research“. In: *Transport Reviews* 42.1, S. 102–126. ISSN: 0144-1647. DOI: [10.1080/01441647.2021.1955034](https://doi.org/10.1080/01441647.2021.1955034).
- Abdullah, L., Chan, W. und Afshari, A. (2019). „Application of PROMETHEE method for green supplier selection: a comparative result based on preference functions“. In: *Journal of Industrial Engineering International* 15.2, S. 271–285. ISSN: 1735-5702. DOI: [10.1007/s40092-018-0289-z](https://doi.org/10.1007/s40092-018-0289-z).
- Acciario, M., Ghiara, H. und Cusano, M. I. (2014). „Energy management in seaports: A new role for port authorities“. In: *Energy Policy* 71, S. 4–12. ISSN: 03014215. DOI: [10.1016/j.enpol.2014.04.013](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.04.013).
- Acciario, M. und Wilmsmeier, G. (2015). „Energy efficiency in maritime logistics chains“. In: *Research in Transportation Business & Management* 17, S. 1–7. ISSN: 22105395. DOI: [10.1016/j.rtbm.2015.11.002](https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2015.11.002).
- Al Janabi, M. A. (2021). „Multivariate portfolio optimization under illiquid market prospects: a review of theoretical algorithms and practical techniques for liquidity risk management“. In: *Journal of Modelling in Management* 16.1, S. 288–309. ISSN: 1746-5664. DOI: [10.1108/JM2-07-2019-0178](https://doi.org/10.1108/JM2-07-2019-0178).
- Alamouh, A. S., Ballini, F. und Ölçer, A. I. (2020). „Ports' technical and operational measures to reduce greenhouse gas emission and improve energy efficiency: A review“. eng. In: *Marine pollution bulletin* 160, S. 111508. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2020.111508](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111508). eprint: [32798921](https://arxiv.org/abs/32798921).
- (2021). „Revisiting port sustainability as a foundation for the implementation of the United Nations Sustainable Development Goals (UN SDGs)“. In: *Journal of Shipping and Trade* 6.1. DOI: [10.1186/s41072-021-00101-6](https://doi.org/10.1186/s41072-021-00101-6).
- Almeida Filho, A. T. de, Clemente, T. R., Morais, D. C. und Almeida, A. T. de (2018). „Preference modeling experiments with surrogate weighting procedures for the PROMETHEE method“. In: *European Journal of Operational Research* 264.2, S. 453–461. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2017.08.006](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.08.006).
- Almeida, A. T. de, Almeida, J. A. de, Costa, A. P. C. S. und Almeida-Filho, A. T. de (2016). „A new method for elicitation of criteria weights in additive models: Flexible and interactive tradeoff“. In: *European Journal of Operational Research* 250.1, S. 179–191. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2015.08.058](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.058).
- Almeida, A. T. de und Vetschera, R. (2012). „A note on scale transformations in the PROMETHEE V method“. In: *European Journal of Operational Research* 219.1, S. 198–200. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2011.12.034](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.12.034).
- Almeida, A. T. de, Vetschera, R. und Almeida, J. A. de (2014). „Scaling Issues in Additive Multicriteria Portfolio Analysis“. In: *Decision Support Systems III - Impact of Decision Support Systems for Global Environments. Euro Working Group Workshops, EWG-DSS 2013*,

- Thessaloniki, Greece, May 29-31, 2013, and Rome, Italy, July 1-4, 2013, Revised Selected and Extended Papers*. Hrsg. von F. Dargam, J. E. Hernández, P. Zaraté, S. Liu, R. Ribeiro, B. Delibašić und J. Papathanasiou. Bd. 184. Lecture Notes in Business Information Processing 184. Cham und s.l.: Springer International Publishing, S. 131–140. ISBN: 978-3-319-11363-0. DOI: [10.1007/978-3-319-11364-7\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-11364-7_12).
- Alphaliner (2022). *Throughput growth at the world's 30 largest container ports*. URL: <https://www.facebook.com/525392314297570/photos/a.1060222800814516/2012125852290868/> (besucht am 13. 10. 2022).
- Alzahrani, A., Petri, I., Rezgui, Y. und Ghoroghi, A. (2020). „Developing Smart Energy Communities around Fishery Ports: Toward Zero-Carbon Fishery Ports“. In: *Energies* 13.11, S. 2779. DOI: [10.3390/en13112779](https://doi.org/10.3390/en13112779).
- Ananda, J. und Herath, G. (2009). „A critical review of multi-criteria decision making methods with special reference to forest management and planning“. In: *Ecological Economics* 68.10, S. 2535–2548. ISSN: 09218009. DOI: [10.1016/j.ecolecon.2009.05.010](https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.05.010).
- Angeloudis, P. und Bell, M. G. H. (2011). „A review of container terminal simulation models“. In: *Maritime Policy & Management* 38.5, S. 523–540. ISSN: 0308-8839. DOI: [10.1080/03088839.2011.597448](https://doi.org/10.1080/03088839.2011.597448).
- Archer, N. und Ghasemzadeh, F. (1999). „An integrated framework for project portfolio selection“. In: *International Journal of Project Management* 17.4, S. 207–216. ISSN: 02637863. DOI: [10.1016/S0263-7863\(98\)00032-5](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(98)00032-5).
- Arratia M., N. M., Lopez I., F., Schaeffer, S. E. und Cruz-Reyes, L. (2016). „Static R&D project portfolio selection in public organizations“. In: *Decision Support Systems* 84, S. 53–63. ISSN: 01679236. DOI: [10.1016/j.dss.2016.01.006](https://doi.org/10.1016/j.dss.2016.01.006).
- Ballini, F., Vakili, S., Schönborn, A., Olcer, A., Canepa, M. und Sciotto, D. (2022). „Optimal decision making for emissions reduction measures for Italian container terminals“. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment* 236.1, S. 283–300. ISSN: 1475-0902. DOI: [10.1177/14750902211027680](https://doi.org/10.1177/14750902211027680).
- Barbati, M., Figueira, J. R., Greco, S., Ishizaka, A. und Panaro, S. (2018). *A multiple criteria methodology for prioritizing and selecting portfolios of urban projects*. URL: <https://arxiv.org/pdf/1812.10410>.
- Barrero Fernandez, R., Noshin Omar, El Baghdadi, M., van den Bossche, P., Coosemans, T. C. und van Mierlo, J. (2013). *Energetic Evaluation of Straddle Carrier: from Diesel Electric to Full Electric Vehicles*. English. PSA Publishing.
- Barzilai, J. und Golany, B. (1994). „Ahp Rank Reversal, Normalization And Aggregation Rules“. In: *INFOR: Information Systems and Operational Research* 32.2, S. 57–64. ISSN: 0315-5986. DOI: [10.1080/03155986.1994.11732238](https://doi.org/10.1080/03155986.1994.11732238).
- Bebbington, J. und Unerman, J. (2018). „Achieving the United Nations Sustainable Development Goals“. In: *Accounting, Auditing & Accountability Journal* 31.1, S. 2–24. ISSN: 0951-3574. DOI: [10.1108/AAAJ-05-2017-2929](https://doi.org/10.1108/AAAJ-05-2017-2929).
- Behzadian, M., Kazemzadeh, R. B., Albadvi, A. und Aghdasi, M. (2010). „PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications“. In: *European Journal of Operational Research* 200.1, S. 198–215. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2009.01.021](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.021).



- Belton, V. und Gear, T. (1983). „On a short-coming of Saaty’s method of analytic hierarchies“. In: *Omega* 11.3, S. 228–230. ISSN: 03050483. DOI: [10.1016/0305-0483\(83\)90047-6](https://doi.org/10.1016/0305-0483(83)90047-6).
- Belton, V. und Stewart, T. J. (2002). *Multiple Criteria Decision Analysis. An Integrated Approach*. eng. Boston, MA und s.l.: Springer US. 372 S. ISBN: 9781461355823. DOI: [10.1007/978-1-4615-1495-4](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1495-4).
- Ben-Tal, A., Goryashko, A., Guslitzer, E. und Nemirovski, A. (2004). „Adjustable robust solutions of uncertain linear programs“. In: *Mathematical Programming* 99.2, S. 351–376. ISSN: 0025-5610. DOI: [10.1007/s10107-003-0454-y](https://doi.org/10.1007/s10107-003-0454-y).
- Ben-Tal, A. und Nemirovski, A. (1998). „Robust Convex Optimization“. In: *Mathematics of Operations Research* 23.4, S. 769–805. ISSN: 0364-765X. DOI: [10.1287/moor.23.4.769](https://doi.org/10.1287/moor.23.4.769). URL: <https://pubsonline.informs.org/doi/pdf/10.1287/moor.23.4.769> (besucht am 03.07.2020).
- Bertsch, V. (2008). *Uncertainty handling in multi-attribute decision support for industrial risk management*. en. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing. DOI: [10.5445/KSP/1000007378](https://doi.org/10.5445/KSP/1000007378).
- Bierwirth, C. und Meisel, F. (2010). „A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals“. In: *European Journal of Operational Research* 202.3, S. 615–627. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2009.05.031](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.05.031).
- (2015). „A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals“. In: *European Journal of Operational Research* 244.3, S. 675–689. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2014.12.030](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.12.030).
- Bishop, G. A., Schuchmann, B. G., Stedman, D. H. und Lawson, D. R. (2012). „Emission changes resulting from the San Pedro Bay, California Ports Truck Retirement Program“. eng. In: *Environmental science & technology* 46.1, S. 551–558. DOI: [10.1021/es202392g](https://doi.org/10.1021/es202392g).
- Bjerkkan, K. Y. und Seter, H. (2019). „Reviewing tools and technologies for sustainable ports: Does research enable decision making in ports?“ In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 72, S. 243–260. ISSN: 13619209. DOI: [10.1016/j.trd.2019.05.003](https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.05.003).
- Blondin, M. J., Fernandes Trovão, J. P., Chaoui, H. und Pardalos, P. M., Hrsg. (2022). *Intelligent Control and Smart Energy Management*. Springer Optimization and Its Applications. Cham: Springer International Publishing. ISBN: 978-3-030-84473-8. DOI: [10.1007/978-3-030-84474-5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-84474-5).
- Böse, J. W. (2011). *Handbook of terminal planning*. eng. Bd. v. 49. Operations research / computer science interfaces series. New York: Springer. 433 S. ISBN: 9781441984074.
- Bottero, M., Ferretti, V., Figueira, J. R., Greco, S. und Roy, B. (2015). „Dealing with a multiple criteria environmental problem with interaction effects between criteria through an extension of the Electre III method“. In: *European Journal of Operational Research* 245.3, S. 837–850. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2015.04.005](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.04.005).
- Bouyssou, D. (1990). „Building Criteria: A Prerequisite for MCDA“. In: *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*. Hrsg. von C. A. Bana e Costa. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 58–80. ISBN: 978-3-642-75937-6. DOI: [10.1007/978-3-642-75935-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-75935-2_4).
- Hrsg. (2002). *Aiding decisions with multiple criteria. Essays in honor of Bernard Roy*. eng. Unter Mitarb. von B. Roy. Bd. 44. International Series in Operations Research & Management Science. Boston: Kluwer Acad. Publ. 558 S. ISBN: 9780792376118.

- Boysen, N., Briskorn, D. und Meisel, F. (2017). „A generalized classification scheme for crane scheduling with interference“. In: *European Journal of Operational Research* 258.1, S. 343–357. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2016.08.041](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.08.041).
- Boysen, N. und Fliedner, M. (2010). „Determining crane areas in intermodal transshipment yards: The yard partition problem“. In: *European Journal of Operational Research* 204.2, S. 336–342. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2009.10.031](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.10.031).
- Boysen, N., Fliedner, M., Jaehn, F. und Pesch, E. (2013). „A Survey on Container Processing in Railway Yards“. In: *Transportation Science* 47.3, S. 312–329. ISSN: 0041-1655. DOI: [10.1287/trsc.1120.0415](https://doi.org/10.1287/trsc.1120.0415).
- Bozorg-Haddad, O., Loáiciga, H. und Zolghadr-Asli, B. (2021). *A Handbook on Multi-Attribute Decision-Making Methods*. Wiley. ISBN: 9781119563501. DOI: [10.1002/9781119563501](https://doi.org/10.1002/9781119563501).
- Brans, J.-P. und Mareschal, B. (1992). „Promethee V: Mcdm Problems With Segmentation Constraints“. In: *INFOR: Information Systems and Operational Research* 30.2, S. 85–96. ISSN: 0315-5986. DOI: [10.1080/03155986.1992.11732186](https://doi.org/10.1080/03155986.1992.11732186).
- (1994). „The PROMCALC & GAIA decision support system for multicriteria decision aid“. In: *Decision Support Systems* 12.4-5, S. 297–310. ISSN: 01679236. DOI: [10.1016/0167-9236\(94\)90048-5](https://doi.org/10.1016/0167-9236(94)90048-5).
- (2002). „PROMETHEE: Une méthodologie d’aide à la décision en présence de critères multiples“. In: *Collection "Statistique et Mathématiques Appliquées"*.
- Brans, J.-P. und Smet, Y. de (2016). „PROMETHEE Methods“. In: *Multiple criteria decision analysis. State of the art surveys*. Hrsg. von S. Greco, M. Ehrgott und J. R. Figueira. Second edition. Bd. 233. International Series in Operations Research & Management Science 233. New York u. a.: Springer, S. 187–219. ISBN: 978-1-4939-3093-7. DOI: [10.1007/978-1-4939-3094-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_6).
- Brans, J.-P. und Vincke, P. (1985). „Note—A Preference Ranking Organisation Method“. In: *Management Science* 31.6, S. 647–656. ISSN: 0025-1909. DOI: [10.1287/mnsc.31.6.647](https://doi.org/10.1287/mnsc.31.6.647).
- Brinkmann, B. (2011). „Operations Systems of Container Terminals: A Compendious Overview“. In: *Handbook of Terminal Planning*. Hrsg. von J. W. Böse. Bd. 49. Operations Research/Computer Science Interfaces Series. New York, NY: Springer New York, S. 25–39. ISBN: 978-1-4419-8407-4. DOI: [10.1007/978-1-4419-8408-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8408-1_2).
- Brundtland, G. H. (1987). *Unsere gemeinsame Zukunft. D. Brundtland-Bericht d. Weltkommision für Umwelt u. Entwicklung*. ger. Der Brundtland-Bericht an die Weltkommission für Umwelt und Entwicklung. Greven: Eggenkamp. 421 S. ISBN: 9783923166169.
- Budiyanto, M. A., Huzaiifi, M. H., Sirait, S. J. und Prayoga, P. H. N. (2021). „Evaluation of CO<sub>2</sub> emissions and energy use with different container terminal layouts“. In: *Scientific reports* 11.1, S. 5476. DOI: [10.1038/s41598-021-84958-4](https://doi.org/10.1038/s41598-021-84958-4).
- Buede, D. M. und Maxwell, D. T. (1995). „Rank disagreement: A comparison of multi-criteria methodologies“. In: *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 4.1, S. 1–21. ISSN: 10579214. DOI: [10.1002/mcda.4020040102](https://doi.org/10.1002/mcda.4020040102).
- Buhl, R., Schwientek, A. und Toeter, S. and Froese, J. (2014). *Green Efforts Deliverable 12.1: Recommendations Manual for Terminals*. Hamburg Jacobs University.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2021). „Lesefassung des Bundes-Klimaschutzgesetzes 2021 mit markierten Änderungen zur Fassung von 2019“.

