

**Prospektive multikriterielle Entscheidungsunterstützung für die
Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen im
Wasser-Energie Nexus: Das Wasserdefizitproblem im Nahen Osten**

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
Sebastian Schär
aus Paderborn

Erstgutachterin: Prof. Dr. Jutta Geldermann
Lehrstuhl für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre
und Produktionsmanagement
Universität Duisburg-Essen

Zweitgutachter: Prof. Dr. Valentin Bertsch
Lehrstuhl Energiesysteme und Energiewirtschaft
Ruhr-Universität Bochum

Mitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Stefan Panglisch
Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik / Wassertechnik
Universität Duisburg-Essen

Einreichung der Dissertationsschrift: 13. Dezember 2023
Datum der Disputation: 28. Mai 2024
Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr. Sebastian Kaiser

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/82000

URN: urn:nbn:de:hbz:465-20240610-154647-7

Alle Rechte vorbehalten.

Abstract

Due to a combination of population growth, socio-economic development and the effects of climate change, arid and semi-arid regions such as the Middle East are increasingly exposed to water scarcity. In Palestine and Jordan, groundwater resources are already either depleted or severely overexploited, requiring immediate action to maintain water security and agricultural food production. One essential countermeasure is the deployment of additional seawater desalination plants and distribution infrastructure to convey the additional freshwater volumes to demand points in the region. Due to the quantity of water that has to be desalinated and transferred over large elevation differences, this is associated with a high energy demand, which is currently mainly fueled by the conversion of fossil primary energy. Thus, there are overlaps with energy-related infrastructure decisions and potential conflicts of interest in achieving sustainable development goals. The water-energy nexus approach aims to jointly plan the supply of water and energy, while taking into account undesirable interactions and exploiting synergies. Planning for the water-energy nexus is a complex problem, as many actors from different fields and disciplines are involved, including researchers, political decision-makers, various engineering disciplines and the civil society, and the decisions have long-term consequences. Moreover, since Jordan and Palestine have limited or shared access to the Red Sea or the Mediterranean Sea respectively, transnational infrastructure solutions are required, as is the balancing of heterogeneous political interests.

The methods of multiple criteria decision analysis stem from prescriptive decision theory and provide a set of methods for assessing alternative courses of action in the context of multiple, possibly conflicting, objectives. They are often used for decision problems in the water, energy and environmental management due to their comprehensibility, flexible preference modelling and nuanced presentation of results. To address the specificities of particularly complex decision problems, a number of more formalized methods for systematic problem structuring, so called problem structuring methods, are also available. However, there is currently no method that exploits the advantages of multi-criteria decision analysis and problem structuring methods for decision problems in the water-energy nexus, which are characterized by heterogeneous actors and long planning horizons.

In this dissertation, a method for the prospective multi-criteria evaluation of measures in the water-energy nexus is developed and implemented. The method is the first to fully take into account the requirements of a jointly planned water and energy supply. It is based on the PROMETHEE methods and furthermore allows for separate preference modelling of different stakeholder groups according to the framework of the Multi-Actor Multi-Criteria Analysis. This promotes their participation in the decision-making process and provides additional insights during the analysis. The prospective assessment considers multiple sources of uncertainty and examines the robustness of results by means of Monte Carlo simulations. Furthermore, it enables decision-makers to recognize critical developments in environmental boundary conditions at an early point in time and provides functionalities to evaluate and implement adaptations. In this thesis, the developed method is designed to address the problem of water scarcity in Israel, Jordan and Palestine, but can also be applied to other issues related to the water-energy nexus. It demonstrates how the process steps can be carried out to support the decisions of water and energy planners as well as policy makers at hand of the development and evaluation of five transboundary water infrastructure concepts in the Middle East.

Kurzfassung

Aride und semiaride Regionen, wie der Nahe Osten, sind durch ein Zusammenwirken aus Bevölkerungswachstum, sozioökonomischen Entwicklungen und den Folgen des Klimawandels zunehmend Wasserknappheit ausgesetzt. In Palästina und Jordanien sind Grundwasservorkommen bereits entweder erschöpft oder stark übernutzt, so dass zeitnah Maßnahmen erforderlich sind, um die Wasserversorgung und landwirtschaftliche Nahrungsmittelproduktion aufrecht zu erhalten. Eine essentielle Maßnahme ist die Errichtung zusätzlicher Anlagen zur Meerwasserentsalzung und die anschließende Verteilung des auf diese Weise gewonnenen Süßwassers an Bedarfspunkte in der Region. Dies ist aufgrund der Menge des zu entsalzenden und über große Höhendifferenzen zu fördernden Wassers jedoch mit einem hohen Energiebedarf verbunden, welcher in der Region vorrangig durch Umwandlung fossiler Primärenergie gedeckt wird. Somit ergeben sich Überschneidungen mit energiewirtschaftlichen Infrastrukturentscheidungen und potentielle Zielkonflikte bei der Erreichung von Zielen nachhaltiger Entwicklung. Im Ansatz des Wasser-Energie Nexus werden daher die Wasser- und Energieversorgung unter Berücksichtigung unerwünschter Wechselwirkungen und unter Nutzung möglicher Synergiepotenziale integriert geplant. Die Entwicklung von Maßnahmen im Wasser-Energie Nexus ist deshalb ein komplexes Planungsproblem, weil viele Akteure aus unterschiedlichen Bereichen und Disziplinen beteiligt sind, wie z. B. Forschende, politische Entscheider, verschiedene Ingenieurdisziplinen oder die Zivilgesellschaft, und die zu treffenden Entscheidungen langfristige Konsequenzen haben. Da Jordanien und Palästina nur unzureichenden bzw. geteilten Zugang zu potenziellen Salzwasserquellen am Roten Meer und am Mittelmeer haben, sind zudem transnationale Infrastrukturlösungen und die Harmonisierung heterogener politischer Interessen erforderlich.

Als Teilgebiet der Entscheidungstheorie bietet die multikriterielle Entscheidungsanalyse eine Reihe von Verfahren zur Bewertung von Handlungsmaßnahmen unter mehreren, möglicherweise konfligierenden Zielen. Aufgrund ihrer guten Nachvollziehbarkeit, flexiblen Präferenzmodellierung und differenzierten Ergebnisdarstellung werden sie häufig für Entscheidungsprobleme in den Bereichen Wasser, Energie und Umwelt eingesetzt. Um den Spezifika besonders komplexer Entscheidungsprobleme gerecht zu werden, stehen darüber hinaus formalisierte Methoden zur systematischen Problemstrukturierung bereit. Bisher gibt es jedoch kein Verfahren, das die Vorteile der multikriteriellen Entscheidungsanalyse und problemstrukturierender Methoden für Entscheidungsprobleme mit heterogenen Akteuren und langfristigem Planungshorizont im Wasser-Energie Nexus nutzt.

In dieser Arbeit wird ein Verfahren zur prospektiven multikriteriellen Bewertung von Handlungsmaßnahmen im Wasser-Energie Nexus entwickelt und implementiert, welches die Anforderungen an eine gemeinsam geplante Wasser- und Energieversorgung erstmals gänzlich berücksichtigt. Es basiert auf dem Vorgehen der Multi-Actor Multi-Criteria Analysis mit PROMETHEE als Aggregationsmethode. Dies ermöglicht eine separate Präferenzmodellierung der verschiedenen Interessensgruppen, was deren Teilhabe am Entscheidungsprozess fördert und zusätzliche Erkenntnisse bei der Analyse schafft. Die prospektive Bewertung berücksichtigt Unsicherheiten aus verschiedenen Quellen und untersucht die Robustheit der Ergebnisse mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen. Zudem erlaubt sie Entscheidungstragenden, kritische Entwicklungen in den Umweltbedingungen frühzeitig zu erkennen und Adaptationsmöglichkeiten zu bewerten und umzusetzen. Das Verfahren ist zugeschnitten auf das Wasserdefizitproblem in Israel, Jordanien und Palästina, aber auch auf andere Fragestellungen des Wasser-Energie Nexus anwendbar. Anhand der Entwicklung und Bewertung von fünf grenzüberschreitenden

Wasserinfrastrukturkonzepten im Nahen Osten wird gezeigt, wie die Phasen des Verfahrens fallspezifisch ausgestaltet werden können, um Entscheidungen von Wasser- und Energieplanern sowie politischen Entscheidern zu unterstützen.