- In: URL: [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/ksg\\_aendg\\_2021\\_3\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/ksg_aendg_2021_3_bf.pdf) (besucht am 27.09.2022).
- Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (8.06.2022). *Ziele für Nachhaltige Entwicklung - Agenda 2030 der UN*. URL: <https://17ziele.de/> (besucht am 08.06.2022).
- Bundestag (2016). *Gesetz zur Einführung von Ausschreibungen für Strom aus erneuerbaren Energien und zu weiteren Änderungen des Rechts der erneuerbaren Energien*. EEG 2017. URL: [http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger\\_BGBl&jumpTo=bgbl116s2258.pdf](http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&jumpTo=bgbl116s2258.pdf) (besucht am 09.11.2022).
- Çağlar, M. und Gürel, S. (2019). „Impact assessment based sectoral balancing in public R&D project portfolio selection“. In: *Socio-Economic Planning Sciences* 66, S. 68–81. ISSN: 00380121. DOI: [10.1016/j.seps.2018.07.001](https://doi.org/10.1016/j.seps.2018.07.001).
- Calabrese, A., Costa, R., Gastaldi, M., Levialdi Ghiron, N. und Villazon Montalvan, R. A. (2021). „Implications for Sustainable Development Goals: A framework to assess company disclosure in sustainability reporting“. In: *Journal of Cleaner Production* 319, S. 128624. DOI: [10.1016/j.jclepro.2021.128624](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128624).
- Carlo, H. J., Vis, I. F. A. und Roodbergen, K. J. (2015). „Seaside operations in container terminals: literature overview, trends, and research directions“. In: *Flexible Services and Manufacturing Journal* 27.2-3, S. 224–262. ISSN: 1936-6582. DOI: [10.1007/s10696-013-9178-3](https://doi.org/10.1007/s10696-013-9178-3).
- Carlo, H. J., Vis, I. F. und Roodbergen, K. J. (2014a). „Storage yard operations in container terminals: Literature overview, trends, and research directions“. In: *European Journal of Operational Research* 235.2, S. 412–430. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2013.10.054](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.10.054).
- (2014b). „Transport operations in container terminals: Literature overview, trends, research directions and classification scheme“. In: *European Journal of Operational Research* 236.1, S. 1–13. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2013.11.023](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.11.023).
- Cavalcante, C. und Almeida, A. T. de (2007). „A multi-criteria decision-aiding model using PROMETHEE III for preventive maintenance planning under uncertain conditions“. In: *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 13.4, S. 385–397. ISSN: 1355-2511. DOI: [10.1108/13552510710829470](https://doi.org/10.1108/13552510710829470).
- Chen, S. und Zeng, Q. (2021). „Carbon-efficient scheduling problem of electric rubber-tired gantry cranes in a container terminal“. In: *Engineering Optimization*, S. 1–19. ISSN: 0305-215X. DOI: [10.1080/0305215X.2021.1972293](https://doi.org/10.1080/0305215X.2021.1972293).
- Choo, E. U., Schoner, B. und Wedley, W. C. (1999). „Interpretation of criteria weights in multicriteria decision making“. In: *Computers & Industrial Engineering* 37.3, S. 527–541. ISSN: 0360-8352. DOI: [10.1016/S0360-8352\(00\)00019-X](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(00)00019-X).
- Cinelli, M., Coles, S. R. und Kirwan, K. (2014). „Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment“. In: *Ecological Indicators* 46, S. 138–148. ISSN: 1470160X. DOI: [10.1016/j.ecolind.2014.06.011](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.06.011).
- Cook, S. A. (o.D.). *P vs. NP problem*. *Millennium Problems*. Hrsg. von Clay Mathematics Institute. URL: <http://www.claymath.org/millennium-problems/p-vs-np-problem> (besucht am 23.11.2021).

- Corrente, S., Figueira, J. R. und Greco, S. (2014). „The SMAA-PROMETHEE method“. In: *European Journal of Operational Research* 239.2, S. 514–522. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2014.05.026](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.05.026).
- Cosimato, S. und Troisi, O. (2015). „Green supply chain management“. In: *The TQM Journal* 27.2, S. 256–276. ISSN: 1754-2731. DOI: [10.1108/TQM-01-2015-0007](https://doi.org/10.1108/TQM-01-2015-0007).
- Creutzig, F., Jochem, P., Edelenbosch, O. Y., Mattauch, L., van Vuuren, D. P., McCollum, D. und Minx, J. (2015). „Energy and environment. Transport: A roadblock to climate change mitigation?“ eng. In: *Science (New York, N.Y.)* 350.6263, S. 911–912. DOI: [10.1126/science.aac8033](https://doi.org/10.1126/science.aac8033).
- Crowe, K. A. und Parker, W. H. (2008). „Using portfolio theory to guide reforestation and restoration under climate change scenarios“. In: *Climatic Change* 89.3-4, S. 355–370. ISSN: 0165-0009. DOI: [10.1007/s10584-007-9373-x](https://doi.org/10.1007/s10584-007-9373-x).
- Dang, H.-A. H. und Serajuddin, U. (2020). „Tracking the sustainable development goals: Emerging measurement challenges and further reflections“. In: *World Development* 127, S. 104570. ISSN: 0305750X. DOI: [10.1016/j.worlddev.2019.05.024](https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.05.024).
- Dang, Q.-V., Singh, N., Adan, I., Martagan, T. und van de Sande, D. (2021). „Scheduling heterogeneous multi-load AGVs with battery constraints“. In: *Computers & Operations Research* 136, S. 105517. ISSN: 03050548. DOI: [10.1016/j.cor.2021.105517](https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105517).
- Dawes, R. M. und Corrigan, B. (1974). „Linear models in decision making“. In: *Psychological Bulletin* 81.2, S. 95–106. ISSN: 0033-2909. DOI: [10.1037/h0037613](https://doi.org/10.1037/h0037613).
- DeSanctis, G. (1984). „Computer Graphics as Decision Aids: Directions For Research“. In: *Decision Sciences* 15.4, S. 463–487. ISSN: 0011-7315. DOI: [10.1111/j.1540-5915.1984.tb01236.x](https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1984.tb01236.x).
- Delgado, M. G. und Sendra, J. B. (2004). „Sensitivity Analysis in Multicriteria Spatial Decision-Making: A Review“. In: *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal* 10.6, S. 1173–1187. ISSN: 1080-7039. DOI: [10.1080/10807030490887221](https://doi.org/10.1080/10807030490887221).
- Deweerd, T., Dargusch, P. und Hill, G. (2022). „A Case Study of How DHL Practices Carbon Management“. In: *Advances in Environmental and Engineering Research* 3.1, S. 1. ISSN: 27666190. DOI: [10.21926/aeer.2201010](https://doi.org/10.21926/aeer.2201010).
- Dias, L. C., Freire, F. und Geldermann, J. (2019). *Perspectives on Multi-criteria Decision Analysis and Life-Cycle Assessment*. Springer International Publishing. DOI: [10.1007/978-3-030-11482-4\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-11482-4_12).
- Dickson, G. W., DeSanctis, G. und McBride, D. J. (1986). „Understanding the effectiveness of computer graphics for decision support: a cumulative experimental approach“. In: *Communications of the ACM* 29.1, S. 40–47. ISSN: 0001-0782. DOI: [10.1145/5465.5469](https://doi.org/10.1145/5465.5469).
- Dietz, F. J. und van der Straaten, J. (1992). „Rethinking Environmental Economics: Missing Links between Economic Theory and Environmental Policy“. In: *Journal of Economic Issues* 26.1, S. 27–51. ISSN: 0021-3624. DOI: [10.1080/00213624.1992.11505261](https://doi.org/10.1080/00213624.1992.11505261).
- Ding, Y., Chen, K., Wei, X. und Yang, Y. (2022). „A novel cost-management system for container terminals using a time-driven Activity-Based Costing approach“. In: *Ocean & Coastal Management* 217, S. 106011. ISSN: 09645691. DOI: [10.1016/j.ocecoaman.2021.106011](https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.106011).

- Dixit, V. und Tiwari, M. K. (2020). „Project portfolio selection and scheduling optimization based on risk measure: a conditional value at risk approach“. In: *Annals of Operations Research* 285.1-2, S. 9–33. ISSN: 0254-5330. DOI: [10.1007/s10479-019-03214-1](https://doi.org/10.1007/s10479-019-03214-1).
- Doan, N. und Smet, Y. de (2018). „An alternative weight sensitivity analysis for PROMETHEE II rankings“. In: *Omega* 80, S. 166–174. ISSN: 03050483. DOI: [10.1016/j.omega.2017.08.017](https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.08.017).
- Dyer, J. S. (2016). „Multiattribute Utility Theory (MAUT)“. In: *Multiple Criteria Decision Analysis*. Hrsg. von S. Greco, M. Ehrgott und J. R. Figueira. Bd. 233. International Series in Operations Research & Management Science. New York, NY: Springer New York, S. 285–314. ISBN: 978-1-4939-3093-7. DOI: [10.1007/978-1-4939-3094-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_8).
- Eisenberg, R., Koch, T., Petersen, M. und Wagner, F. (2020). „Raising Efficiency of Straddle Carrier Operations by Twin Container Handling“. In: *Handbook of Terminal Planning*. Hrsg. von J. W. Böse. Operations Research/Computer Science Interfaces Series. Cham: Springer International Publishing, S. 319–340. ISBN: 978-3-030-39989-4. DOI: [10.1007/978-3-030-39990-0\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39990-0_15).
- Elkington, J. und John, E. (1999). *Cannibals with forks. The triple bottom line of 21st century business*. Pbk. ed. Bd. 25. Oxford, U.K. und Oxford, United Kingdom: Capstone. 410 S. ISBN: 1-900961-27-X.
- Elton, E. J. und Gruber, M. J. (1997). „Modern portfolio theory, 1950 to date“. In: *Journal of Banking & Finance* 21.11-12, S. 1743–1759. ISSN: 03784266. DOI: [10.1016/S0378-4266\(97\)00048-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4266(97)00048-4).
- Ericsson, P. (2008). „Shore-side power supply-a feasibility study and a technical solution for an on-shore electrical infrastructure to supply vessels with electrical power while in port“. URL: <https://odr.chalmers.se/bitstream/20.500.12380/174062/1/174062.pdf> (besucht am 31. 01. 2022).
- Europäische Kommission (2019). *Was ist der europäische Grüne Deal?* URL: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/fs\\_19\\_6714](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/fs_19_6714).
- Ewing, P. L., Tarantino, W. und Parnell, G. S. (2006). „Use of Decision Analysis in the Army Base Realignment and Closure (BRAC) 2005 Military Value Analysis“. In: *Decision Analysis* 3.1, S. 33–49. ISSN: 1545-8490. DOI: [10.1287/deca.1060.0062](https://doi.org/10.1287/deca.1060.0062).
- FEPOR (2016). *Sustainable Terminals (How private port operators and terminals invest in sustainability)*. Hrsg. von FEPOR. URL: <https://www.fepor.eu/media-corner/news/news/19-fepor-news-2016/256-new-fepor-publication-sustainable-terminals-how-private-port-operators-and-terminals-invest-in-sustainability>.
- Figueira, J. R., Greco, S., Roy, B. und Słowiński, R. (2013). „An Overview of ELECTRE Methods and their Recent Extensions“. In: *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 20.1-2, S. 61–85. ISSN: 10579214. DOI: [10.1002/mcda.1482](https://doi.org/10.1002/mcda.1482).
- Figueira, J. R. und Roy, B. (2002). „Determining the weights of criteria in the ELECTRE type methods with a revised Simos' procedure“. In: *European Journal of Operational Research* 139.2, S. 317–326. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/S0377-2217\(01\)00370-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00370-8).
- Fishburn, P. C. (1967). „Letter to the Editor—Additive Utilities with Incomplete Product Sets: Application to Priorities and Assignments“. In: *Operations Research* 15.3, S. 537–542. ISSN: 0030-364X. DOI: [10.1287/opre.15.3.537](https://doi.org/10.1287/opre.15.3.537).

- Fliedner, T. und Liesiö, J. (2016). „Adjustable robustness for multi-attribute project portfolio selection“. In: *European Journal of Operational Research* 252.3, S. 931–946. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2016.01.058](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.01.058).
- Fontana, M. E. und Morais, D. C. (2013). „Using Promethee V to Select Alternatives so as to Rehabilitate Water Supply Network with Detected Leaks“. In: *Water Resources Management* 27.11, S. 4021–4037. ISSN: 0920-4741. DOI: [10.1007/s11269-013-0393-1](https://doi.org/10.1007/s11269-013-0393-1).
- Fortnow, L. (2009). „The status of the P versus NP problem“. In: *Communications of the ACM* 52.9, S. 78–86. ISSN: 0001-0782. DOI: [10.1145/1562164.1562186](https://doi.org/10.1145/1562164.1562186).
- French, S. (1995). „Uncertainty and Imprecision: Modelling and Analysis“. In: *Journal of the Operational Research Society* 46.1, S. 70–79. ISSN: 0160-5682. DOI: [10.1057/jors.1995.8](https://doi.org/10.1057/jors.1995.8).
- Frischknecht, R. (2020). *Lehrbuch der Ökobilanzierung*. ger. 1. Aufl. 2020. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 258 S. ISBN: 978-3-662-54762-5. URL: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1574280>.
- Froese, J., Töter, S. und Erdogan, I. (2014). *Green Efforts - Recommendations Manual for Terminals, Deliverable 12.1*.
- García-Cascales, M. S. und Lamata, M. T. (2012). „On rank reversal and TOPSIS method“. In: *Mathematical and Computer Modelling* 56.5-6, S. 123–132. ISSN: 08957177. DOI: [10.1016/j.mcm.2011.12.022](https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.12.022).
- Geerlings, H. und van Duin, R. (2011). „A new method for assessing CO<sub>2</sub>-emissions from container terminals: a promising approach applied in Rotterdam“. In: *Journal of Cleaner Production* 19.6-7, S. 657–666. DOI: [10.1016/j.jclepro.2010.10.012](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.10.012).
- Geldermann, J. (1999). *Entwicklung eines multikriteriellen Entscheidungsunterstützungssystems zur integrierten Technikbewertung*. Dissertation. Bd. 105. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft. Düsseldorf: VDI-Verlag. 223 S. ISBN: 978-3-18-310516-8.
- Geldermann, J. und Lerche, N. (2014). *Leitfaden zur Anwendung von Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung*. Hrsg. von Lehrstuhl für Produktion und Logistik, Universität Göttingen. URL: <https://www.uni-goettingen.de/de/document/download/285813337d59201d34806cfc48dae518-en.pdf/MCDA-Leitfaden-PROMETHEE.pdf> (besucht am 04. 11. 2022).
- Geldermann, J., Zhang, K. und Rentz, O. (2003). „Sensitivitätsanalysen für das Outranking-Verfahren PROMETHEE“. In: *Multi-Criteria- und Fuzzy-Systeme in Theorie und Praxis*. Hrsg. von W. Habenicht, B. Scheubrein und R. Scheubrein. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, S. 127–151. ISBN: 978-3-8244-7864-4. DOI: [10.1007/978-3-322-81539-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-322-81539-2_7).
- Gervásio, H. und Simões da Silva, L. (2012). „A probabilistic decision-making approach for the sustainable assessment of infrastructures“. In: *Expert Systems with Applications* 39.8, S. 7121–7131. ISSN: 09574174. DOI: [10.1016/j.eswa.2012.01.032](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.01.032).
- Gharehgozli, A. H., Roy, D. und Koster, R. de (2016). „Sea container terminals: New technologies and OR models“. In: *Maritime Economics & Logistics* 18.2, S. 103–140. ISSN: 1479-2931. DOI: [10.1057/mel.2015.3](https://doi.org/10.1057/mel.2015.3).
- Gharehgozli, A., Zaerpour, N. und Koster, R. de (2020). „Container terminal layout design: transition and future“. In: *Maritime Economics & Logistics* 22.4, S. 610–639. ISSN: 1479-2931. DOI: [10.1057/s41278-019-00131-9](https://doi.org/10.1057/s41278-019-00131-9).

- Ghasemzadeh, F. und Archer, N. P. (2000). „Project portfolio selection through decision support“. In: *Decision Support Systems* 29.1, S. 73–88. ISSN: 01679236. DOI: [10.1016/S0167-9236\(00\)00065-8](https://doi.org/10.1016/S0167-9236(00)00065-8).
- Giuliano, G. und O'Brien, T. (2007). „Reducing port-related truck emissions: The terminal gate appointment system at the Ports of Los Angeles and Long Beach“. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 12.7, S. 460–473. ISSN: 13619209. DOI: [10.1016/j.trd.2007.06.004](https://doi.org/10.1016/j.trd.2007.06.004).
- Golabi, K., Kirkwood, C. W. und Sicherman, A. (1981). „Selecting a Portfolio of Solar Energy Projects Using Multiattribute Preference Theory“. In: *Management Science* 27.2, S. 174–189. ISSN: 0025-1909. DOI: [10.1287/mnsc.27.2.174](https://doi.org/10.1287/mnsc.27.2.174).
- Gómez-Bezares, F., Przychodzen, W. und Przychodzen, J. (2017). „Bridging the gap: How sustainable development can help companies create shareholder value and improve financial performance“. In: *Business Ethics: A European Review* 26.1, S. 1–17. ISSN: 09628770. DOI: [10.1111/beer.12135](https://doi.org/10.1111/beer.12135).
- Götze, U. und Bloech, J. (2002). *Investitionsrechnung. Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*. ger. Dritte, verbesserte und erweiterte Auflage. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg und s.l.: Springer Berlin Heidelberg. 564 S. ISBN: 978-3-662-08019-1. DOI: [10.1007/978-3-662-08019-1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-08019-1).
- Greco, S., Ehrgott, M. und Figueira, J. R., Hrsg. (2016). *Multiple Criteria Decision Analysis*. International Series in Operations Research & Management Science. New York, NY: Springer New York. ISBN: 978-1-4939-3093-7. DOI: [10.1007/978-1-4939-3094-4](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4).
- Greco, S., Kadziński, M., Mousseau, V. und Słowiński, R. (2011). „ELECTREGKMS: Robust ordinal regression for outranking methods“. In: *European Journal of Operational Research* 214.1, S. 118–135. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2011.03.045](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.03.045).
- Greco, S., Mousseau, V. und Słowiński, R. (2008). „Ordinal regression revisited: Multiple criteria ranking using a set of additive value functions“. In: *European Journal of Operational Research* 191.2, S. 416–436. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2007.08.013](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.08.013).
- Gregory, R. (2012). *Structured decision making. A practical guide to environmental management choices*. Chichester, West Sussex und Hoboken, N.J.: Wiley-Blackwell. ISBN: 978-1-444-33341-1.
- Grube, C. (11.05.2022). *U-Boot-Bunker in Hamburg*. URL: <https://www.geschichtsspuren.de/artikel/marine-seefahrt/168-u-boot-bunker-hamburg.html> (besucht am 11.05.2022).
- Guitouni, A. und Martel, J.-M. (1998). „Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method“. In: *European Journal of Operational Research* 109.2, S. 501–521. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/S0377-2217\(98\)00073-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00073-3).
- Günther, H.-O. und Kim, K.-H. (2006). „Container terminals and terminal operations“. In: *OR Spectrum* 28.4, S. 437–445. DOI: [10.1007/s00291-006-0059-y](https://doi.org/10.1007/s00291-006-0059-y).
- Guo, W., Ji, M. und Zhu, H. (2021). „Multi-Period Coordinated Optimization on Berth Allocation and Yard Assignment in Container Terminals Based on Truck Route“. In: *IEEE Access* 9, S. 83124–83136. DOI: [10.1109/ACCESS.2021.3086185](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3086185).
- Gurgur, C. Z. und Morley, C. T. (2008). „Lockheed Martin Space Systems Company Optimizes Infrastructure Project-Portfolio Selection“. In: *Interfaces* 38.4, S. 251–262. ISSN: 0092-2102. DOI: [10.1287/inte.1080.0378](https://doi.org/10.1287/inte.1080.0378).

- Gutierrez-Romero, J. E., Esteve-Pérez, J. und Zamora, B. (2019). „Implementing Onshore Power Supply from renewable energy sources for requirements of ships at berth“. In: *Applied Energy* 255, S. 113883. ISSN: 03062619. DOI: [10.1016/j.apenergy.2019.113883](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113883).
- Hafen Hamburg (2008). *Neuer Bahnhof am Tollerort eröffnet*. URL: <https://web.archive.org/web/20140714163717/http://www.hafen-hamburg.de/content/neuer-bahnhof-am-tollerort-er%C3%B6ffnet> (besucht am 11.05.2022).
- (2022). *Top 20 Containerhäfen*. URL: <https://www.hafen-hamburg.de/de/statistiken/top-20-containerhaefen/> (besucht am 06.11.2022).
- Haidar, A. D. (2016). *Construction Program Management – Decision Making and Optimization Techniques*. Cham: Springer International Publishing. ISBN: 978-3-319-20773-5. DOI: [10.1007/978-3-319-20774-2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-20774-2).
- Hajkowicz, S. und Higgins, A. (2008). „A comparison of multiple criteria analysis techniques for water resource management“. In: *European Journal of Operational Research* 184.1, S. 255–265. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2006.10.045](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.10.045).
- Hall, W. J. (2010). „Assessment of CO<sub>2</sub> and priority pollutant reduction by installation of shoreside power“. In: *Resources, Conservation and Recycling* 54.7, S. 462–467. DOI: [10.1016/j.resconrec.2009.10.002](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.10.002).
- Hamburg Hafen Logistik AG (11.05.2022a). *Chronik - HHLA*. URL: <https://hlla.de/unternehmen/geschichte/chronik> (besucht am 11.05.2022).
- (11.05.2022b). *Strategie - HHLA*. URL: <https://hlla.de/unternehmen/verantwortung/strategie> (besucht am 11.05.2022).
- (2018). *Eco-friendly power for container ships*. URL: <https://www.hafen-hamburg.de/en/press/news/eco-friendly-power-for-container-ships-35967/> (besucht am 30.01.2022).
- (2021). „Nachhaltigkeitsbericht 2020“. In: URL: [https://hlla.de/fileadmin/download/nachhaltigkeit/HHLA\\_GB20\\_Nachhaltigkeitsbericht.pdf](https://hlla.de/fileadmin/download/nachhaltigkeit/HHLA_GB20_Nachhaltigkeitsbericht.pdf) (besucht am 21.09.2022).
- (2022). *Technische Daten Container Terminal Tollerort (CTT)*. URL: <https://hlla.de/unternehmen/tochterunternehmen/container-terminal-tollerort-ctt/technische-daten> (besucht am 01.09.2022).
- Hansen, P. und Ombler, F. (2008). „A new method for scoring additive multi-attribute value models using pairwise rankings of alternatives“. In: *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 15.3-4, S. 87–107. ISSN: 10579214. DOI: [10.1002/mcda.428](https://doi.org/10.1002/mcda.428).
- Hapag-Lloyd (2021). *Annual Report 2020*. Hrsg. von Hapag-Lloyd Corporate Communications. URL: [https://hlag-2020.corporate-report.net/pdf/hlag\\_ar\\_20\\_e.pdf](https://hlag-2020.corporate-report.net/pdf/hlag_ar_20_e.pdf) (besucht am 03.11.2021).
- Hax, H. (1964). „Investitions-und Finanzplanung mit Hilfe der linearen Programmierung“. In: *Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung* 16.S 430.
- Hayez, Q., Smet, Y. de und Bonney, J. (2012). „D-Sight“. In: *International Journal of Decision Support System Technology* 4.4, S. 1–23. ISSN: 1941-6296. DOI: [10.4018/jdsst.2012100101](https://doi.org/10.4018/jdsst.2012100101).
- He, J., Huang, Y., Yan, W. und Wang, S. (2015). „Integrated internal truck, yard crane and quay crane scheduling in a container terminal considering energy consumption“. In: *Expert Systems with Applications* 42.5, S. 2464–2487. ISSN: 09574174. DOI: [10.1016/j.eswa.2014.11.016](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.016).



- Heidenberger, K. und Stummer, C. (1999). „Research and development project selection and resource allocation: a review of quantitative modelling approaches“. In: *International Journal of Management Reviews* 1.2, S. 197–224. ISSN: 1460-8545. DOI: [10.1111/1468-2370.00012](https://doi.org/10.1111/1468-2370.00012).
- Hendriks, M. P. M., Lefeber, E. und Udding, J. T. (2013). „Simultaneous berth allocation and yard planning at tactical level“. In: *Operations-Research-Spektrum* 35.2, S. 441–456. ISSN: 0171-6468. DOI: [10.1007/s00291-012-0305-4](https://doi.org/10.1007/s00291-012-0305-4).
- Higgins, A. J., Hajkowicz, S. und Bui, E. (2008). „A multi-objective model for environmental investment decision making“. In: *Computers & Operations Research* 35.1, S. 253–266. ISSN: 03050548. DOI: [10.1016/j.cor.2006.02.027](https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.02.027).
- Hippinen, I. und Federley, J. (2014). *Fact-finding study on opportunities to enhance the energy efficiency and environmental impacts of ports in the Baltic Sea Region*. Hrsg. von Motiva Services Ltd. URL: [http://basrec.net/wp-content/uploads/2014/12/Energy\\_efficiency\\_of\\_ports.pdf](http://basrec.net/wp-content/uploads/2014/12/Energy_efficiency_of_ports.pdf) (besucht am 01.02.2022).
- Hokkanen, J., Lahdelma, R., Miettinen, K. und Salminen, P. (1998). „Determining the implementation order of a general plan by using a multicriteria method“. In: *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 7.5, S. 273–284. ISSN: 10579214. DOI: [10.1002/\(SICI\)1099-1360\(199809\)7:5%3C273::AID-MCDA198%3E3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1360(199809)7:5%3C273::AID-MCDA198%3E3.0.CO;2-1).
- Hung, C. R., Ellingsen, L. A.-W. und Majeau-Bettez, G. (2020). „LiSET: A Framework for Early-Stage Life Cycle Screening of Emerging Technologies“. In: *Journal of Industrial Ecology* 24.1, S. 26–37. ISSN: 1088-1980. DOI: [10.1111/jiec.12807](https://doi.org/10.1111/jiec.12807).
- Hyde, K., Maier, H. R. und Colby, C. (2003). „Incorporating uncertainty in the PROMETHEE MCDA method“. In: *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 12.4-5, S. 245–259. ISSN: 10579214. DOI: [10.1002/mcda.361](https://doi.org/10.1002/mcda.361).
- IPCC (2021). „Summary for Policymakers“. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]*, S. 3–32. DOI: [10.1017/9781009157896.001](https://doi.org/10.1017/9781009157896.001). URL: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf) (besucht am 27.09.2022).
- Ike, M., Donovan, J. D., Topple, C. und Masli, E. K. (2019). „The process of selecting and prioritising corporate sustainability issues: Insights for achieving the Sustainable Development Goals“. In: *Journal of Cleaner Production* 236, S. 117661. DOI: [10.1016/j.jclepro.2019.117661](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117661).
- Ilati, G., Sheikholeslami, A. und Hassannayebi, E. (2014). „A Simulation-Based Optimization Approach for Integrated Port Resource Allocation Problem“. In: *PROMET - Traffic&Transportation* 26.3, S. 243–255. ISSN: 0353-5320. DOI: [10.7307/ptt.v26i3.1337](https://doi.org/10.7307/ptt.v26i3.1337).
- Insua, D. R. und French, S. (1991). „A framework for sensitivity analysis in discrete multi-objective decision-making“. In: *European Journal of Operational Research* 54.2, S. 176–190. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/0377-2217\(91\)90296-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(91)90296-8).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental*