Acknowledgements

This dissertation was conducted at the Chair of Business Administration and Production Management of Prof. Dr. Jutta Geldermann at the University of Duisburg-Essen. In large parts, it stems from our activities within the SALAM Initiative, which was funded by the German Federal Ministry for Education and Research. I am grateful for the knowledge, experience and opportunities this constellation has granted me. In particular, I want to thank Prof. Dr. Martin Sauter, Dr.-Ing. Bernd Rusteberg and Philippe de Bourgoing who safely coordinated the project around any obstacle the consortium encountered during the years from 2020–2022 and always provided a platform for enriching and productive conversation. Without their selfless efforts, this dissertation would not have been possible in the form in which it stands today. Furthermore, I want to thank all partners involved in the SALAM Initiative for the pleasant and inspiring discussions during our regular formal and informal meetings. Daniel Janowitz, Dr. Julian Xanke, Dr.-Ing. Ganbaatar Khurelbaatar, Martin Klein, but also all the other project partners who patiently endured my data requests and made it seem that our in-person meetings in Jordan and Dubai were much too short and far too infrequent. Dr. Emad Al-Karablieh, Dr. Jacob Bensabat and Dr. Muath Abu Sadah for sharing their knowledge and unlocking doors in the Middle East to conduct research and preference elicitation. Philipp Nußbaum and Tomy-Minh Trùng for capturing a wonderful road trip through Jordan on film and in my mind, while Philippe de Bourgoing also demonstrated his excellent project management skills in negotiations with the Petra ticket office.

Beyond this project, and to an unquantifiable amount, this dissertation is founded on the continued support and guidance of my supervisor, Prof. Dr. Jutta Geldermann. She always encouraged me to keep pursuing my ideas and provided reassurance during the most intense period of conducting this work.

Yet, there are more people I would like to thank for their support along the way. Dr. Judit Lienert and the Decision Analysis Cluster at Eawag for hosting me and offering so much valuable insight and exchange on multi-criteria decision analysis in environmental planning. The time in Dübendorf sharpened my understanding of what scientific rigour means. Dr. He Huang and Prof. Dr. Cathy Macharis for the hospitality at the Vrije Universiteit Brussel and the collaboration endeavours we have realized so far. Prof. Dr. Umberto Desideri, Dr. Aldo Bischì and Dr. Andrea Baccioli of the Università di Pisa, who proved to be just as good scientific colleagues as hosts.

Last, but by no means least, I thank my good-humoured fellow PhD students (or already PhDs) Christina Wüstefeld, Dr. Erik Pohl, Isabel Wiemer, Dr. Marcel Dumeier, Leon Zacharopoulos and Alicia Benitez. They provided technical expertise, constructive feedback or relief when needed and made the past years in Duisburg even more enjoyable. Also thanks to Dr. Tobias Witt for engaging my journey into Multiple Criteria Decision Analysis way back in 2017. In addition, there are so many people who made my time at the Georg-August University Göttingen, and the University of Duisburg-Essen so much better and whom I have not mentioned by name as the end of this page is approaching. Please feel addressed and embraced.

Thank you

Sebastian Schär

Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	III
Kurzfassung.....	V
Acknowledgements.....	VII
Abbildungsverzeichnis.....	XI
Tabellenverzeichnis.....	XIII
Abkürzungsverzeichnis.....	XV
Symbolverzeichnis.....	XVII
1 Einleitung und Problemstellung.....	1
1.1 Das Wasserdefizitproblem im Nahen Osten.....	2
1.2 Zielsetzung.....	4
1.3 Lösungsweg.....	5
2 Der Wasser-Energie Nexus als Leitbild für ein nachhaltiges Ressourcenmanagement.....	7
2.1 Ziele für nachhaltige Entwicklung.....	7
2.2 Chronologie des WEN als entwicklungspolitisches Leitbild.....	13
2.3 Charakterisierung, Abgrenzung und Begriffsdefinition.....	14
2.4 Intersektorale Beziehungen bei wasserwirtschaftlichen Entscheidungen.....	17
2.5 Intersektorale Beziehungen bei energiewirtschaftlichen Entscheidungen.....	20
2.6 Zusammenfassung.....	23
3 MCDA und problemstrukturierende Methoden.....	25
3.1 Einordnung der MCDA in die Entscheidungstheorie.....	26
3.2 Definition, Charakterisierung und Abgrenzung von MCDA Verfahren.....	27
3.3 Der strukturierte Ablauf und Taxonomie von MCDA Verfahren.....	32
3.3.1 Identifikation des Entscheidungsproblems.....	33
3.3.2 Problemstrukturierung.....	33
3.3.3 Anwendung einer MCDA Methode.....	40
3.4 Kombination von MCDA Verfahren und PSM.....	62
3.4.1 Problemstrukturierende Methoden.....	62
3.4.2 Kombinationsmöglichkeiten.....	63
3.4.3 Nutzen ausgewählter PSM für MCDA Verfahren.....	64
3.5 Methodische Einbindung verschiedener Interessensgruppen in Entscheidungsprozesse.....	68
3.5.1 Die Multi-Actor Multi-Criteria Analysis.....	71
3.5.2 Die Multi-Actor Multi-Criteria Analysis mit PROMETHEE.....	72
3.6 Zusammenfassung.....	75
4 MCDA Verfahren im Wasser-Energie Nexus.....	77
4.1 Anforderungen an MCDA Verfahren im WEN.....	78
4.2 Stand der Forschung zu MCDA Verfahren im WEN.....	80
4.2.1 Vorgehen der Literaturstudie.....	81
4.2.2 Stand der Forschung und bestehende Limitationen.....	83

4.3 Vorgehen für die Entwicklung und prospektive Bewertung von Handlungsalternativen im WEN mittels PROMETHEE.....	98
4.3.1 Ermittlung des Entscheidungskontextes und intersektoraler Beziehungen des WEN	100
4.3.2 Berücksichtigung von Unsicherheiten und Pfadabhängigkeiten.....	100
4.3.3 Explizite Einbindung verschiedener Interessensgruppen.....	103
4.3.4 Prospektive Analyse mittels MAMCA-PROMETHEE	103
4.4 Zusammenfassung.....	105
5 Entwicklung und prospektive Bewertung von WEN Maßnahmen im Nahen Osten	107
5.1 Die SALAM-Initiative.....	108
5.2 Problemstrukturierung	109
5.2.1 Entscheidungskontext und beteiligte Interessensgruppen	110
5.2.2 Zielermittlung und Erstellung von Kriterienhierarchien	114
5.2.3 Entwicklung von Handlungsmaßnahmen	123
5.2.4 Bestimmung der Kriterienausprägungen	133
5.3 Modellbildung nach MAMCA und Aggregation mittels PROMETHEE	137
5.3.1 Präferenzenerhebung	137
5.3.2 Aggregation und Visualisierung	140
5.4 Prospektive Analyse	150
5.4.1 Sensitivitäts- und Robustheitsanalysen	150
5.4.2 Erstellung eines prospektiven Handlungsplans.....	158
5.5 Zusammenfassung.....	164
6 Diskussion und Ausblick	165
6.1 Zusammenfassung.....	165
6.2 Beantwortung der Forschungsfragen.....	167
6.3 Schlussfolgerungen und weiterer Forschungsbedarf	169
Anhang A	175
Anhang B.....	184
Anhang C	187
Literatur.....	189
Veröffentlichungen	218
Vorträge auf wissenschaftlichen Fachkonferenzen.....	219