- Panel on Climate Change*. Hrsg. von C. Cambridge University Press. United Kingdom und New York, NY, USA.
- International Maritime Organization (2018a). „Port Emissions Toolkit. Guide No.1: Assessment of port emissions“. In: URL: <https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/01/PORT-EMISSIONS-TOOLKIT-GUIDE-NO.1-ASSESSMENT-OF-PORT-EMISSIONS.pdf> (besucht am 21.06.2022).
- (2018b). „Port Emissions Toolkit. Guide No.2: Development of port emissions reduction strategies“. In: URL: <https://glomeep.imo.org/wp-content/uploads/2019/03/port-emissions-toolkit-g2-online-New.pdf> (besucht am 21.06.2022).
- (2018c). „Ship Emissions Toolkit. Guide No.3: Development of a national ship emissions reduction strategy“. In: URL: <https://glomeep.imo.org/wp-content/uploads/2019/03/ship-emissions-toolkit-g3-online-New.pdf> (besucht am 21.06.2022).
- International Organization for Standardization, Hrsg. (o. D.[a]). *ISO 1496*.
- Hrsg. (o. D.[b]). *ISO 668*.
- Inuiguchi, M., Kato, K. und Katagiri, H. (2016). „Fuzzy Multi-Criteria Optimization: Possibilistic and Fuzzy/Stochastic Approaches“. In: *Multiple criteria decision analysis. State of the art surveys*. Hrsg. von S. Greco, M. Ehrgott und J. R. Figueira. Second edition. Bd. 233. International Series in Operations Research & Management Science 233. New York u. a.: Springer, S. 851–902. ISBN: 978-1-4939-3093-7. DOI: [10.1007/978-1-4939-3094-4\\_20](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_20).
- Iris, Ç. und Lam, J. S. L. (2019). „A review of energy efficiency in ports: Operational strategies, technologies and energy management systems“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 112, S. 170–182. ISSN: 13640321. DOI: [10.1016/j.rser.2019.04.069](https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.069).
- Jacob, H. (1964). *Neuere Entwicklungen in der Investitionsrechnung*. ger. Wiesbaden und s.l.: Gabler Verlag. 72 S. ISBN: 9783663131724. DOI: [10.1007/978-3-663-13172-4](https://doi.org/10.1007/978-3-663-13172-4).
- Jacquet-Lagrece, E. und Siskos, J. (1982). „Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making, the UTA method“. In: *European Journal of Operational Research* 10.2, S. 151–164. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/0377-2217\(82\)90155-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(82)90155-2).
- Jafarzadeh, M., Tareghian, H. R., Rahbarnia, F. und Ghanbari, R. (2015). „Optimal selection of project portfolios using reinvestment strategy within a flexible time horizon“. In: *European Journal of Operational Research* 243.2, S. 658–664. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2014.12.013](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.12.013).
- Jia, J., Fischer, G. W. und Dyer, J. S. (1998). „Attribute weighting methods and decision quality in the presence of response error: a simulation study“. In: *Journal of Behavioral Decision Making* 11.2, S. 85–105. ISSN: 0894-3257. DOI: [10.1002/\(SICI\)1099-0771\(199806\)11:2<85::AID-BDM282>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0771(199806)11:2<85::AID-BDM282>3.0.CO;2-K).
- Jolliffe, I. T. (2002). *Principal Component Analysis*. New York: Springer-Verlag. ISBN: 0-387-95442-2. DOI: [10.1007/b98835](https://doi.org/10.1007/b98835).
- Jonathan, Y. C. E. und Kader, S. B. A. (2018). „Prospect of Emission Reduction Standard for Sustainable Port Equipment Electrification“. In: *International Journal of Engineering* 31.8. ISSN: 1728144X. DOI: [10.5829/ije.2018.31.08b.25](https://doi.org/10.5829/ije.2018.31.08b.25).
- KPMG (2018). „How to report on the SDGs: What good looks like and why it matters“. In: URL: <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/xx/pdf/2018/02/how-to-report-on-sdgs.pdf> (besucht am 07.06.2022).

- Kadziński, M., Greco, S. und Słowiński, R. (2012a). „Extreme ranking analysis in robust ordinal regression“. In: *Omega* 40.4, S. 488–501. ISSN: 03050483. DOI: [10.1016/j.omega.2011.09.003](https://doi.org/10.1016/j.omega.2011.09.003).
- (2012b). „Selection of a representative value function in robust multiple criteria ranking and choice“. In: *European Journal of Operational Research* 217.3, S. 541–553. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2011.09.032](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.09.032).
- Kahneman, D. (2012). *Schnelles Denken, langsames Denken*. ger. 1. Auflage. München: Penguin Verlag. 621 S. ISBN: 3328100342.
- Kahneman, D. und Tversky, A. (2013). „Prospect Theory: An Analysis of Decision Under Risk“. In: *Handbook of the Fundamentals of Financial Decision Making*. Hrsg. von L. C. MacLean und W. T. Ziemba. Bd. 4. World Scientific Handbook in Financial Economics Series. WORLD SCIENTIFIC, S. 99–127. ISBN: 978-981-4417-34-1. DOI: [10.1142/9789814417358\\_0006](https://doi.org/10.1142/9789814417358_0006).
- Kalmar (2017). „Kalmar Straddle Carrier Data sheet“. In: URL: <https://www.kalmarglobal.com/4ad2ab/globalassets/equipment/straddle-carriers/straddle-carrier-datasheet-2.pdf> (besucht am 31.01.2022).
- (2018). „Considerations-of-electric-powered-horizontal-transportation-at-container-terminals“. In: URL: <https://wpassets.porttechnology.org/wp-content/uploads/2020/08/25155533/Considerations-of-electric-powered-horizontal-transportation-at-container-terminals.pdf> (besucht am 31.01.2022).
- Kandakoglu, M., Walther, G. und Ben Amor, S. (2020). *The use of multi-criteria decision-making methods in project portfolio selection: a literature review and future research directions*. URL: [http://www.optimization-online.org/db\\_file/2020/06/7836.pdf](http://www.optimization-online.org/db_file/2020/06/7836.pdf).
- Karakas, S., Kirmizi, M. und Kocaoglu, B. (2021). „Yard block assignment, internal truck operations, and berth allocation in container terminals: introducing carbon-footprint minimisation objectives“. In: *Maritime Economics & Logistics* 23.4, S. 750–771. ISSN: 1479-2931. DOI: [10.1057/s41278-021-00186-7](https://doi.org/10.1057/s41278-021-00186-7).
- Karp, R. M. (1972). „Reducibility among Combinatorial Problems“. In: *Complexity of Computer Computations*. Hrsg. von R. E. Miller, J. W. Thatcher und J. D. Bohlinger. Boston, MA: Springer US, S. 85–103. ISBN: 978-1-4684-2003-6. DOI: [10.1007/978-1-4684-2001-2\\_9](https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2001-2_9).
- Kavakeb, S., Nguyen, T. T., McGinley, K., Yang, Z., Jenkinson, I. und Murray, R. (2015). „Green vehicle technology to enhance the performance of a European port: A simulation model with a cost-benefit approach“. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 60, S. 169–188. ISSN: 0968090X. DOI: [10.1016/j.trc.2015.08.012](https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.08.012).
- Keeney, R. L. und Raiffa, H., Hrsg. (1976). *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*. In Proceedings of the ICML-06 Workshop on Kernel Methods in Reinforcement Learning. Citeseer.
- Keeney, R. L., Raiffa, H. und Rajala, D. W. (1979). „Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs“. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 9.7, S. 403. ISSN: 0018-9472. DOI: [10.1109/TSMC.1979.4310245](https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310245).
- Keeney, R. L. (1992). *Value-focused thinking. A path to creative decisionmaking*. Cambridge, Mass: Harvard University Press. ISBN: 9780674931985. URL: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=282778>.

- Keeney, R. L. und Raiffa, H. (1993). *Decisions with multiple objectives. Preferences and value tradeoffs*. eng. Unter Mitarb. von R. F. Meyer. Transferred to digital print. Cambridge, New York und Melbourne: Cambridge University Press. 569 S. ISBN: 0521438837.
- Kellerer, H., Pferschy, U. und Pisinger, D. (2004). *Knapsack problems*. Berlin und Heidelberg: Springer. 546 S. ISBN: 3540402861.
- Kemme, N. (2012). „Effects of storage block layout and automated yard crane systems on the performance of seaport container terminals“. In: *Operations-Research-Spektrum* 34.3, S. 563–591. ISSN: 0171-6468. DOI: [10.1007/s00291-011-0242-7](https://doi.org/10.1007/s00291-011-0242-7).
- (2013). *Design and Operation of Automated Container Storage Systems*. Heidelberg: Physica-Verlag HD. ISBN: 978-3-7908-2884-9. DOI: [10.1007/978-3-7908-2885-6](https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2885-6).
- Kemme, N. und Schmidt, J. (2020). *Simulationsbasierte Bewertung von Maßnahmen zur Steigerung der Energienachhaltigkeit im Hafenbetrieb : Schlussbericht : SustEnergyPort*. de. DOI: [10.2314/KXP:1726654923](https://doi.org/10.2314/KXP:1726654923).
- Kester, L., Hultink, E. J. und Lauche, K. (2009). „Portfolio decision-making genres: A case study“. In: *Journal of Engineering and Technology Management* 26.4, S. 327–341. ISSN: 09234748. DOI: [10.1016/j.jengtecman.2009.10.006](https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2009.10.006).
- Kettunen, J. und Lejeune, M. A. (2022). „Data-driven project portfolio selection: Decision-dependent stochastic programming formulations with reliability and time to market requirements“. In: *Computers & Operations Research* 143, S. 105737. ISSN: 03050548. DOI: [10.1016/j.cor.2022.105737](https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105737).
- Keyser, W. de und Peeters, P. (1996). „A note on the use of PROMETHEE multicriteria methods“. In: *European Journal of Operational Research* 89.3, S. 457–461. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/0377-2217\(94\)00307-6](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00307-6).
- Klein, D., Carazo, M. P., Doelle, M., Bulmer, J. und Higham, A., Hrsg. (2017). *The Paris Climate Agreement. Analysis and commentary*. Oxford: Oxford University Press. ISBN: 9780198789338.
- Kleinmuntz, D. N. (2007). „Resource Allocation Decisions“. In: *Advances in decision analysis. From foundations to applications*. Hrsg. von D. von Winterfeldt, R. F. Miles und W. Edwards. Cambridge: Cambridge University Press, S. 400–418. ISBN: 9780511611308. DOI: [10.1017/CB09780511611308.021](https://doi.org/10.1017/CB09780511611308.021).
- Knoke, B. (2020). „Rang-E - Autonomes Rangieren auf der Hafentbahn, Teilvorhaben: Technische Betrachtung : Schlussbericht : Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2017-31.10.2019“. de. In: *Rang-E - Autonomes Rangieren auf der Hafentbahn*. DOI: [10.2314/KXP:1698270046](https://doi.org/10.2314/KXP:1698270046).
- Koksalan, M. M., Wallenius, J. und Zionts, S. (2011). *Multiple criteria decision making. From early history to the 21st century*. eng. Singapore und Hackensack, N.J: World Scientific Pub. Co. 197 S. ISBN: 9789814335591.
- Kotler, P. und Turner, R. E. (1997). *Marketing management: Analysis, planning, implementation, and control*. Prentice hall Upper Saddle River, NJ.
- Krämer, I. und Czermański, E. (2020). „Onshore power one option to reduce air emissions in ports“. In: *Sustainability Management Forum | NachhaltigkeitsManagementForum* 28.1-2, S. 13–20. ISSN: 2522-5987. DOI: [10.1007/s00550-020-00497-y](https://doi.org/10.1007/s00550-020-00497-y).
- Kress, D., Meiswinkel, S. und Pesch, E. (2019). „Straddle carrier routing at seaport container terminals in the presence of short term quay crane buffer areas“. In: *European Journal of Operational Research* 279.3, S. 732–750. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2019.06.028](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.06.028).

- Kurttila, M., Muinonen, E., Leskinen, P., Kilpeläinen, H. und Pykäläinen, J. (2009). „An approach for examining the effects of preferential uncertainty on the contents of forest management plan at stand and holding level“. In: *European Journal of Forest Research* 128.1, S. 37–50. ISSN: 1612-4669. DOI: [10.1007/s10342-008-0237-3](https://doi.org/10.1007/s10342-008-0237-3).
- Laabadi, S., Naimi, M., El Amri, H. und Achchab, B. (2018). „The 0/1 Multidimensional Knapsack Problem and Its Variants: A Survey of Practical Models and Heuristic Approaches“. In: *American Journal of Operations Research* 08.05, S. 395–439. ISSN: 2160-8830. DOI: [10.4236/ajor.2018.85023](https://doi.org/10.4236/ajor.2018.85023).
- Lahdelma, R., Hokkanen, J. und Salminen, P. (1998). „SMAA - Stochastic multiobjective acceptability analysis“. In: *European Journal of Operational Research* 106.1, S. 137–143. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/S0377-2217\(97\)00163-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00163-X).
- Lahtinen, T. J. und Hämäläinen, R. P. (2016). „Path dependence and biases in the even swaps decision analysis method“. In: *European Journal of Operational Research* 249.3, S. 890–898. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2015.09.056](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.09.056).
- Lahtinen, T. J., Hämäläinen, R. P. und Liesiö, J. (2017). „Portfolio decision analysis methods in environmental decision making“. In: *Environmental Modelling & Software* 94, S. 73–86. ISSN: 13648152. DOI: [10.1016/j.envsoft.2017.04.001](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.04.001).
- Lapuse, H. (2020). „OBELiSK : individueller Abschlussbericht des Projektes : Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2018-31.08.2021, vorzeitige Beendigung des Vorhabens am 31.10.2019; Berichtszeitraum: 01.09.2018-31.10.2019“. de. In: *OBELiSK*. DOI: [10.2314/KXP:1698250584](https://doi.org/10.2314/KXP:1698250584).
- Le Blanc, D. (2015). „Towards Integration at Last? The Sustainable Development Goals as a Network of Targets“. In: *Sustainable Development* 23.3, S. 176–187. ISSN: 09680802. DOI: [10.1002/sd.1582](https://doi.org/10.1002/sd.1582).
- Lemke, T. N., Pohl, E. und Scharpenberg, C. (2020). *Simulationsbasierte Bewertung von Maßnahmen zur Steigerung der Energienachhaltigkeit im Hafenbetrieb (SustEnergyPort). Verbundabschlussbericht*. Hrsg. von Technische Informationsbibliothek Universitätsbibliothek. Hannover. DOI: [10.2314/KXP:1732455287](https://doi.org/10.2314/KXP:1732455287).
- Lentzen, C. (2018). „IHATEC Projektsteckbrief ZETT“. In: *IHATEC Projektsteckbriefe*. URL: [https://www.innovativehafentechnologien.de/wp-content/uploads/2018/12/IHATEC\\_Projektsteckbrief\\_ZETT-Formatiert\\_2018-12-03.pdf](https://www.innovativehafentechnologien.de/wp-content/uploads/2018/12/IHATEC_Projektsteckbrief_ZETT-Formatiert_2018-12-03.pdf) (besucht am 21. 06. 2022).
- Lerche, N. (2016). *Die Integration der Prospect Theory in PROMETHEE am Beispiel der Nachhaltigkeitsbewertung von Konzepten zur energetischen Nutzung von Biomasse*. ger. 1st ed. Göttingen: Cuvillier Verlag. 241 S. ISBN: 9783736992849. URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5019021>.
- Lerche, N. und Geldermann, J. (2015). „Integration of prospect theory into PROMETHEE - a case study concerning sustainable bioenergy concepts“. In: *International Journal of Multicriteria Decision Making* 5.4, S. 309. ISSN: 2040-106X. DOI: [10.1504/IJMCDM.2015.074085](https://doi.org/10.1504/IJMCDM.2015.074085).
- Leskinen, J. und Häggblom, H. (2019). *Energy management and battery powered horizontal transportation at container terminals*. Hrsg. von Kalmar. URL: [https://www.kalmarglobal.com/491467/globalassets/media/216119/216119\\_FastCharge-WP-2019-WEB.pdf](https://www.kalmarglobal.com/491467/globalassets/media/216119/216119_FastCharge-WP-2019-WEB.pdf) (besucht am 31. 01. 2022).
- Levinson, M. (2016). *The box. How the shipping container made the world smaller and the world economy bigger*. eng. Second edition. Princeton und Oxford: Princeton University Press.