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Betrachtete Region und Höhenprofil; Höhendaten referenziert nach EGM96.....	2
Abbildung 2.1: Sustainable Development Goals und dreidimensionales Nachhaltigkeitskonzept	9
Abbildung 2.2: Verknüpfungen zwischen den Planungsansätzen im IWRM und im WEN.....	16
Abbildung 2.3: Technische Aufgaben der Wasserwirtschaft und Ressourcenströme	18
Abbildung 2.4: Energiewirtschaftliche Wertschöpfungskette und Auswirkungen auf Wasserressourcen	20
Abbildung 3.1: Charakteristika wesentlicher Verfahrensklassen der MCDA	29
Abbildung 3.2: Ablaufschema der MCDA	32
Abbildung 3.3: Strukturierte Ermittlung des Zielsystems und Aufstellung einer Kriterienhierarchie .	35
Abbildung 3.4: Einzelwertfunktionen mit linearem Verlauf	43
Abbildung 3.5: Beispielhafter Prozess des AHP und Visualisierung der verbal-numerischen Bewertungsskala	51
Abbildung 3.6: Beispiel einer partiellen Präordnung nach PROMETHEE I	55
Abbildung 3.7: Visualisierung des Nettoflussbeitrags je Kriterium	57
Abbildung 3.8: GAIA-Ebene in PROMETHEE	58
Abbildung 3.9: Beispiele für Sensitivitätsanalysen von Kriteriengewichten in MCDA Verfahren	61
Abbildung 3.10: Ablaufschema der Multi-Actor Multi-Criteria Analysis	72
Abbildung 4.1: Vorgehen der Literatursuche.....	82
Abbildung 4.2: Ergebnisse der Suchabfrage (Stufe 1)	83
Abbildung 4.3: Weboberflächen des CLEW Modells und DTI nexus tools	88
Abbildung 4.4: Ablaufschema des MCDA Verfahrens für die Entwicklung und prospektive Bewertung von Handlungsalternativen im WEN mittels PROMETHEE.....	99
Abbildung 4.5: Vorgehen der Szenarioplanung	101
Abbildung 5.1: Struktur des Fallbeispiels.....	107
Abbildung 5.2: Ursache-Wirkungs-Diagramm des Entscheidungsproblems	113
Abbildung 5.3: Kriterienhierarchie Meerwasserentsalzung am Mittelmeer und am Roten Meer.....	116
Abbildung 5.4: Externe Szenarien des Fallbeispiels	124
Abbildung 5.5: Visualisierung der grenzüberschreitenden Wasserinfrastrukturalternativen.....	132
Abbildung 5.6: Berechnungsschema spezifische Wasserkosten, Alternative WPTO 2.....	134
Abbildung 5.7: Erläuterung Alternative WPTO in der Online Befragung.....	136
Abbildung 5.8: Online-Befragung zur Erhebung der Kriteriengewichte	138
Abbildung 5.9: Ergebnisse der Bewertung nach PROMETHEE II – Nettoflüsse je Akteur.....	145

Abbildung 5.10: Nettoflussbeiträge Akteur S ₂ (Jordanien) - Szenario ζ ₂	146
Abbildung 5.11: Nettoflussbeiträge Akteur S ₃ (Palästina) – Szenario ζ ₃	147
Abbildung 5.12: Aggregation nach PROMETHEE I für jedes Szenario und jeden Akteur	149
Abbildung 5.13: Stabilitätsintervalle der Kriteriengewichte je Akteur – Szenario ζ ₁	151
Abbildung 5.14: Insensitivitätsintervall für das Kriterium "Spezifische Wasserkosten" – Szenario ζ ₁	152
Abbildung 5.15: Insensitivitätsintervalle für die umweltbezogenen Kriterien der Akteure S ₂ und S ₃ – Szenario ζ ₁	153
Abbildung 5.16: Gegenüberstellung Nettoflüsse je Akteur und spezifische Wasserkosten	154
Abbildung 5.17: Bewertung nach MAMCA-PROMETHEE mit veränderten Kriterienausprägungen	156
Abbildung 5.18: Extremranganalyse der WPTO mit veränderten Kriterienausprägungen	158
Abbildung C.1: Bewertung nach MAMCA-PROMETHEE mit veränderten Kriteriengewichten	187

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Unterziele und Indikatoren für SDG 6 und SDG 7	11
Tabelle 2.2: Spezifische Energiebedarfe für verschiedene Prozesse des Wassersektors.....	19
Tabelle 2.3: Zentrale Verzahnungen der Energiewirtschaft mit dem Wassersektor.....	22
Tabelle 3.1: Klassifizierung von MCDA Verfahren und Methodenbeispiele	31
Tabelle 3.2: Entscheidungstabelle eines endlichen Entscheidungsproblems in allgemeiner Form	39
Tabelle 3.3: Generische Präferenzfunktionen in PROMETHEE.....	45
Tabelle 3.4: Möglichkeiten zur Kombination von PSM und MCDA.....	64
Tabelle 3.5: Ausgewählte PSM und Kombinationsmöglichkeiten innerhalb einer MCDA.....	65
Tabelle 3.6: Motive zur Anwendung von MCDA Verfahren in Gruppenentscheidungen.....	70
Tabelle 4.1: Aufschlüsselung der in den Publikationen verwendeten Methoden.....	84
Tabelle 4.2: Spezifische Fähigkeiten der im WEN verwendeter Methoden.....	86
Tabelle 4.3: Methodische Instrumente zur Entscheidungsunterstützung im WEN	90
Tabelle 4.4: Für den WEN angewandten MCDA Verfahren und Limitationen	97
Tabelle 4.5: Allgemeine Form einer Strategietabelle	102
Tabelle 5.1: Übersicht der beteiligten Interessensgruppen und Experten.....	111
Tabelle 5.2: Interaktionsformen zur Einbindung von Interessensgruppen in die MCDA	112
Tabelle 5.3: Erstellte Kriterienhierarchien und einbezogene Akteure	114
Tabelle 5.4: Beschreibung der Kriterien für die Meerwasserentsalzung	117
Tabelle 5.5: Kriterien für grenzüberschreitende Wasserbewirtschaftungsinfrastruktur.....	118
Tabelle 5.6: Abwasserbewirtschaftungskonzepte für Jordanien und das Westjordanland	120
Tabelle 5.7: Annahmen und Datengrundlagen zur Erstellung der externen Szenarien.....	127
Tabelle 5.8: Strategietabelle für das Fallbeispiel, transponierte Darstellung	128
Tabelle 5.9: Alternativen zur Abwasserbewirtschaftung in Jordanien und dem Westjordanland	130
Tabelle 5.10: Alternativen für eine grenzüberschreitende Wasserbewirtschaftungsinfrastruktur	131
Tabelle 5.11: Strommix Jordanien 2019 und GHG-Emissionen	135
Tabelle 5.12: WPTO - Durchschnittliche Kriteriengewichtung der Akteure	139
Tabelle 5.13: Präferenzfunktionen und Parameter der Akteure - Referenzszenario	140
Tabelle 5.14: Entscheidungstabelle WPTO – Szenario ζ_1	142
Tabelle 5.15: Entscheidungstabelle WPTO – Szenario ζ_2	143
Tabelle 5.16: Entscheidungstabelle WPTO – Szenario ζ_3	144
Tabelle 5.17: Bewertung der Alternativen über alle Akteure anhand des MAMCA Nettoflusses	145

Tabelle 5.18: Jährliche Süßwasserdefizite in den Bedarfsgebieten im Westjordanland und Jordanien in Millionen m ³ pro Jahr [MCM/a]	163
Tabelle A.1: Publikationen zur Entscheidungsfindung im Bereich des WEN im weiteren Sinne	175
Tabelle A.2: Publikationen zu multikriteriellen Entscheidungsunterstützungsverfahren im WEN	183
Tabelle B.1: Alternativen zur MWE am Mittelmeer und am Roten Meer (fortlaufend).....	184
Tabelle B.2: Übersicht der befragten Personen zur Erhebung von Kriterienausprägungen	186

Abkürzungsverzeichnis

AHP	Analytischer Hierarchieprozess, engl. Analytic Hierarchy Process
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
CLD	Ursache-Wirkungs-Diagramm, engl. causal-loop diagram
CLEW	Climate, Land-use, Energy and Water systems
CM	Kognitive Abbildung, engl. cognitive map
DPSIR	Driving forces, Pressures, States, Impacts, Responses
DTI	Diagnostic, Financial, and Institutional Tool for Investment
ELECTRE	Élimination et Choix Traduisant la REalité, engl. Elimination and Choice Translating Reality
FAO	Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen, engl. Food and Agriculture Organization of the United Nations
GAIA	Geometrical Analysis for Interactive Aid
GCM	Globalkriteriumoptimierung, engl. Global Criterion Method
GIS	Geographisches Informationssystem, engl. Geographic Information System
IAEG-SDGs	Expertengruppe der Vereinten Nationen für Ziele nachhaltiger Entwicklung, engl. Inter-Agency and Expert Group on SDG Indicators
IEA	Internationale Energieagentur, engl. International Energy Agency
IWRM	Integriertes Wasserressourcenmanagement, engl. Integrated Water Resources Management
LCA	Ökobilanzierung, engl. life cycle assessment
lcd	Liter pro Person und Tag, engl. liters per capita per day
MADM	Multi-Attribut Verfahren, engl. Multiple Attribute Decision Making
MAMCA	Multi-Actor Multi-Criteria Analysis
MAUT	Multiple Attribute Utility Theory
MAVT	Multiple Attribute Value Theory
MCDA	Multikriterielle Entscheidungsunterstützung, engl. Multiple Criteria Decision Analysis
MILP	Gemischt-ganzzahlige Lineare Programmierung, engl. Mixed Integer Linear Programming
MODM	Multiple Objective Decision Making
MWE	Meerwasserentsalzung, engl. seawater desalination
NGO	Nichtregierungsorganisation, engl. non-governmental organization

NLP	Nicht-lineare Programmierung, engl. Nonlinear Programming
OR	Operations Research
PROMETHEE	Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations
PSM	Problemstrukturierende Methoden, engl. Problem Structuring Methods
SAST	Strategic Assumptions Surfacing and Testing
SAW	Simple Additive Weighting
SD	Systemdynamik, engl. system dynamics
SDGs	Ziele für nachhaltige Entwicklung, engl. Sustainable Development Goals
SGT	Strategietabelle, engl. strategy generation table
SMAA	stochastische Mehrziel-Akzeptanzanalyse, engl. Stochastic Multiobjective Acceptability Analysis
SMART	Simple Multi-Attribute Rating Technique
SODA	Strategic Options Development and Analysis
tds	total dissolved solids
UN	Vereinte Nationen, engl. United Nations
UN DESA	Hauptabteilung Wirtschaftliche und Soziale Angelegenheiten der Vereinten Nationen, engl. United Nations Department of Economic and Social Affairs
UN ESCAP	Wirtschafts- und Sozialkommission für Asien und den Pazifik der Vereinten Nationen, engl. United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific
UNCED	Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung, engl. United Nations Conference on Environment and Development
UNCSD	Konferenz der Vereinten Nationen über nachhaltige Entwicklung engl. United Nations Conference on Sustainable Development
UNU	Universität der Vereinten Nationen, engl. United Nations University
UTA	Utilité Additive
WCED	Weltkommission für Umwelt und Entwicklung, engl. World Commission on Environment and Development
WEAP	Water Evaluation and Planning tool
WEF	Weltwirtschaftsforum, engl. World Economic Forum
WEN	Wasser-Energie Nexus, engl. water-energy nexus
WPTO	grenzüberschreitende Wasserbewirtschaftungsinfrastruktur, engl. water production and transfer options
WWT	Abwasserbewirtschaftung, engl. wastewater treatment

Symbolverzeichnis

a_i	Alternative mit Index i
A	Diskrete Menge von Alternativen
C	Konkordanz Index
d_j	Unterschied in Kriterienausprägungen zweier Alternativen hinsichtlich eines Kriteriums j
D	Diskordanz Index
g_j	Kriterium mit Index j
$g_j(a_i)$	Kriterienausprägung von Alternative i hinsichtlich Kriterium j
$[g_j^{min}, g_j^{max}]$	Bandbreite der Kriterienausprägungen
G	Diskrete Menge von Kriterien
l	Anzahl Akteure in S
m	Anzahl Alternativen in A
n	Anzahl Kriterien in G
p_j	Präferenzschwellenwert hinsichtlich Kriterium j
P_j	Präferenzindikator hinsichtlich Kriterium j
q_j	Indifferenzschwellenwert hinsichtlich Kriterium j
Q	Outranking-Relation
$r(j)$	Ordinaler Rang von Kriterium j
R	Binäre Ordnungsrelation
s_s	Akteur mit Index s
S	Menge der Akteure
u	Gesamtnutzenfunktion
u'	Ungewichtete Gesamtnutzenfunktion
$u(a_i)$	Nutzen von Alternative i
$v(a_i)$	Nutzwert von Alternative i
V	Gesamtwertfunktion einer Alternative hinsichtlich aller Kriterien
w_j	Gewichtung des Kriteriums j
W	Vektor der Kriteriengewichte
z	Verhältnissfaktor für Simos' Methode
δ	Relativer Informationserhalt in der Projektion einer GAIA-Ebene
ϵ	Fehlerterm

ζ	Szenario
π	Präferenzindex
σ_j	Wendepunkt der Präferenz hinsichtlich Kriterium j
$\phi^+(a_i)$	PROMETHEE Ausgangsfluss; Maß für die relative Stärke von Alternative i
$\phi^-(a_i)$	PROMETHEE Eingangsfluss; Maß für die relative Schwäche von Alternative i
$\phi^{net}(a_i)$	PROMETHEE Nettofluss von Alternative i
$\phi_j^{net}(a_i)$	Nettoflussbeitrag eines Kriteriums j
ω^s	Gewichtungsfaktor Akteurs s

1 Einleitung und Problemstellung

Wasser und Energie sind unverzichtbare Ressourcen für das menschliche Wohlergehen und das Funktionieren moderner Gesellschaften. Ein zuverlässiger Zugang zu sauberem Wasser und zu Energie ist für die Entwicklung in allen Sektoren, von der Landwirtschaft und dem Verkehr bis hin zur öffentlichen Infrastruktur, dem Gesundheitswesen und der Bildung, von entscheidender Bedeutung. Trotz der Fortschritte in den letzten Jahrzehnten steht die Weltgemeinschaft weiterhin vor der Herausforderung, allen Menschen weltweit Zugang zu diesen Lebensgrundlagen zu verschaffen und diesen langfristig zu erhalten.

Bis zum Jahr 2020 hatte ca. ein Viertel der Weltbevölkerung keinen Zugang zu sicherer Trinkwasserversorgung und 46 % keinen gesicherten Zugang zu Sanitäreinrichtungen mit angemessener hygienischer Qualität (UN 2023e). In Bezug auf den Energiesektor hatten bis zum Jahr 2021 noch 675 Millionen Menschen (rund 9 % der Weltbevölkerung) keinen Zugang zu Elektrizität und fast 30 % keinen Zugang zu effizienten und schadstoffarmen Kocheinrichtungen (WHO 2023). Trotz einiger Fortschritte deuten die jüngsten Daten darauf hin, dass die Ziele für nachhaltige Entwicklung in den Bereichen Wasser und Energie, die im Rahmen der Agenda 2030 von den Vereinten Nationen vereinbart wurden, in Gefahr sind und eine Intensivierung der Anstrengungen notwendig ist (UN 2023d). Darüber hinaus variieren die Fortschritte regional. Während in einigen Ländern erhebliche Fortschritte zu beobachten sind, entwickeln sich andere Regionen langsamer oder sogar rückläufig. Neben dem Klimawandel zählen Wasser- und Energieressourcenkrisen hinsichtlich ihrer Wahrscheinlichkeit und ihrer Auswirkungen damit weiterhin zu den größten gesellschaftlichen Risiken der Gegenwart (WEF 2023). Gleichzeitig gefährden der voranschreitende Klimawandel und das volkswirtschaftliche Wachstum, welches mit einer insgesamt wachsenden Mittelschicht mit veränderten Lebens- und Ernährungsgewohnheiten einhergeht, die Versorgungssicherheit von Wasser und Energie zunehmend (UN DESA 2011). So wird erwartet, dass bis zum Jahr 2030 zusätzlich drei Milliarden Menschen in die globale Einkommensmittelschicht aufsteigen werden und sich daher der weltweite Wasser- und Energiebedarf erhöht, während die Folgen des Klimawandels Vulnerabilitäten in wasserwirtschaftlichen Versorgungssystemen verstärken und eine Umstrukturierung und Dekarbonisierung von Energiesystemen erfordern (WWF 2014).