- ISBN: 0691170819. URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=4336792>.
- Levinson, M. (2020). *Outside the box. How globalization changed from moving stuff to spreading ideas*. eng. Princeton, New Jersey: Princeton University Press. 277 S. ISBN: 069119176X. URL: <https://www.jstor.org/stable/10.2307/j.ctvz938q8>.
- Li, X., Peng, Y., Huang, J., Wang, W. und Song, X. (2021). „Simulation study on terminal layout in automated container terminals from efficiency, economic and environment perspectives“. In: *Ocean & Coastal Management* 213, S. 105882. ISSN: 09645691. DOI: [10.1016/j.ocecoaman.2021.105882](https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105882).
- Liesiö, J., Mild, P. und Salo, A. (2007). „Preference programming for robust portfolio modeling and project selection“. In: *European Journal of Operational Research* 181.3, S. 1488–1505. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2005.12.041](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.12.041).
- Liesiö, J., Salo, A., Keisler, J. M. und Morton, A. (2020). „Portfolio Decision Analysis: Recent developments and future prospects“. In: *European Journal of Operational Research*. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2020.12.015](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.12.015).
- Liesiö, J. und Vilkkumaa, E. (2021). „Nonadditive Multiattribute Utility Functions for Portfolio Decision Analysis“. In: *Operations Research*. ISSN: 0030-364X. DOI: [10.1287/opre.2020.2046](https://doi.org/10.1287/opre.2020.2046).
- Lim, S., Pettit, S., Abouarghoub, W. und Beresford, A. (2019). „Port sustainability and performance: A systematic literature review“. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 72, S. 47–64. ISSN: 13619209. DOI: [10.1016/j.trd.2019.04.009](https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.04.009).
- Litvinchev, I. S., Lopez, F., Alvarez, A. und Fernandez, E. (2010). „Large-Scale Public R&D Portfolio Selection by Maximizing a Biobjective Impact Measure“. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans* 40.3, S. 572–582. ISSN: 1083-4427. DOI: [10.1109/TSMCA.2010.2041228](https://doi.org/10.1109/TSMCA.2010.2041228).
- Liu, D. und Ge, Y.-E. (2018). „Modeling assignment of quay cranes using queueing theory for minimizing CO<sub>2</sub> emission at a container terminal“. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 61, S. 140–151. ISSN: 13619209. DOI: [10.1016/j.trd.2017.06.006](https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.006).
- Liu, F., Chen, Y.-w., Yang, J.-b., Xu, D.-l. und Liu, W. (2019). „Solving multiple-criteria R&D project selection problems with a data-driven evidential reasoning rule“. In: *International Journal of Project Management* 37.1, S. 87–97. ISSN: 02637863. DOI: [10.1016/j.ijproman.2018.10.006](https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2018.10.006).
- Lolli, F., Balugani, E., Ishizaka, A., Gamberini, R., Butturi, M. A., Marinello, S. und Rimini, B. (2019). „On the elicitation of criteria weights in PROMETHEE-based ranking methods for a mobile application“. In: *Expert Systems with Applications* 120, S. 217–227. ISSN: 09574174. DOI: [10.1016/j.eswa.2018.11.030](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.11.030).
- Lopes, Y. G. und Almeida, A. T. de (2015). „Assessment of synergies for selecting a project portfolio in the petroleum industry based on a multi-attribute utility function“. In: *Journal of Petroleum Science and Engineering* 126, S. 131–140. ISSN: 09204105. DOI: [10.1016/j.petrol.2014.12.012](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.12.012).
- Luo, J., Wu, Y., Halldorsson, A. und Song, X. (2011). „Storage and stacking logistics problems in container terminals“. In: *OR Insight* 24.4, S. 256–275. DOI: [10.1057/ori.2011.10](https://doi.org/10.1057/ori.2011.10).
- Mareschal, B., Smet, Y. de und Nemery, P. (2008). „Rank reversal in the PROMETHEE II method: Some new results“. In: S. 959–963. DOI: [10.1109/IEEM.2008.4738012](https://doi.org/10.1109/IEEM.2008.4738012).

- Mareschal, B. (1988). „Weight stability intervals in multicriteria decision aid“. In: *European Journal of Operational Research* 33.1, S. 54–64. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/0377-2217\(88\)90254-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(88)90254-8).
- (2012). *Multicriteria Decision Aid with Visual PROMETHEE*. URL: <http://www.prometheegaia.net/FR/assets/mcdss2012.pdf> (besucht am 10. 05. 2022).
- Mareschal, B. und Brans, J.-P. (1988). „Geometrical representations for MCDA“. In: *European Journal of Operational Research* 34.1, S. 69–77. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/0377-2217\(88\)90456-0](https://doi.org/10.1016/0377-2217(88)90456-0). (Besucht am 24. 11. 2020).
- Mareschal, B. und Tsaples, G. (2021). „The History and Future of PROMETHEE“. In: *EURO Working Group on DSS*. Hrsg. von J. Papathanasiou, P. Zaraté und J. Freire de Sousa. Integrated Series in Information Systems. Cham: Springer International Publishing, S. 259–272. ISBN: 978-3-030-70376-9. DOI: [10.1007/978-3-030-70377-6\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-70377-6_14).
- Marine Department - The Government of the Hong Kong Special Administrative Region (2022). *Ranking of Container Ports of the World*. URL: [https://www.mardep.gov.hk/en/fact/pdf/portstat\\_2\\_y\\_b5.pdf](https://www.mardep.gov.hk/en/fact/pdf/portstat_2_y_b5.pdf).
- Marinoni, O., Adkins, P. und Hajkowicz, S. (2011). „Water planning in a changing climate: Joint application of cost utility analysis and modern portfolio theory“. In: *Environmental Modelling & Software* 26.1, S. 18–29. ISSN: 13648152. DOI: [10.1016/j.envsoft.2010.03.001](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.03.001).
- Marinoni, O., Higgins, A., Hajkowicz, S. und Collins, K. (2009). „The multiple criteria analysis tool (MCAT): A new software tool to support environmental investment decision making“. In: *Environmental Modelling & Software* 24.2, S. 153–164. ISSN: 13648152. DOI: [10.1016/j.envsoft.2008.06.015](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.06.015).
- Markl-Hummel, L. und Geldermann, J. (2014). „A local-level, multiple criteria decision aid for climate protection“. In: *EURO Journal on Decision Processes* 2.1-2, S. 121–152. ISSN: 2193-9438. DOI: [10.1007/s40070-013-0011-8](https://doi.org/10.1007/s40070-013-0011-8).
- Markowitz, H. (1952). „Portfolio Selection“. In: *The Journal of Finance* 7.1, S. 77–91. ISSN: 00221082. DOI: [10.1111/j.1540-6261.1952.tb01525.x](https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.1952.tb01525.x).
- Martello, S. und Toth, P. (1990). *Knapsack problems. Algorithms and computer implementations*. eng. Wiley-Interscience series in discrete mathematics and optimization. New York: Wiley & Sons. 296 S. ISBN: 0-471-92420-2.
- Martínez-Moya, J., Vazquez-Paja, B. und Gimenez Maldonado, J. A. (2019). „Energy efficiency and CO<sub>2</sub> emissions of port container terminal equipment: Evidence from the Port of Valencia“. In: *Energy Policy* 131, S. 312–319. ISSN: 03014215. DOI: [10.1016/j.enpol.2019.04.044](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.04.044).
- Martinsuo, M. und Geraldi, J. (2020). „Management of project portfolios: Relationships of project portfolios with their contexts“. In: *International Journal of Project Management* 38.7, S. 441–453. ISSN: 02637863. DOI: [10.1016/j.ijproman.2020.02.002](https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2020.02.002).
- Marttunen, M., Lienert, J. und Belton, V. (2017). „Structuring problems for Multi-Criteria Decision Analysis in practice: A literature review of method combinations“. In: *European Journal of Operational Research* 263.1, S. 1–17. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2017.04.041](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.041).
- Mavrotas, G., Diakoulaki, D. und Caloghirou, Y. (2006). „Project prioritization under policy restrictions. A combination of MCDA with 0–1 programming“. In: *European Journal of Operational Research* 171.1, S. 296–308. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2004.07.069](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.069).

- Mavrotas, G., Diakoulaki, D. und Kourentzis, A. (2008). „Selection among ranked projects under segmentation, policy and logical constraints“. In: *European Journal of Operational Research* 187.1, S. 177–192. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2007.03.010](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.03.010).
- Meskendahl, S. (2010). „The influence of business strategy on project portfolio management and its success — A conceptual framework“. In: *International Journal of Project Management* 28.8, S. 807–817. ISSN: 02637863. DOI: [10.1016/j.ijproman.2010.06.007](https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2010.06.007).
- Metaxiotis, K. und Liagkouras, K. (2012). „Multiobjective Evolutionary Algorithms for Portfolio Management: A comprehensive literature review“. In: *Expert Systems with Applications* 39.14, S. 11685–11698. ISSN: 09574174. DOI: [10.1016/j.eswa.2012.04.053](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.04.053).
- Meyer, A. D. (1991). „Visual Data in Organizational Research“. In: *Organization Science* 2.2, S. 218–236. ISSN: 1047-7039. DOI: [10.1287/orsc.2.2.218](https://doi.org/10.1287/orsc.2.2.218). (Besucht am 24. 11. 2020).
- Miettinen, K. (2014). „Survey of methods to visualize alternatives in multiple criteria decision making problems“. In: *OR Spectrum* 36.1, S. 3–37. DOI: [10.1007/s00291-012-0297-0](https://doi.org/10.1007/s00291-012-0297-0).
- Miller, G. A. (1956). „The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information“. In: *Psychological Review* 63.2, S. 81–97. DOI: [10.1037/h0043158](https://doi.org/10.1037/h0043158).
- Mladineo, M., Veza, I. und Gjeldum, N. (2017). „Solving partner selection problem in cyber-physical production networks using the HUMANT algorithm“. In: *International Journal of Production Research* 55.9, S. 2506–2521. ISSN: 0020-7543. DOI: [10.1080/00207543.2016.1234084](https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1234084).
- Moretti, S., Öztürk, M. und Tsoukiàs, A. (2016). „Preference Modelling“. In: *Multiple criteria decision analysis. State of the art surveys*. Hrsg. von S. Greco, M. Ehrgott und J. R. Figueira. Second edition. Bd. 233. International Series in Operations Research & Management Science 233. New York u. a.: Springer, S. 43–95. ISBN: 978-1-4939-3093-7. DOI: [10.1007/978-1-4939-3094-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_3).
- Morton, A. und Fasolo, B. (2009). „Behavioural decision theory for multi-criteria decision analysis: a guided tour“. In: *Journal of the Operational Research Society* 60.2, S. 268–275. ISSN: 0160-5682. DOI: [10.1057/palgrave.jors.2602550](https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602550).
- Morton, A., Keisler, J. M. und Salo, A. (2016). „Multicriteria Portfolio Decision Analysis for Project Selection“. In: *Multiple criteria decision analysis. State of the art surveys*. Hrsg. von S. Greco, M. Ehrgott und J. R. Figueira. Second edition. Bd. 233. International Series in Operations Research & Management Science 233. New York u. a.: Springer, S. 1269–1298. ISBN: 978-1-4939-3093-7. DOI: [10.1007/978-1-4939-3094-4\\_28](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_28).
- Mousseau, V. (1995). „Eliciting Information Concerning the Relative Importance of Criteria“. In: *Advances in Multicriteria Analysis*. Hrsg. von P. Pardalos, R. Horst, P. M. Pardalos, Y. Siskos und C. Zopounidis. Bd. 5. Nonconvex Optimization and Its Applications. Boston, MA: Springer US, S. 17–43. ISBN: 978-1-4419-4748-2. DOI: [10.1007/978-1-4757-2383-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2383-0_3).
- Munda, G. (2005). „“Measuring Sustainability”: A Multi-Criterion Framework“. In: *Environment, Development and Sustainability* 7.1, S. 117–134. ISSN: 1387-585X. DOI: [10.1007/s10668-003-4713-0](https://doi.org/10.1007/s10668-003-4713-0).
- (2016). „Multiple Criteria Decision Analysis and Sustainable Development“. In: *Multiple criteria decision analysis. State of the art surveys*. Hrsg. von S. Greco, M. Ehrgott und J. R. Figueira. Second edition. Bd. 233. International Series in Operations Research &



- Management Science 233. New York u. a.: Springer, S. 1235–1267. ISBN: 978-1-4939-3093-7. DOI: [10.1007/978-1-4939-3094-4\\_27](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_27).
- Murcia González, J.-C. (2021). „Analysis and measurement of SO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, PM and NO<sub>x</sub> emissions in port auxiliary vessels“. eng. In: *Environmental monitoring and assessment* 193,6, S. 374. DOI: [10.1007/s10661-021-09145-4](https://doi.org/10.1007/s10661-021-09145-4). eprint: [34061261](https://doi.org/10.1007/s10661-021-09145-4).
- Nardo, M. und Saisana, M. (2008). „OECD/JRC handbook on constructing composite indicators. Putting theory into practice“. In: *Proceedings of the NTTS (New Techniques and Technologies for Statistics) Seminar*, S. 16.
- Nash und Rassias, M. T., Hrsg. (2016). *Open Problems in Mathematics*. eng. SpringerLink Bücher. Cham: Springer. 543 S. ISBN: 978-3319321608. DOI: [10.1007/978-3-319-32162-2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32162-2). URL: <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz476158990cov.htm>.
- Nassereddine, M., Azar, A., Rajabzadeh, A. und Afsar, A. (2019). „Decision making application in collaborative emergency response: A new PROMETHEE preference function“. In: *International Journal of Disaster Risk Reduction* 38, S. 101221. ISSN: 22124209. DOI: [10.1016/j.ijdrr.2019.101221](https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101221).
- Nellen, N., Grafelmann, M., Ziegenbein, J., Lange, A.-K., Kreutzfeldt, J. und Jahn, C. (2020). „Literature Classification on Container Transport Systems for Inter-terminal Transportation“. In: *Dynamics in Logistics*. Hrsg. von M. Freitag, H.-D. Haasis, H. Kotzab und J. Pannek. Lecture Notes in Logistics. Cham: Springer International Publishing, S. 52–61. ISBN: 978-3-030-44782-3. DOI: [10.1007/978-3-030-44783-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-44783-0_5).
- Nielsen, L., Klausung, P. und Nyhuis, P. (2021). „Towards a Target System to Incorporate Sustainability in Multi-project Management in Factories“. In: S. 9–23. DOI: [10.1007/978-3-030-60139-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-60139-3_2).
- Norddeutscher Rundfunk (4.10.2022). *Größtes Containerschiff der Welt hat Hamburg wieder verlassen*. URL: <https://www.ndr.de/nachrichten/hamburg/Ever-Alt-Groesstes-Containerschiff-der-Welt-verlaesst-Hamburger-Hafen,rekordschiff100.html> (besucht am 04. 11. 2022).
- Nuhn, H. (2010). „Containerisierung und Globalisierung – Restrukturierung der maritimen Logistikkette“. de. In: *Zeitschrift für Wirtschaftsgeographie* 54,1, S. 150–165. ISSN: 2365-7693. DOI: [10.1515/zfw.2010.0011](https://doi.org/10.1515/zfw.2010.0011). URL: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/zfw.2010.0011/html>.
- Oberschmidt, J., Geldermann, J., Ludwig, J. und Schmehl, M. (2010). „Modified PROMETHEE approach for assessing energy technologies“. eng. In: *International journal of energy sector management : IJESM* 4,2, S. 183–212.
- PMI (2013). *The standard for portfolio management, third edition*. eng. 3rd ed. Newtown Square, Pa: Project Management Institute. ISBN: 978-1-935589-69-3. URL: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=579201>.
- Parnell, G. S., Bennett, G. E., Engelbrecht, J. A. und Szafranski, R. (2002). „Improving Resource Allocation Within the National Reconnaissance Office“. In: *Interfaces* 32,3, S. 77–90. ISSN: 0092-2102. DOI: [10.1287/inte.32.3.77.40](https://doi.org/10.1287/inte.32.3.77.40).
- Paydar, Z. und Qureshi, M. E. (2012). „Irrigation water management in uncertain conditions—Application of Modern Portfolio Theory“. In: *Agricultural Water Management* 115, S. 47–54. ISSN: 03783774. DOI: [10.1016/j.agwat.2012.08.004](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.08.004).

- Paz, F. deLlano, Calvo-Silvosa, A., Antelo, S. I. und Soares, I. (2017). „Energy planning and modern portfolio theory: A review“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 77, S. 636–651. ISSN: 13640321. DOI: [10.1016/j.rser.2017.04.045](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.045).
- Peng, Y., Wang, W., Song, X. und Zhang, Q. (2016). „Optimal allocation of resources for yard crane network management to minimize carbon dioxide emissions“. In: *Journal of Cleaner Production* 131, S. 649–658. DOI: [10.1016/j.jclepro.2016.04.120](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.120).
- Phillips, L. D. und Bana e Costa, C. A. (2007). „Transparent prioritisation, budgeting and resource allocation with multi-criteria decision analysis and decision conferencing“. In: *Annals of Operations Research* 154.1, S. 51–68. ISSN: 0254-5330. DOI: [10.1007/s10479-007-0183-3](https://doi.org/10.1007/s10479-007-0183-3).
- Pohl, E., Lauen, L.-P. und Geldermann, J. (2019). „An Exact Method for Cost-Minimal Deployment of a Rail Crane Using Demand Response“. In: *Operations Research Proceedings 2018*. Hrsg. von B. Fortz und M. Labbé. Bd. 29. Operations Research Proceedings. Cham: Springer International Publishing, S. 183–189. ISBN: 978-3-030-18499-5. DOI: [10.1007/978-3-030-18500-8\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-030-18500-8_24).
- Pohl, E., Scharpenberg, C. und Geldermann, J. (2020a). „Assessment of Energy and Emission Reduction Measures in Container Terminals using PROMETHEE for Portfolio Selection“. In: *Operations Research Proceedings 2019*. Hrsg. von J. S. Neufeld, U. Buscher, R. Lasch, D. Möst und J. Schönberger. Operations Research Proceedings. Cham: Springer International Publishing, S. 141–147. ISBN: 978-3-030-48438-5. DOI: [10.1007/978-3-030-48439-2\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-48439-2_17).
- (2020b). *Simulationsbasierte Bewertung von Maßnahmen zur Steigerung der Energienachhaltigkeit im Hafenbetrieb. Schlussbericht: Teilprojekt Universität Duisburg-Essen*. Hrsg. von Technische Informationsbibliothek Universitätsbibliothek Hannover. Universität Duisburg-Essen und HPC Hamburg-Port-Consulting GmbH. DOI: [10.2314/KXP:1732461341](https://doi.org/10.2314/KXP:1732461341).
- Port Equipment Manufacturers Association (2011). *Energy and Environmental Efficiency in Ports and Terminals*. URL: <https://www.pema.org/wp-content/uploads/downloads/2011/06/PEMA-IP2-Energy-and-Environmental-Efficiency-in-Ports-and-Terminals.pdf> (besucht am 01.02.2022).
- Port of Gothenburg (2021). *Unique charging and hydrogen filling station to be built in the Port of Gothenburg*. URL: <https://www.portofgothenburg.com/news-room/press-releases/unique-charging-and-hydrogen-filling-station-to-be-built-in-the-port-of-gothenburg/> (besucht am 21.06.2022).
- Prato, T. und Herath, G. (2007). „Multiple-criteria decision analysis for integrated catchment management“. In: *Ecological Economics* 63.2-3, S. 627–632. ISSN: 09218009. DOI: [10.1016/j.ecolecon.2007.01.003](https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.01.003).
- Protic, S. M., Geerlings, H. und van Duin, R. (2019). „Environmental Sustainability of Freight Transportation Terminals“. In: *Sustainable transportation and smart logistics. Decision-making models and solutions*. Hrsg. von J. Faulin, S. E. Grasman, A. A. Juan und P. Hirsch. Bd. 27. Amsterdam, Kidlington und Cambridge, MA: Elsevier, S. 233–260. ISBN: 978-0-12-814242-4. DOI: [10.1016/B978-0-12-814242-4.00009-0](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814242-4.00009-0).
- Raesi, R., Sahebjamnia, N. und Mansouri, S. A. (2022). „The synergistic effect of operational research and big data analytics in greening container terminal operations: A review and future directions“. In: *European Journal of Operational Research*. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2022.11.054](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.11.054).

- Remus, W. (1987). „A Study of Graphical and Tabular Displays and Their Interaction with Environmental Complexity“. In: *Management Science* 33.9, S. 1200–1204. ISSN: 0025-1909. DOI: [10.1287/mnsc.33.9.1200](https://doi.org/10.1287/mnsc.33.9.1200).
- Rezaei, J. (2015). „Best-worst multi-criteria decision-making method“. In: *Omega* 53, S. 49–57. ISSN: 03050483. DOI: [10.1016/j.omega.2014.11.009](https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009).
- Robenek, T., Umang, N., Bierlaire, M. und Ropke, S. (2014). „A branch-and-price algorithm to solve the integrated berth allocation and yard assignment problem in bulk ports“. In: *European Journal of Operational Research* 235.2, S. 399–411. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2013.08.015](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.08.015).
- Rodrigues, F. und Agra, A. (2022). „Berth allocation and quay crane assignment/scheduling problem under uncertainty: A survey“. In: *European Journal of Operational Research*. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2021.12.040](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.12.040).
- Rosati, F. und Faria, L. G. (2019). „Addressing the SDGs in sustainability reports: The relationship with institutional factors“. In: *Journal of Cleaner Production* 215, S. 1312–1326. DOI: [10.1016/j.jclepro.2018.12.107](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.107).
- Roy, B. (1972). „How outranking relation helps multiple criteria decision making“. In: *SEMA (Metra International), Direction Scientifique*.
- (1986). „Méthodologie multicritère d'aide à la décision“. fre. In: 0758-1726. ISSN: 0758-1726. URL: [https://www.persee.fr/doc/pomap\\_0758-1726\\_1986\\_num\\_4\\_3\\_1906\\_t1\\_0138\\_0000\\_1](https://www.persee.fr/doc/pomap_0758-1726_1986_num_4_3_1906_t1_0138_0000_1).
- (1990). „Decision-aid and decision-making“. In: *European Journal of Operational Research* 45.2-3, S. 324–331. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/0377-2217\(90\)90196-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90196-I).
- (1993). „Decision science or decision-aid science?“ In: *European Journal of Operational Research* 66.2, S. 184–203. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/0377-2217\(93\)90312-B](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90312-B).
- (2016). „Paradigms and Challenges“. In: *Multiple criteria decision analysis. State of the art surveys*. Hrsg. von S. Greco, M. Ehrgott und J. R. Figueira. Second edition. Bd. 233. International Series in Operations Research & Management Science 233. New York u. a.: Springer, S. 19–39. ISBN: 978-1-4939-3093-7. DOI: [10.1007/978-1-4939-3094-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_2).
- Roy, B. und Bouyssou, D. (1993). *Aide multicritère à la décision: méthodes et cas*. Paris: Economica. URL: [https://www.researchgate.net/profile/denis-bouyssou/publication/265441342\\_aide\\_multicritere\\_a\\_la\\_decision\\_methodes\\_et\\_cas/links/5a9575e0aca27214056922b6/aide-multicritere-a-la-decision-methodes-et-cas.pdf](https://www.researchgate.net/profile/denis-bouyssou/publication/265441342_aide_multicritere_a_la_decision_methodes_et_cas/links/5a9575e0aca27214056922b6/aide-multicritere-a-la-decision-methodes-et-cas.pdf).
- Roy, B. und Mousseau, V. (1996). „A Theoretical Framework for Analysing the Notion of Relative Importance of Criteria“. In: *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 5.2, S. 145–159. ISSN: 10579214. DOI: [10.1002/\(SICI\)1099-1360\(199606\)5:2<145::AID-MCDA99>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1360(199606)5:2<145::AID-MCDA99>3.0.CO;2-5).
- Roy, B. und Vanderpooten, D. (1996). „The European school of MCDA: Emergence, basic features and current works“. In: *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 5.1, S. 22–38. ISSN: 10579214. DOI: [10.1002/\(SICI\)1099-1360\(199603\)5:1%3C22::AID-MCDA93%3E3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1360(199603)5:1%3C22::AID-MCDA93%3E3.0.CO;2-F).
- Roy, D., Gupta, A. und Koster, R. B. de (2016). „A non-linear traffic flow-based queuing model to estimate container terminal throughput with AGVs“. In: *International Journal of Production Research* 54.2, S. 472–493. ISSN: 0020-7543. DOI: [10.1080/00207543.2015.1056321](https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1056321).

- Roy, D., Koster, R. de und Bekker, R. (2020). „Modeling and Design of Container Terminal Operations“. In: *Operations Research*. ISSN: 0030-364X. DOI: [10.1287/opre.2019.1920](https://doi.org/10.1287/opre.2019.1920).
- Saaty, R. W. (1987). „The analytic hierarchy process—what it is and how it is used“. In: *Mathematical Modelling* 9.3-5, S. 161–176. ISSN: 02700255. DOI: [10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8).
- Sadek, I. und Elgohary, M. (2020). „Assessment of renewable energy supply for green ports with a case study“. eng. In: *Environmental science and pollution research international* 27.5, S. 5547–5558. DOI: [10.1007/s11356-019-07150-2](https://doi.org/10.1007/s11356-019-07150-2). eprint: [31853847](https://arxiv.org/abs/31853847).
- Salo, A. und Cuhls, K. (2003). „Technology foresight?past and future“. In: *Journal of Forecasting* 22.2-3, S. 79–82. ISSN: 0277-6693. DOI: [10.1002/for.846](https://doi.org/10.1002/for.846).
- Salo, A., Keisler, J. und Morton, A. (2011). *Portfolio Decision Analysis. Improved Methods for Resource Allocation*. eng. Bd. 162. International Series in Operations Research & Management Science. New York, NY: Springer Science+Business Media LLC. ISBN: 9781441999429. DOI: [10.1007/978-1-4419-9943-6](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9943-6). URL: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10494298>.
- Saltelli, A., Tarantola, S. und Chan, K. (1999). „A role for sensitivity analysis in presenting the results from MCDA studies to decision makers“. In: *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 8.3, S. 139–145. ISSN: 10579214. DOI: [10.1002/\(SICI\)1099-1360\(199905\)8:3<139::AID-MCDA239>3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1360(199905)8:3<139::AID-MCDA239>3.0.CO;2-C).
- Scharpenberg, C., Pohl, E., Lauven, L.-P. und Geldermann, J. (2018). „Ecological assessment of port equipment for container terminals“. In: *Logistics 4.0 and Sustainable Supply Chain Management: Innovative Solutions for Logistics and Sustainable Supply Chain Management in the Context of Industry 4.0. Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL)*. Hrsg. von C. Jahn, W. Kersten und C. M. Ringle. 26. Aufl. epubli GmbH, Berlin, S. 3–20. ISBN: 978-3-7467-6536. DOI: [10.15480/882.1810](https://doi.org/10.15480/882.1810).
- Schlei-Peters, I. (2019). *Investitionsplanung produktionsbezogener Umweltschutzmaßnahmen. Produktion und Logistik*. Wiesbaden: Springer Gabler. DOI: [10.1007/978-3-658-26354-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-658-26354-6_3).
- Schmidt, G. und Ströhlein, T. (1989). *Relationen und Graphen*. ger. Mathematik für Informatiker. Berlin und Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-642-83608-4. DOI: [10.1007/978-3-642-83608-4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-83608-4).
- Schmidt, J., Lauven, L.-P., Ihle, N. und Kolbe, L. M. (2015a). „Demand side integration for electric transport vehicles“. In: *International Journal of Energy Sector Management* 9.4, S. 471–495. ISSN: 1750-6220. DOI: [10.1108/IJESM-11-2014-0002](https://doi.org/10.1108/IJESM-11-2014-0002).
- Schmidt, J., Meyer-Barlag, C., Eisel, M., Kolbe, L. M. und Appelrath, H.-J. (2015b). „Using battery-electric AGVs in container terminals — Assessing the potential and optimizing the economic viability“. In: *Research in Transportation Business & Management* 17, S. 99–111. ISSN: 22105395. DOI: [10.1016/j.rtbm.2015.09.002](https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2015.09.002).
- Schneeweiß, C. (1991). *Planung. Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen*. ger. Springer eBook Collection Business and Economics. Berlin, Heidelberg und s.l.: Springer Berlin Heidelberg. 389 S. ISBN: 978-3-642-58237-0. DOI: [10.1007/978-3-642-58237-0](https://doi.org/10.1007/978-3-642-58237-0).
- Schoemaker, P. J. H. (1995). „Scenario planning: a tool for strategic thinking“. In: *Sloan management review* 36.2, S. 25–50.