In Anbetracht der gefährdeten Versorgungssicherheit gewinnt die Interdependenz der Wasser- und Energieversorgung zunehmend an Bedeutung bei der Gestaltung von Prozessen zur Ressourcengewinnung, der Technologieauswahl und Gestaltung von Versorgungsnetzen. Viele energiewirtschaftliche Prozesse erfordern den Einsatz von Wasser oder haben unmittelbare Auswirkungen auf lokale Wasserressourcen, während wasserwirtschaftliche Versorgungsprozesse teils sehr energieintensiv sind (Hamiche et al. 2016). So wird Wasser für die Bereitstellung elektrischer Energie aus Wasserkraft, die Kühlung von Wärmekraftwerken oder für die Gewinnung fossiler Brennstoffe benötigt, während Energie bei der Wasseraufbereitung und -förderung erforderlich ist (Foran 2015; Bauer et al. 2014). Integriertes Ressourcenmanagement ist daher eine Schlüsselkomponente zur Bewältigung der Herausforderungen im Zusammenhang mit der nachhaltigen Bewirtschaftung von Wasserressourcen, dem Schutz natürlicher Ökosysteme und dem nachhaltigen Zugang zu Wasser und Energie (UNECE 2018). Der Wasser-Energie Nexus (engl. water-energy nexus, WEN) bezeichnet diese wechselseitigen Beziehungen zwischen Prozessen zur Bereitstellung von Wasser und Energie. Die Analyse sektorübergreifender Ursache-Wirkungs-Beziehungen ermöglicht Entscheidungen die zu einer nachhaltigeren und effizienteren Nutzung beider Ressourcen führen. Anhand der Wasserdefizitproblematik im Nahen Osten werden zentrale Fragestellungen des WEN für Entscheidungstragende deutlich.

1.1 Das Wasserdefizitproblem im Nahen Osten

Viele Länder in der Region des Nahen Ostens haben nur begrenzten Zugang zu zunehmend erschöpften Süßwasserquellen und sind Wasserstress¹ ausgesetzt (Rusteberg et al. 2022a). Die Region ist durch ein semi-arides Klima und eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität der verfügbaren Wasserressourcen gekennzeichnet. Die zeitlichen Verläufe des Wasserdargebots und des Wasserverbrauchs sind zudem asynchron; die Zeiten des höchsten Wasserbedarfs fallen mit den Zeiten der geringsten Wasserverfügbarkeit zusammen, was zu Versorgungsgespässen führt (De Bourgoing et al. 2022a).

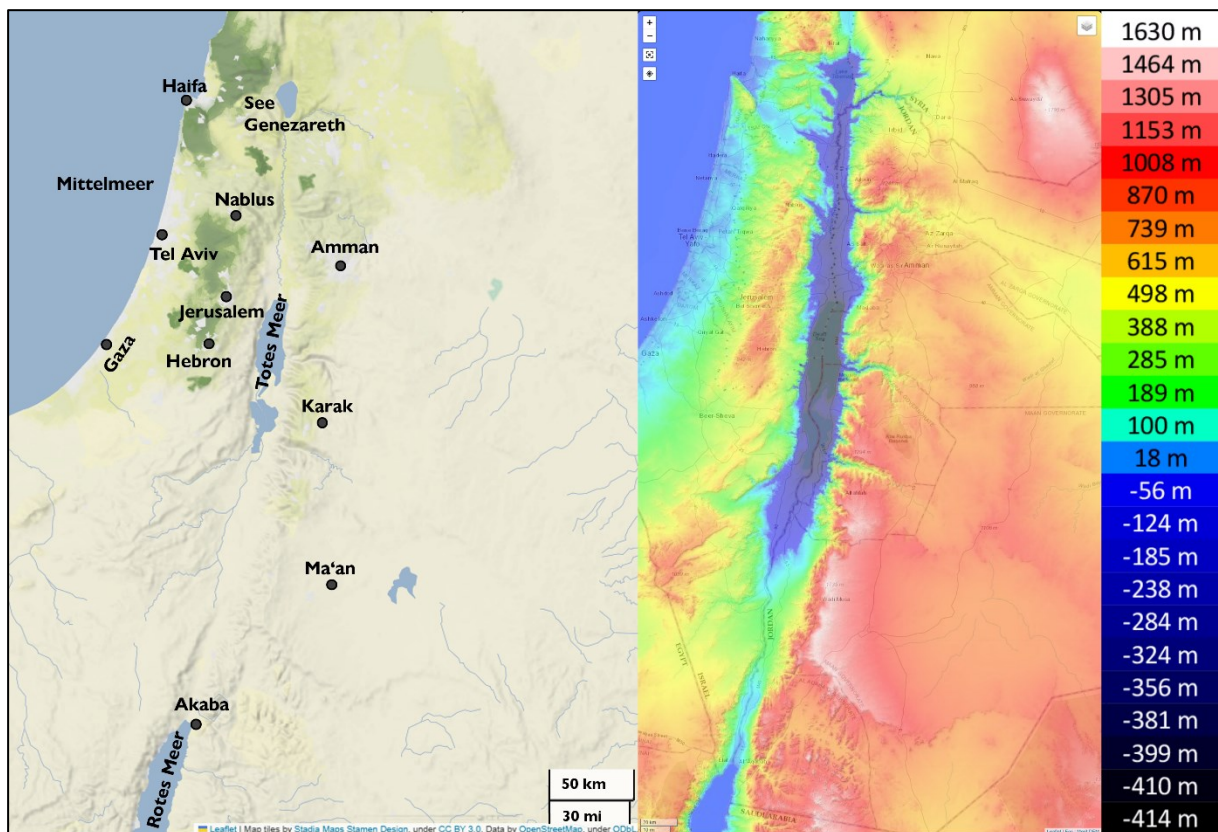


Abbildung 1.1: Betrachtete Region und Höhenprofil; Höhendaten referenziert nach EGM96²

Quelle: Eigene Darstellung; topographic-map.com (2023) mit Höhendaten nach Yamazaki et al. (2017)

In Jordanien, Israel und den palästinensischen Gebieten des Westjordanlandes und des Gazastreifens führt das semi-aride Klima zu geringen Niederschlagsmengen und einem begrenzten Oberflächenwasserangebot (Whitman 2019). Zudem wird vielerorts in zu hohem Maße Wasser aus unterirdischen Grundwasserleitern entnommen, so dass diese sich nicht regenerieren können und zunehmend erschöpfen (Droogers et al. 2012). Verschärft wird die Situation durch die steigende Nachfrage nach Süßwasser aufgrund des Bevölkerungswachstums, der zunehmenden Verstädterung und des steigenden industriellen Wasserbedarfs, der mit der wirtschaftlichen Entwicklung einhergeht (Salameh et al. 2018).

¹ Indikator für mögliche Schädigung natürlicher Wasserressourcen aufgrund von übermäßiger Nutzung. Liegt die Wassernutzung innerhalb einer bestimmten Periode bei über 20 % des Wasserdargebots, wird von Wasserstress gesprochen (UN CSD 1997).

² Das Earth Gravitational Model 1996 (EGM96) ist ein mathematisches Modell, das die Schwerkraft der Erde in Form eines globalen Gravitationsfelds beschreibt und als internationale Referenz für die Bestimmung von Höhen und Positionsdaten auf der Erdoberfläche dient (Lemoine et al. 1998).

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wurden bereits eine Reihe von Maßnahmen zur Erhöhung des verfügbaren Süßwasserdargebots und zur nachhaltigeren Nutzung der Ressource Wasser umgesetzt (Sowers et al. 2011). So investiert Israel seit Ende der 1990er Jahre in groß angelegte Projekte zur Meerwasserentsalzung (MWE) und technische Systeme zur Abwasseraufbereitung (March 2015).