- Schröder, T., Lauven, L.-P., Beyer, B., Lerche, N. und Geldermann, J. (2019). „Using PROMETHEE to assess bioenergy pathways“. In: *Central European Journal of Operations Research* 27.2, S. 287–309. ISSN: 1435-246X. DOI: [10.1007/s10100-018-0590-3](https://doi.org/10.1007/s10100-018-0590-3).
- Schulte, F., Lalla-Ruiz, E., González-Ramírez, R. G. und Voß, S. (2017). „Reducing port-related empty truck emissions: A mathematical approach for truck appointments with collaboration“. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 105, S. 195–212. ISSN: 13665545. DOI: [10.1016/j.tre.2017.03.008](https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.03.008).
- Schultmann, F., Jochum, R. und Rentz, O. (2002). „Stoffstrombasierte (Investitionsplanung) zur Bewertung betrieblicher Emissionsminderungsmaßnahmen“. In: *Zeitschrift für Planung, Bd 13*, S. 1–26.
- Sharpe, W. F. (1964). „Capital Asset Prices: A Theory of Market Equilibrium Under Conditions of Risk“. In: *The Journal of Finance* 19.3, S. 425–442. ISSN: 00221082. DOI: [10.1111/j.1540-6261.1964.tb02865.x](https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.1964.tb02865.x).
- Siemens AG und Oellerich, J. (2021). *Pressemitteilung: Hamburg Port Authority vergibt erste Aufträge für Landstromanlagen für Containerschiffe an den Terminals Burchardkai und Tollerort an Siemens*. Hrsg. von Siemens AG. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/asset/api/uuid:cabeae73-03a6-4e7a-a425-080bb3ad9f48/20211105-PM-HBG-HPA-Auftrag-Siemens-Landstromanlage-CTB-u.-CTT-AdapRC-DE.pdf> (besucht am 21. 09. 2022).
- Silva, S. (2021). „Corporate contributions to the Sustainable Development Goals: An empirical analysis informed by legitimacy theory“. In: *Journal of Cleaner Production* 292, S. 125962. DOI: [10.1016/j.jclepro.2021.125962](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125962).
- Simon, H. A. (1977). *The new science of management decision*. eng. Rev. ed. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall. 175 S. ISBN: 978-0136161448.
- Simos, J. (1990). „Levaluation environnementale: un proces sur cognitif negocié“. Dissertation, DGR-EPFL, Lausanne.
- Singh, N., Dang, Q.-V., Akcay, A., Adan, I. und Martagan, T. (2022). „A matheuristic for AGV scheduling with battery constraints“. In: *European Journal of Operational Research* 298.3, S. 855–873. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2021.08.008](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.08.008).
- Siskos, E. und Tsotsolas, N. (2015). „Elicitation of criteria importance weights through the Simos method: A robustness concern“. In: *European Journal of Operational Research* 246.2, S. 543–553. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2015.04.037](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.04.037).
- Slapper, T. F. und Hall, T. J. (2011). „The Triple Bottom Line: What Is It and How Does It Work?“ In: *Indiana Business Review*. URL: <http://www.ibrc.indiana.edu/ibr/2011/spring/pdfs/article2.pdf> (besucht am 08. 06. 2022).
- Solymosi, T. und Dombi, J. (1986). „A method for determining the weights of criteria: The centralized weights“. In: *European Journal of Operational Research* 26.1, S. 35–41. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/0377-2217\(86\)90157-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(86)90157-8).
- Song, S., Wei, T., Yang, F. und Xia, Q. (2021). „Stochastic multi-attribute acceptability analysis-based heuristic algorithms for multi-attribute project portfolio selection and scheduling problem“. In: *Journal of the Operational Research Society* 72.6, S. 1373–1389. ISSN: 0160-5682. DOI: [10.1080/01605682.2020.1718018](https://doi.org/10.1080/01605682.2020.1718018).
- Spengler, T. und Wilmsmeier, G. (2016). „Energy consumption and energy efficiency indicators in container terminals-a national inventory“. In: *IAME 2016 Conference, Hamburg, Germany, August*, S. 23–26.

- Stahlbock, R. und Voß, S. (2008). „Vehicle Routing Problems and Container Terminal Operations – An Update of Research“. In: *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*. Hrsg. von B. Golden, S. Raghavan und E. Wasil. Bd. 43. Operations Research/Computer Science Interfaces. Boston, MA: Springer US, S. 551–589. ISBN: 978-0-387-77777-1. DOI: [10.1007/978-0-387-77778-8\\_25](https://doi.org/10.1007/978-0-387-77778-8_25).
- Steenken, D. (2003). „Optimised vehicle routing at a seaport container terminal“. In: *ORbit* 4, S. 8–14.
- Steurer, M. (2017). „Analyse von Demand Side Integration im Hinblick auf eine effiziente und umweltfreundliche Energieversorgung“. de. In: *0938-1228*. ISSN: 0938-1228. DOI: [10.18419/opus-9181](https://doi.org/10.18419/opus-9181).
- Stewart, T. J. (1992). „A critical survey on the status of multiple criteria decision making theory and practice“. In: *Omega* 20.5-6, S. 569–586. ISSN: 03050483. DOI: [10.1016/0305-0483\(92\)90003-P](https://doi.org/10.1016/0305-0483(92)90003-P).
- Stewart, T. J. (1995). „Simplified approaches for multicriteria decision making under uncertainty“. In: *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 4.4, S. 246–258. ISSN: 10579214. DOI: [10.1002/mcda.4020040404](https://doi.org/10.1002/mcda.4020040404).
- Stewart, T. J. und Durbach, I. (2016). „Dealing with Uncertainties in MCDA“. In: *Multiple Criteria Decision Analysis*. Hrsg. von S. Greco, M. Ehrgott und J. R. Figueira. Bd. 233. International Series in Operations Research & Management Science. New York, NY: Springer New York, S. 467–496. ISBN: 978-1-4939-3093-7. DOI: [10.1007/978-1-4939-3094-4\\_12](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_12).
- Stillwell, W. G., Seaver, D. A. und Edwards, W. (1981). „A comparison of weight approximation techniques in multiattribute utility decision making“. In: *Organizational Behavior and Human Performance* 28.1, S. 62–77. ISSN: 00305073. DOI: [10.1016/0030-5073\(81\)90015-5](https://doi.org/10.1016/0030-5073(81)90015-5).
- Stillwell, W. G., Winterfeldt, D. von und John, R. S. (1987). „Comparing Hierarchical and Nonhierarchical Weighting Methods for Eliciting Multiattribute Value Models“. In: *Management Science* 33.4, S. 442–450. ISSN: 0025-1909. DOI: [10.1287/mnsc.33.4.442](https://doi.org/10.1287/mnsc.33.4.442).
- Sullivan, K., Thomas, S. und Rosano, M. (2018). „Using industrial ecology and strategic management concepts to pursue the Sustainable Development Goals“. In: *Journal of Cleaner Production* 174, S. 237–246. DOI: [10.1016/j.jclepro.2017.10.201](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.201).
- Taha, Z. und Rostam, S. (2012). „A hybrid fuzzy AHP-PROMETHEE decision support system for machine tool selection in flexible manufacturing cell“. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 23.6, S. 2137–2149. ISSN: 0956-5515. DOI: [10.1007/s10845-011-0560-2](https://doi.org/10.1007/s10845-011-0560-2).
- Tan, C., Yan, W. und Yue, J. (2021). „Quay crane scheduling in automated container terminal for the trade-off between operation efficiency and energy consumption“. In: *Advanced Engineering Informatics* 48, S. 101285. ISSN: 14740346. DOI: [10.1016/j.aei.2021.101285](https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101285).
- Tang, G., Qin, M., Zhao, Z., Yu, J. und Shen, C. (2020). „Performance of peak shaving policies for quay cranes at container terminals with double cycling“. In: *Simulation Modelling Practice and Theory* 104, S. 102129. ISSN: 1569190X. DOI: [10.1016/j.simpat.2020.102129](https://doi.org/10.1016/j.simpat.2020.102129).
- The European Sea Ports Organisation (2020). „ESPO Environmental Report 2020. EcoPorts-inSights 2020“. In: URL: <https://www.espo.be/media/Environmental%20Report-WEBSITE-FINAL.pdf> (besucht am 16.06.2022).

- The World Association for Waterborne Transport Infrastructure (2019). *MarCom WG 159: Renewables and Energy Efficiency for Maritime Ports*. Hrsg. von The World Association for Waterborne Transport Infrastructure. PIANC Maritime Navigation Commission.
- Thommen, J.-P., Achleitner, A.-K., Gilbert, D. U., Hachmeister, D. und Kaiser, G. (2017). *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-07767-9. DOI: [10.1007/978-3-658-07768-6](https://doi.org/10.1007/978-3-658-07768-6).
- Thonemann, N., Schulte, A. und Maga, D. (2020). „How to Conduct Prospective Life Cycle Assessment for Emerging Technologies? A Systematic Review and Methodological Guidance“. en. In: *Sustainability* 12.3, S. 1192. DOI: [10.3390/su12031192](https://doi.org/10.3390/su12031192). URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/3/1192>.
- Tianjin Port Development Holdings Limited (2011). *Tianjin Port Development Announces 2011 Annual Results*. URL: [https://media-tianjinportdev.todayir.com/20170905151713288415501\\_en.pdf](https://media-tianjinportdev.todayir.com/20170905151713288415501_en.pdf) (besucht am 21. 04. 2022).
- Ting, H. M. (1971). *Aggregation of attributes for multiattributed utility assessment*. MIT Operations Research Center.
- Tofighian, A. A., Moezzi, H., Khakzar Barfuei, M. und Shafiee, M. (2018). „Multi-period project portfolio selection under risk considerations and stochastic income“. In: *Journal of Industrial Engineering International* 14.3, S. 571–584. ISSN: 1735-5702. DOI: [10.1007/s40092-017-0242-6](https://doi.org/10.1007/s40092-017-0242-6).
- Treitz, M. (2006). *Production process design using multi-criteria analysis*. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2006. eng. Karlsruhe: Universitätsverlag. ISBN: 978-3-86644-086-9. DOI: [10.5445/KSP/1000005289](https://doi.org/10.5445/KSP/1000005289). URL: <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000005289>.
- Tsai, Y.-T., Liang, C.-J., Huang, K.-H., Hung, K.-H., Jheng, C.-W. und Liang, J.-J. (2018). „Self-management of greenhouse gas and air pollutant emissions in Taichung Port, Taiwan“. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 63, S. 576–587. ISSN: 13619209. DOI: [10.1016/j.trd.2018.07.001](https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.07.001).
- Tversky, A. und Kahneman, D. (1974). „Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases“. eng. In: *Science (New York, N.Y.)* 185.4157, S. 1124–1131. DOI: [10.1126/science.185.4157.1124](https://doi.org/10.1126/science.185.4157.1124). eprint: [17835457](https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.178354571).
- United Nations Conference on Trade and Development (2008). *Review of maritime transport 2008. Report*. eng. New York und Geneva: United Nations Publications. 184 S. ISBN: 978-92-1-112758-4. URL: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=265815>.
- (2021). *Review of Maritime Transport 2020*. Hrsg. von United Nations Publications. URL: [https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2020\\_en.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2020_en.pdf) (besucht am 10. 05. 2021).
- (2022). *Review of Maritime Transport 2021*. United Nations Publications. ISBN: 978-92-1-113026-3. URL: [https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2021\\_en\\_0.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2021_en_0.pdf) (besucht am 01. 09. 2022).
- United Nations Sustainable Development (19.09.2020). *Take Action for the Sustainable Development Goals - United Nations Sustainable Development*. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/> (besucht am 07. 06. 2022).

- United Nations (2017). „SDG Indicators. Global indicator framework for the Sustainable Development Goals and targets of the 2030 Agenda for Sustainable Development“. In: URL: <https://unstats.un.org/sdgs/indicators/indicators-list/> (besucht am 07.06.2022).
- Verly, C. und Smet, Y. de (2013). „Some results about rank reversal instances in the PROMETHEE methods“. In: *International Journal of Multicriteria Decision Making* 3.4, S. 325. ISSN: 2040-106X. DOI: [10.1504/IJMCDM.2013.056781](https://doi.org/10.1504/IJMCDM.2013.056781).
- Vetschera, R. (1986). „Sensitivity analysis for the ELECTRE multicriteria method“. In: *Zeitschrift für Operations Research* 30.4, B99–B117. ISSN: 0340-9422. DOI: [10.1007/BF01920556](https://doi.org/10.1007/BF01920556).
- Vetschera, R. (1994). „Visualisierungstechniken in Entscheidungsproblemen bei mehrfacher Zielsetzung“. In: *Operations-Research-Spektrum* 16.4, S. 227–241. ISSN: 0171-6468. DOI: [10.1007/BF01720313](https://doi.org/10.1007/BF01720313).
- Vetschera, R. und Almeida, A. T. de (2012). „A PROMETHEE-based approach to portfolio selection problems“. In: *Computers & Operations Research* 39.5, S. 1010–1020. ISSN: 03050548. DOI: [10.1016/j.cor.2011.06.019](https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.06.019).
- Voß, S., Stahlbock, R. und Steenken, D. (2004). „Container terminal operation and operations research - a classification and literature review“. In: *Operations-Research-Spektrum* 26.1, S. 3–49. ISSN: 0171-6468. DOI: [10.1007/s00291-003-0157-z](https://doi.org/10.1007/s00291-003-0157-z).
- Wang, J.-J., Jing, Y.-Y., Zhang, C.-F. und Zhao, J.-H. (2009). „Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13.9, S. 2263–2278. ISSN: 13640321. DOI: [10.1016/j.rser.2009.06.021](https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.021).
- Wang, K., Zhen, L., Wang, S. und Laporte, G. (2018a). „Column Generation for the Integrated Berth Allocation, Quay Crane Assignment, and Yard Assignment Problem“. In: *Transportation Science* 52.4, S. 812–834. ISSN: 0041-1655. DOI: [10.1287/trsc.2018.0822](https://doi.org/10.1287/trsc.2018.0822).
- Wang, L., Liang, C., Shi, J., Molavi, A., Lim, G. und Zhang, Y. (2021). „A bilevel hybrid economic approach for optimal deployment of onshore power supply in maritime ports“. In: *Applied Energy* 292, S. 116892. ISSN: 03062619. DOI: [10.1016/j.apenergy.2021.116892](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116892).
- Wang, T., Wang, X. und Meng, Q. (2018b). „Joint berth allocation and quay crane assignment under different carbon taxation policies“. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 117, S. 18–36. ISSN: 01912615. DOI: [10.1016/j.trb.2018.08.012](https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.08.012).
- Wang, X. und Triantaphyllou, E. (2008). „Ranking irregularities when evaluating alternatives by using some ELECTRE methods“. In: *Omega* 36.1, S. 45–63. ISSN: 03050483. DOI: [10.1016/j.omega.2005.12.003](https://doi.org/10.1016/j.omega.2005.12.003).
- Wang, X., Yuen, K. F., Wong, Y. D. und Li, K. X. (2020). „How can the maritime industry meet Sustainable Development Goals? An analysis of sustainability reports from the social entrepreneurship perspective“. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 78, S. 102173. ISSN: 13619209. DOI: [10.1016/j.trd.2019.11.002](https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.11.002).
- Wang, Y.-M. und Elhag, T. M. (2006). „An approach to avoiding rank reversal in AHP“. In: *Decision Support Systems* 42.3, S. 1474–1480. ISSN: 01679236. DOI: [10.1016/j.dss.2005.12.002](https://doi.org/10.1016/j.dss.2005.12.002).
- Wang, Y.-M. und Luo, Y. (2009). „On rank reversal in decision analysis“. In: *Mathematical and Computer Modelling* 49.5-6, S. 1221–1229. ISSN: 08957177. DOI: [10.1016/j.mcm.2008.06.019](https://doi.org/10.1016/j.mcm.2008.06.019).
- Weber, M. und Borcherding, K. (1993). „Behavioral influences on weight judgments in multiattribute decision making“. In: *European Journal of Operational Research* 67.1, S. 1–12. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/0377-2217\(93\)90318-H](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90318-H).



- Wilmsmeier, G. und Spengler, T. (2016). *Energy consumption and container terminal efficiency*. Bd. 350. FAL Bulletin. Erscheinungsort nicht ermittelbar und S.L.: ECLAC. Online-Ressource.
- Winnes, H., Styhre, L. und Fridell, E. (2015). „Reducing GHG emissions from ships in port areas“. In: *Research in Transportation Business & Management* 17, S. 73–82. ISSN: 22105395. DOI: [10.1016/j.rtbm.2015.10.008](https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2015.10.008).
- Winterfeldt, D. von und Edwards, W. (1993). „Decision analysis and behavioral research“. In.
- Wolsey, L. A. (2014). *Integer and Combinatorial Optimization*. eng. Wiley Series in Discrete Mathematics and Optimization. Hoboken: Wiley. 783 S. ISBN: 0471359432. URL: <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1776322>.
- World Port Climate Initiative (2010). „Carbon Footprinting for Ports - Guidance Document“. In: URL: [https://sustainableworldports.org/wp-content/uploads/Carbon\\_Footprinting\\_Guidance\\_Document.pdf](https://sustainableworldports.org/wp-content/uploads/Carbon_Footprinting_Guidance_Document.pdf) (besucht am 21.06.2022).
- World Port Sustainability Program (2022). *World Port Sustainability Program*. URL: <https://sustainableworldports.org/> (besucht am 21.06.2022).
- World Port Sustainable Programm (2020). „World Ports Sustainability Report 2020“. In: URL: <https://sustainableworldports.org/wp-content/uploads/WORLD-PORTS-SUSTAINABILITY-REPORT-2020.pdf> (besucht am 07.06.2022).
- World Shipping Council (2015). *Global Container Fleet*. Archiviert von archive.ph. URL: <https://archive.ph/20150511184228/http://www.worldshipping.org/about-the-industry/containers/global-container-fleet> (besucht am 03.11.2021).
- Wu, Y., Wang, J., Hu, Y., Ke, Y. und Li, L. (2018). „An extended TODIM-PROMETHEE method for waste-to-energy plant site selection based on sustainability perspective“. In: *Energy* 156, S. 1–16. ISSN: 03605442. DOI: [10.1016/j.energy.2018.05.087](https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.087).
- Yang, R. und Li, Q. (2017). „Research on the system technology for automated container terminal“. In: *2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*. 2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC) (Chongqing, China). IEEE, S. 3463–3466. ISBN: 978-1-5090-4657-7. DOI: [10.1109/CCDC.2017.7979105](https://doi.org/10.1109/CCDC.2017.7979105).
- Yang, Y.-C. und Chang, W.-M. (2013). „Impacts of electric rubber-tired gantries on green port performance“. In: *Research in Transportation Business & Management* 8, S. 67–76. ISSN: 22105395. DOI: [10.1016/j.rtbm.2013.04.002](https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2013.04.002).
- Yu, J., Tang, G. und Song, X. (2022a). „Collaboration of vessel speed optimization with berth allocation and quay crane assignment considering vessel service differentiation“. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 160, S. 102651. ISSN: 13665545. DOI: [10.1016/j.tre.2022.102651](https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102651).
- Yu, J., Voß, S. und Song, X. (2022b). „Multi-objective optimization of daily use of shore side electricity integrated with quayside operation“. In: *Journal of Cleaner Production* 351, S. 131406. DOI: [10.1016/j.jclepro.2022.131406](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131406).
- Zanakis, S. H., Solomon, A., Wishart, N. und Dubliss, S. (1998). „Multi-attribute decision making: A simulation comparison of select methods“. In: *European Journal of Operational Research* 107.3, S. 507–529. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/S0377-2217\(97\)00147-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00147-1).
- Zavadskas, E. K. und Turskis, Z. (2011). „Multiple Criteria Decision Making (Mcdm) Methods In Economics: An Overview / Daugiatiksliai Sprendimų Priėmimo Metodai Ekonomikoje

- Apžvalga“. In: *Technological and Economic Development of Economy* 17.2, S. 397–427. ISSN: 2029-4913. DOI: [10.3846/20294913.2011.593291](https://doi.org/10.3846/20294913.2011.593291).
- Zehendner, E. und Feillet, D. (2014). „Benefits of a truck appointment system on the service quality of inland transport modes at a multimodal container terminal“. In: *European Journal of Operational Research* 235.2, S. 461–469. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/j.ejor.2013.07.005](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.07.005).
- Zhuang, Z., Zhang, Z., Teng, H., Qin, W. und Fang, H. (2022). „Optimization for integrated scheduling of intelligent handling equipment with bidirectional flows and limited buffers at automated container terminals“. In: *Computers & Operations Research* 145, S. 105863. ISSN: 03050548. DOI: [10.1016/j.cor.2022.105863](https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105863).
- Zimmermann, H.-J. und Gutsche, L. (1991). „Multi-Criteria-Entscheidungen“. In: *Multi-Criteria Analyse*. Hrsg. von H.-J. Zimmermann und L. Gutsche. Heidelberger Lehrtexte Wirtschaftswissenschaften. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 21–33. ISBN: 978-3-540-54483-8. DOI: [10.1007/978-3-642-58198-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-58198-4_3).
- abh INGENIEUR-TECHNIK GmbH (2021). „WASH2Emden : individueller Abschlussbericht“. de. In: *1686 - WASH2Emden*. DOI: [10.2314/KXP:1779759150](https://doi.org/10.2314/KXP:1779759150).
- becker marine systems (2022). *Becker LNG PowerPac - Becker Marine Systems*. URL: <https://www.becker-marine-systems.com/products/product-detail/becker-lng-powerpac.html> (besucht am 30.01.2022).
- van Zanten, J. A. und van Tulder, R. (2018). „Multinational enterprises and the Sustainable Development Goals: An institutional approach to corporate engagement“. In: *Journal of International Business Policy* 1.3-4, S. 208–233. ISSN: 2522-0691. DOI: [10.1057/s42214-018-0008-x](https://doi.org/10.1057/s42214-018-0008-x).
- van Zelm, R., Huijbregts, M. A., den Hollander, H. A., van Jaarsveld, H. A., Sauter, F. J., Struijs, J., van Wijnen, H. J. und van de Meent, D. (2008). „European characterization factors for human health damage of PM<sub>10</sub> and ozone in life cycle impact assessment“. In: *Atmospheric Environment* 42.3, S. 441–453. ISSN: 13522310. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2007.09.072](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.072).
- van der Waal, J. W. und Thijssens, T. (2020). „Corporate involvement in Sustainable Development Goals: Exploring the territory“. In: *Journal of Cleaner Production* 252, S. 119625. DOI: [10.1016/j.jclepro.2019.119625](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119625).

## VERÖFFENTLICHUNGEN

- Lemke, T. N., Pohl, E. und Scharpenberg, C. (2020). *Simulationsbasierte Bewertung von Maßnahmen zur Steigerung der Energienachhaltigkeit im Hafenerbetrieb (SustEnergyPort). Verbundabschlussbericht*. Hrsg. von Technische Informationsbibliothek Universitätsbibliothek Hannover. DOI: [10.2314/KXP:1732455287](https://doi.org/10.2314/KXP:1732455287).
- Pohl, E., Lauven, L.-P. und Geldermann, J. (2019). „An Exact Method for Cost-Minimal Deployment of a Rail Crane Using Demand Response“. In: *Operations Research Proceedings 2018*. Hrsg. von B. Fortz und M. Labbé. Bd. 29. Operations Research Proceedings. Cham: Springer International Publishing, S. 183–189. ISBN: 978-3-030-18499-5. DOI: [10.1007/978-3-030-18500-8\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-030-18500-8_24).
- Pohl, E., Schär, S. und Geldermann, J. (2022). „Bewertung von Kostensenkungspotenzialen in elektrisch betriebenen Containerterminals durch Einsatz von Demand Response“. In: *Transforming Mobility – What Next?* Hrsg. von H. Proff. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 563–581. ISBN: 978-3-658-36429-8. DOI: [10.1007/978-3-658-36430-4\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-658-36430-4_33).
- Pohl, E., Scharpenberg, C. und Geldermann, J. (2020a). „Assessment of Energy and Emission Reduction Measures in Container Terminals using PROMETHEE for Portfolio Selection“. In: *Operations Research Proceedings 2019*. Hrsg. von J. S. Neufeld, U. Buscher, R. Lasch, D. Möst und J. Schönberger. Operations Research Proceedings. Cham: Springer International Publishing, S. 141–147. ISBN: 978-3-030-48438-5. DOI: [10.1007/978-3-030-48439-2\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-48439-2_17).
- (2020b). *Simulationsbasierte Bewertung von Maßnahmen zur Steigerung der Energienachhaltigkeit im Hafenerbetrieb. Schlussbericht: Teilprojekt Universität Duisburg-Essen*. Hrsg. von Technische Informationsbibliothek Universitätsbibliothek Hannover. Universität Duisburg-Essen und HPC Hamburg-Port-Consulting GmbH. DOI: [10.2314/KXP:1732461341](https://doi.org/10.2314/KXP:1732461341).
- Scharpenberg, C., Pohl, E. und Geldermann, J. (2020). „Strategien zur Bewältigung der letzten Meile bei der Regionalvermarktung von Lebensmitteln“. In: *Neue Dimensionen der Mobilität*. Hrsg. von H. Proff. Wiesbaden: Springer Gabler, Wiesbaden, S. 641–652. ISBN: 978-3-658-29745-9. DOI: [10.1007/978-3-658-29746-6\\_51](https://doi.org/10.1007/978-3-658-29746-6_51).
- Scharpenberg, C., Pohl, E., Lauven, L.-P. und Geldermann, J. (2018). „Ecological assessment of port equipment for container terminals“. In: *Logistics 4.0 and Sustainable Supply Chain Management: Innovative Solutions for Logistics and Sustainable Supply Chain Management in the Context of Industry 4.0. Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL)*. Hrsg. von C. Jahn, W. Kersten und C. M. Ringle. 26. Aufl. epubli GmbH, Berlin, S. 3–20. ISBN: 978-3-7467-6536. DOI: [10.15480/882.1810](https://doi.org/10.15480/882.1810).



## VORTRÄGE AUF WISSENSCHAFTLICHEN FACHKONFERENZEN

1. Pohl, Erik; Geldermann, Jutta (2022):  
Multi-criteria portfolio selection for environmental decision-making using PROMETHEE – The case of the container terminal Tollerort, *26th International Conference on Multiple Criteria Decision Making*, Portsmouth, 2022.
2. Pohl, Erik; Schär, Sebastian; Geldermann, Jutta (2021):  
Bewertung von Kostensenkungspotenzialen in elektrisch betriebenen Containerterminals durch Einsatz von Demand Response, *Wissenschaftsforum Mobilität 2021*, Duisburg, 17.06.2021.
3. Pohl, Erik; Geldermann, Jutta (2021), (Posterpräsentation):  
Environmental project portfolio selection using multi criteria analysis, 743. *WE-Heraeus-Seminar on Process Integration*, Chemical and Thermal Energy Storage for the Energy Transformation, 22.03. - 24.03.2021.
4. Pohl, Erik; Geldermann, Jutta (2021):  
PROMETHEE-Cloud: A Web-based implementation of the outranking method PROMETHEE offering a wide range of sensitivity analysis and reporting options, *91st online meeting of the EURO Working Group in Multi Criteria Decision Aiding (EWG-MCDA)*, 29.04. - 30.04.2021.
5. Pohl, Erik; Geldermann, Jutta (2021):  
PROMETHEE-Cloud: A web-based implementation of the outranking method PROMETHEE, *31th European Conference on Operational Research*, Athen, 11.07. - 14.07. 2021.
6. Pohl, Erik; Scharpenberg, Cristina; Geldermann, Jutta (2019):  
Assessment of Energy and Emission Reduction Measures in Container Terminals using PROMETHEE for Portfolio Selection. *Jahrestagung der Gesellschaft für Operations Research 2019*. Dresden, 03.09 - 06.09.2019.
7. Pohl, Erik; Geldermann, Jutta (2019):  
Assessment of Energy and Emission Reducing Measures in Container Terminals Using PROMETHEE, *MCDM XXV 2019 Istanbul: The 25th international conference on multiple criteria decision making*, 16.06. - 21.06.2019.

# DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

*Offen im Denken*

ub | universitäts  
bibliothek

Diese Dissertation wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt und liegt auch als Print-Version vor.

**DOI:** 10.17185/duepublico/78742

**URN:** urn:nbn:de:hbz:465-20230803-145419-9

Alle Rechte vorbehalten.