Auch in Palästina und Jordanien gibt es Maßnahmen zur effizienten Nutzung lokaler Wasserressourcen, welche jedoch nicht genügen, um langfristig die Versorgungssicherheit zu gewährleisten (Whitman 2019). Die lebenswichtigen Grundwasservorkommen sind stark übernutzt und teils nahezu erschöpft oder in ihrer Qualität durch Versalzung beeinträchtigt (De Bourgoing et al. 2022a). So erstreckt sich entlang des Jordantals, einer für die Landwirtschaft wichtigen Region Jordaniens, eine Zone mit stark versalztem Grundwasser, die sich in erheblichem Maße negativ auf die Fruchtbarkeit der Böden und die Qualität der angebauten Nahrungsmittel auswirkt (Waitzbauer und Petutschnig 2004). Darüber hinaus können die Auswirkungen des Klimawandels und Flüchtlingsbewegungen die Probleme der abnehmenden Süßwasserverfügbarkeit und Grundwasserqualität weiter verschärfen (vgl. z. B. Hussein et al. 2020; Francis 2015). Palästina und Jordanien sind somit zeitnah auf Maßnahmen angewiesen, um ihren Süßwasserbedarf langfristig decken zu können.

Eine wesentliche Maßnahme, um bestehende Wasserhaushaltsdefizite, für den landwirtschaftlichen, industriellen und privaten Bedarf, befriedigen zu können, ist die MWE an der Mittelmeerküste oder am Golf von Akaba (Rotes Meer) und anschließende Verteilung an Bedarfspunkte (vgl. Abbildung 1.1). Bestandteile eines solchen Wasserinfrastruktursystems sind einerseits Anlagen zur MWE, teilweise mit eigener Energieversorgung, und zum anderen Wasserverteilungsnetze samt Förderanlagen wie Pumpwerke und Nebeneinrichtungen (Schär und Geldermann 2022d). Die Auswahl technologischer Lösungen und die Ausgestaltung einer grenzübergreifenden Wasserinfrastruktur im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung, d. h. unter ökonomischen, umweltbezogenen und gesellschaftlichen Zielstellungen, stellt dabei ein komplexes technisches, wirtschaftliches und politisches Planungsproblem dar. Technische Verfahren zur MWE sind mit einem hohen Energiebedarf verbunden. Auch die Förderung des entsalzten Wassers über große Höhendifferenzen, wie etwa in die südlichen palästinensischen Gebiete oder das östliche Jordanland (vgl. Abbildung 1.1), ist energieintensiv. Zudem haben Jordanien und Palästina nur unzureichenden oder geteilten Zugang zu potenziellen Salzwasserquellen am Roten Meer und Mittelmeer, so dass transnationale Vorhaben oder Abkommen erforderlich sind, um Defizite im nationalen Wasserhaushalt langfristig per MWE decken zu können. Bei multilateralen Vorhaben dieser Art sind heterogene politische Interessen in Einklang zu bringen, was Konfliktpotential birgt. Anhaltende politische Spannungen in der Region erschweren dabei eine gemeinschaftliche Wasserbewirtschaftung (De Bourgoing et al. 2022a). Eine weitere Herausforderung sind die Umweltwirkungen der potenziellen Maßnahmen. So kann die Einleitung von Entsalzungskonzentrat in das Meer marine Ökosysteme durch zu starke Mineralisierung erheblich schädigen und erfordert entsprechende Strategien zur Entsorgung beziehungsweise Rückführung (Lattemann und Höpner 2008). Zudem wird der Energieaufwand der Region momentan vorrangig durch Umwandlung fossiler Primärenergie, wie Erdgas und Steinkohle, gespeist (Nassrullah et al. 2020), was bei zunehmend steigendem Bedarf an entsalztem Meerwasser zu erhöhten wirtschaftlichen Belastungen durch steigende Rohstoffpreise (Mezher et al. 2011) und erheblichen Umweltrisiken führen kann (Gude et al. 2011).

Entscheidungstragende in Israel, Jordanien und Palästina stehen daher vor der Herausforderung, unter Berücksichtigung intersektoraler Wechselwirkungen energie- und kosteneffiziente sowie langfristig tragfähige Maßnahmen zur Behebung des Wasserdefizits zu entwickeln und implementieren, welche zur Versorgungssicherheit in der Region beitragen und Nachhaltigkeitsansprüchen gerecht werden. Hierbei bietet sich die Betrachtung des WEN an.

1.2 Zielsetzung

Eine gemeinsame Betrachtung wasser- und energiewirtschaftlicher Zusammenhänge nach dem WEN erhöht die Komplexität von Entscheidungen und die Ansprüche an Entscheidungstragende. Potenzielle Maßnahmen sind im Hinblick auf eine Vielzahl an Zielstellungen zu beurteilen. So müssen z. B. technische Anforderungen mit umweltbezogenen Auswirkungen, sozio-politischen Interessen, aber auch Wirtschaftlichkeitsaspekte zugleich berücksichtigt werden. Diese Zielstellungen sind bereits bei einer sektorspezifischen Betrachtung teils konfliktär zueinander und können bei sektorübergreifender Betrachtung zu zusätzlichen Zielkonflikten führen. Im Konzept des WEN müssen mögliche Zielkonflikte zwischen dem Wasser- und Energiesektor und Ansprüche weiterer Interessensgruppen gegeneinander aufgewogen und gemeinsam Lösungen erarbeitet, vereinbart und umgesetzt werden.

Entscheidungstheoretische Ansätze, wie die Verfahren der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung (engl. multiple criteria decision analysis, MCDA), sind im Themenkomplex des WEN besonders geeignet, da sie die methodischen Werkzeuge für eine systematische und strukturierte Ermittlung und Bewertung von Handlungsmaßnahmen bei Vorliegen von Zielkonkurrenz bieten (vgl. z. B. Belton und Stewart 2002, S. 1 ff.; Zimmermann und Gutsche 1991, S. 10 ff.). Sie ermöglichen eine quantifizierte Bewertung der Konsequenzen von Maßnahmen unter Berücksichtigung mehrerer Ziele, etwa aus den Bereichen der Ökonomie, Umwelt oder Politik, und können bei der Priorisierung von Vorhaben und der Budgetallokation helfen (Tsoukiàs 2007). Darüber hinaus bieten MCDA Verfahren die Möglichkeit mehrere Interessensgruppen aktiv in den Entscheidungsprozess einzubinden (Banville et al. 1998), was sie insbesondere bei multilateralen Entscheidungsproblemen mit Beteiligung verschiedener entscheidungstragender Institutionen, wie im Zusammenhang mit öffentlichen Versorgungsgütern Wasser und Energie und im Fallbeispiel des Nahen Ostens, als geeignet erweist (Renn 2006; Abu-Taleb und Mareschal 1995).

Die **Zielsetzung** dieser Arbeit ist es somit, ein MCDA Verfahren zu entwickeln, das Entscheidungstragende bei strategischen Entscheidungen im WEN unterstützt. Es soll den spezifischen Anforderungen des WEN gerecht werden und Entscheidungstragende sowohl bei der Entwicklung von Handlungsmaßnahmen als auch bei deren Bewertung und der Ermittlung präferierter Maßnahmen unterstützen. Das Verfahren soll auf das Wasserdefizitproblem im Nahen Osten anwendbar sein, aber auch auf andere Fragestellungen des WEN übertragen werden können. Um dies zu erreichen, werden die folgenden vier Forschungsfragen aufgestellt:

Bei Anwendung von MCDA Methoden auf die komplexen Entscheidungsprobleme im Kontext des WEN ergeben sich zusätzliche Herausforderungen. Ein wesentliches Element des WEN ist das Überwinden sektoraler und institutioneller Betrachtungsweisen bei der Entwicklung von Handlungsmaßnahmen. Das Konzept des WEN beschäftigt sich gezielt mit den wechselseitigen Beziehungen zwischen dem Wasser- und Energiesektor. Ziel des WEN ist es, durch die Analyse der wechselseitigen Beziehungen zwischen dem Wasser- und Energiesektor sektorübergreifende Entscheidungen für eine nachhaltigere und effizientere Nutzung beider Ressourcen zu treffen.

Forschungsfrage 1: Welche wesentlichen intersektoralen Beziehungen existieren zwischen der Wasserversorgung und dem Energiesektor und wie können diese methodisch bei der Entwicklung und multikriteriellen Bewertung von Handlungsmaßnahmen mittels MCDA Verfahren berücksichtigt werden?

Viele Planungsprobleme im Wasser- und Energiesektor sind aufgrund nichtdeterministischer sozio-ökonomischer und bio-physikalischer Zusammenhänge bereits bei sektoraler Betrachtung hochkomplex und mit Unsicherheit behaftet. Durch eine Nexus-Betrachtung des Wasser- und Energiesektors ergeben sich zusätzliche Quellen für Unsicherheit.

Forschungsfrage 2: Welche Quellen für Unsicherheiten bestehen bei Entscheidungsproblemen im WEN und wie können diese im Zuge der multikriteriellen Bewertung verarbeitet und bei der Formulierung von Handlungsempfehlungen an Entscheidungstragende kommuniziert werden?

Potenzielle Handlungsmaßnahmen im WEN umfassen eine Vielzahl von technischen Lösungen, Umweltmanagementmaßnahmen und politischen Instrumenten. Gleichzeitig besteht unter Unsicherheit und bei langen Planungshorizonten, insbesondere bei großen Infrastrukturvorhaben, die Gefahr, dass Entscheidungen getroffen werden, die sich im Nachhinein als inadäquat erweisen, aber nur bedingt reversibel sind. Gegenwärtig zu treffende Entscheidungen mit langem Wirkungshorizont können so zukünftige Entscheidungen beeinflussen und werden zugleich von Entscheidungen der Vergangenheit beeinflusst, d. h. es besteht Pfadabhängigkeit.

Forschungsfrage 3: Wie kann dem Phänomen der Pfadabhängigkeit bei Entscheidungsproblemen des WEN vorbeugend, d. h. prospektiv, im Prozess der Entscheidungsunterstützung mittels MCDA Verfahren begegnet werden?

Im Kontext des WEN ist die Entscheidungsfindung auf einen multilateralen und mitunter transnationalen Konsens heterogener Interessensgruppen angewiesen. Zudem sind Entscheidungen, z. B. bei internationalen Gewässern oder dem Wasserdefizitproblem im Nahen Osten, nicht an einen nationalen Rahmen gebunden.

Forschungsfrage 4: Wie kann im Rahmen der Entscheidungsunterstützung ein gemeinsames Verständnis des Entscheidungsproblems bei allen beteiligten Akteuren geschaffen werden und wie können Interessen aller beteiligten Akteure erfasst und berücksichtigt werden, um die Akzeptanz getroffener Entscheidungen zu fördern?

1.3 Lösungsweg

Zur Beantwortung der vier Forschungsfragen, die zum Erreichen des Ziels der Arbeit führen, wird nach folgendem Lösungsansatz vorgegangen, welcher zugleich die weitere Struktur der Arbeit vorgibt.

In Kapitel 2 wird der Entscheidungskontext des nachhaltigen Ressourcenmanagements nach dem Konzept des WEN vorgestellt. Hierzu wird zunächst der Begriff der Nachhaltigkeit definiert und in die Ziele nachhaltiger Entwicklung der Vereinten Nationen (engl. United Nations Sustainable Development Goals, SDGs) eingeführt. Sie geben Entscheidungstragenden Orientierung für ein nachhaltiges Ressourcenmanagement. Ebenso können sie bei der Anwendung von MCDA Verfahren Anhaltspunkte für operationalisierte Nachhaltigkeitszielstellungen bieten. Anschließend wird das Konzept des WEN charakterisiert, definiert und unter Aufzeigen seines Entstehungsprozesses von bestehenden entwicklungspolitischen Planungskonzepten des integrierten Ressourcenmanagements abgegrenzt. Außerdem werden die wesentlichen Zusammenhänge zwischen dem Wasser- und dem Energiesektor, die durch eine Nexus-Perspektive integriert betrachtet werden können, erläutert.

Zur Entwicklung und Bewertung von Handlungsmaßnahmen im WEN wird in Kapitel 3 der Stand der Forschung zu MCDA Verfahren dargelegt. Der Fokus wird dabei auf etablierte Verfahren im Wasser-, Energie- und Umweltbereich gelegt. Hierzu wird die MCDA zunächst in die Entscheidungstheorie ein-

geordnet und grundlegende Begriffe innerhalb der MCDA definiert sowie Verfahrensklassen charakterisiert. Darauf folgend wird der strukturierte Ablauf etablierter MCDA Verfahren formal beschrieben, erläutert und die Methodenfamilie Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations (PROMETHEE) zur Bearbeitung der Problemstellung dieser Arbeit ausgewählt. Um die Spezifika von Entscheidungsproblemen des WEN zu adressieren, bietet sich zudem der Einsatz sogenannter problemstrukturierender Methoden (engl. problem structuring methods, PSM) an, welche für komplexe Entscheidungsprobleme häufig in Kombination mit MCDA Verfahren genutzt werden. Die methodischen Instrumente der PSM und deren Einsatzmöglichkeiten in der MCDA werden deshalb ebenfalls erläutert. Abschließend wird die Anwendung von PROMETHEE innerhalb der Multi-Actor Multi-Criteria Analysis (MAMCA-PROMETHEE) zur systematischen Unterstützung von Entscheidungsproblemen mit mehreren beteiligten Akteuren vorgestellt.

In Kapitel 4 wird ein MCDA Verfahren zur Entscheidungsunterstützung bei strategischen Entscheidungen im WEN auf Basis von PROMETHEE entwickelt. Hierzu werden zunächst die Anforderungen an MCDA Verfahren im Kontext des WEN erarbeitet. Anschließend wird eine strukturierte Literaturstudie durchgeführt, um bestehende MCDA Verfahren und methodische Instrumente für die Entscheidungsunterstützung im Kontext des WEN zu identifizieren. Die Analyse des Status quo zeigt, dass es derzeit noch kein MCDA Verfahren gibt, welches die intersektoralen Beziehungen und weiteren Anforderungen bei Entscheidungsproblemen des WEN innerhalb eines MCDA Verfahrens gänzlich berücksichtigt und dabei die Vorteile von PROMETHEE nutzt. Daher wird im Anschluss ein strukturiertes Vorgehen für die Entwicklung und prospektive Bewertung von Handlungsalternativen im WEN mittels PROMETHEE entwickelt und vorgestellt. Zudem wird gezeigt, wie das Verfahren den Herausforderungen bei der Entwicklung und prospektiven Bewertung von Handlungsmaßnahmen im WEN methodisch begegnet.

Den zentralen Teil der Arbeit stellt das Kapitel 5 dar. Das zuvor theoretisch beschriebene Verfahren zur Entwicklung und prospektiven Bewertung von Handlungsmaßnahmen im WEN wird auf den konkreten Fall des Wasserdefizitproblems im Nahen Osten angewendet. Das Fallbeispiel geht auf die Forschungsinitiative SALAM³ zurück, die zunächst kurz vorgestellt wird. Anschließend wird die Anwendung des Verfahrens dargelegt. Dies umfasst sowohl den umfassenden Prozess der Problemstrukturierung und Präferenzenerhebung als auch die multikriterielle Bewertung der, gemeinsam mit Akteuren aus Israel, Jordanien und Palästina entwickelten, Handlungsmaßnahmen. Ebenso werden die Ergebnisse mithilfe der besonderen Sensitivitätsanalysen, die sich durch MAMCA-PROMETHEE bieten, untersucht und in einen prospektiven Handlungsplan überführt.

In Kapitel 6 wird die Arbeit zunächst zusammengefasst. Zudem werden die Forschungsfragen beantwortet und die Zielerreichung dargestellt. Darüber hinaus wird die Übertragbarkeit des entwickelten Verfahrens auf weitere Fragestellungen und Kontexte diskutiert. Ebenso werden Limitationen und der weitere Forschungsbedarf aufgezeigt.

³ Die SALAM-Initiative ist ein vom Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördertes Verbundprojekt. Im Rahmen der Initiative erarbeiteten Institutionen aus Palästina, Jordanien, Israel und Deutschland im Zeitraum von 2020 bis 2022 gemeinsam Strategien zur Lösung des Wasserdefizitproblems im Nahen Osten (De Bourgoing et al. 2022a).

2 Der Wasser-Energie Nexus als Leitbild für ein nachhaltiges Ressourcenmanagement

In diesem Kapitel wird der Begriff des Wasser-Energie Nexus durch eine Charakterisierung und die Erarbeitung einer Arbeitsdefinition konkretisiert. Auf dieser Grundlage kann im weiteren Verlauf der Arbeit ein Verfahren erstellt werden, das Entscheidungstragende bei der Entwicklung wasser- und energiewirtschaftlicher Maßnahmen unterstützt, welche die Verflechtungen zwischen Prozessen zur Bereitstellung von Wasser und Energie berücksichtigen. Ferner ermöglicht das Verfahren die Nachhaltigkeit der entwickelten Maßnahmen zu bewerten. Im Vergleich zu einer isolierten, sektoralen Perspektive auf Entscheidungsprobleme im Wasser-, Energie- oder Umweltbereich sind die Entscheidungstragenden dabei jedoch mit zusätzlichen Herausforderungen konfrontiert, die es zu identifizieren und im Entscheidungsunterstützungsverfahren methodisch zu berücksichtigen gilt. Die Einnahme einer Nexusperspektive bietet jedoch ebenfalls eine Reihe von Vorteilen, wie z. B. die Realisierung sektorübergreifender Synergiepotentiale und Vermeidung von ungewünschten Wechselwirkungen in Bezug auf Nachhaltigkeitsbestrebungen.

Die Ziele nachhaltiger Entwicklung der Vereinten Nationen operationalisieren Nachhaltigkeitsbestrebungen und bieten den Entscheidungstragenden im WEN normative Ansatzpunkte für die Erstellung von Maßnahmen (Abschnitt 2.1). Die chronologische Entstehung von Nexus-Konzepten im Kontext entwicklungspolitischer Nachhaltigkeitsbestrebungen wird in Abschnitt 2.2 dargelegt. Anschließend wird in Abschnitt 2.3 der Begriff des WEN definiert und von bestehenden Leitbildern des nachhaltigen Ressourcenmanagements abgegrenzt. Außerdem werden die wesentlichen Zusammenhänge zwischen dem Wasser- und dem Energiesektor, die durch eine Nexus-Perspektive integriert betrachtet werden können, erläutert (Abschnitte 2.4 und 2.5). Abschnitt 2.6 fasst das Kapitel zusammen.

2.1 Ziele für nachhaltige Entwicklung

Der Begriff der nachhaltigen Entwicklung nimmt seit den frühen 1980er Jahren weltweit eine zentrale Rolle im gesamtgesellschaftlichen Diskurs über die Gestaltung von volkswirtschaftlichen Entwicklungsprozessen ein. Er bezeichnet ein multidimensionales Konzept, welches sich der Aufgabe widmet, soziale, ökologische, technische und ethische Zielsetzungen in politische Leitlinien zu überführen und somit normative Ansatzpunkte für Entscheidungsprozesse zu bieten (Munda 2016, S. 1235). Neben Akteuren aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft nimmt die breite Öffentlichkeit zunehmend am Diskurs um die zugrundeliegenden Zielsetzungen und Ausgestaltung dieser Leitlinien für nachhaltige Entwicklungsprozesse teil (Grunwald und Kopfmüller 2022).

Nachhaltige Entwicklung wird nach der weitläufig verwendeten Definition der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung dann realisiert, wenn sie „die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können“ (Hauff und Brundtland 1987, S. 46). Nach der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (engl. World Commission on Environment and Development, WCED) ist nachhaltige Entwicklung somit als dauerhafter und ganzheitlicher Wandlungsprozess zu verstehen, wobei Investitionen und technologische Entwicklung mit institutionellem Wandel und Ressourcennutzung in Einklang gebracht werden müssen, um menschliche Bedürfnisse in Gegenwart und Zukunft durch den Erhalt dafür notwendiger sozialer, wirtschaftlicher und natürlicher Grundlagen im Sinne intergenerationaler Gerechtigkeit befriedigen zu können (Hauff und Brundtland 1987). Nachhaltige Entwicklung wird aufgrund dieses systemischen Zusammenspiels zwischen Wirtschaftssystem, gesellschaftlichem System und der natürlichen Biosphäre

häufig dreidimensional aufgefasst (vgl. z. B. Barbier 1987; Passet 1995). Nachhaltige Entwicklungsprozesse sollten daher die gleichzeitige Maximierung umweltbezogener Ziele (u. a. Artenvielfalt, Resilienz), ökonomischer Ziele (u. a. Grundbedürfnisbefriedigung, wirtschaftliches Wachstum) und gesellschaftliche bzw. soziale Ziele (u. a. soziale Gerechtigkeit, gesellschaftliche Teilhabe, Partizipation an Wandlungsprozessen) anstreben (Barbier 1987; Munda 2016, S. 1236). Da eine gleichzeitige Maximierung verschiedener Ziele in der Regel nicht möglich ist und der Diskurs durch eine Vielzahl von Meinungen gekennzeichnet ist, ist die Festlegung geeigneter Leitlinien zur Umsetzung des Konzepts der nachhaltigen Entwicklung ein zentrales Thema internationaler Umwelt-, Forschungs- und Entwicklungspolitik (Grunwald und Kopfmüller 2022, S. 12).

Im Jahr 1992 wurde auf Vorschlag der Brundtland-Kommission in Rio de Janeiro die Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung (engl. United Nations Conference on Environment and Development, UNCED) abgehalten (UN 1992b). Auf dieser, umgangssprachlich auch als "Erdgipfel" (engl. earth summit) oder „Rio-Konferenz“ bezeichneten Konferenz, verpflichtete sich eine internationale Gemeinschaft von 154 Ländern das Leitbild der nachhaltigen Entwicklung in konkrete politische Maßnahmen umzusetzen (Grunwald und Kopfmüller 2022, S. 35). Ein Teil zentrales Dokument der UNCED von 1992 ist die Agenda 21, welche politische Ziele, Maßnahmen und Instrumente zur Umsetzung des Leitbilds nach dem dreidimensionalen Verständnis nachhaltiger Entwicklung in Form von Rahmenvereinbarungen beinhaltet und unterschiedliche nationale Schwerpunkte setzt (UN 1992a). Allerdings enthielt keines der in Rio verabschiedeten Dokumente überprüfbare Verpflichtungen für die Vertragsstaaten. Diese wurden erst im Anschluss an die Rio-Konferenz in zahlreichen Folgekonferenzen und weiteren Aktivitäten der Vereinten Nationen (engl. United Nations, UN) zunehmend konkretisiert, wie z. B. für den Umgang mit dem anthropogenen Klimawandel oder dem Schutz der Biodiversität (Grunwald und Kopfmüller 2022, S. 36 f.), sowie vor allem durch die im Jahr 2015 verabschiedete Agenda 2030 (UN General Assembly 2015). Für eine ausführliche Darstellung der Entstehungsgeschichte des Begriffes der nachhaltigen Entwicklung auf internationaler Ebene, von den Ursprüngen in der Forstwirtschaft des 18. Jahrhunderts bis hin zu aktuellen entwicklungspolitischen Geschehnissen, siehe Grunwald und Kopfmüller (2022, S. 21 ff.).

Ein wesentlicher Teil der Agenda 2030 sind die 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen (engl. United Nations Sustainable Development Goals, SDGs), deren Erreichung von 193 Mitgliedsstaaten der UN bis zum Jahr 2030 angestrebt wird (Grunwald und Kopfmüller 2022, S. 38). Die SDGs bieten normative Ansatzpunkte für politische Entscheidungstragende zur Operationalisierung eines effektiven und nachhaltigen Ressourcenmanagements (UN 2015). Sie zielen auf Sicherstellung einer nachhaltigen Entwicklung auf ökologischer, sozialer sowie ökonomischer Ebene, durch multilaterale Zusammenarbeit, von Regierungen, zivilgesellschaftlichen und wirtschaftlichen Akteuren, ab (BMZ 2023b). Zur Spezifikation gliedert sich jedes der 17 Ziele in weitere Unterziele auf. Abbildung 2.1 stellt die 17 globalen SDGs dar und zeigt deren Verknüpfungen zu den Säulen des dreidimensionalen Nachhaltigkeitskonzeptes im Sinne der Agenda 21 auf.

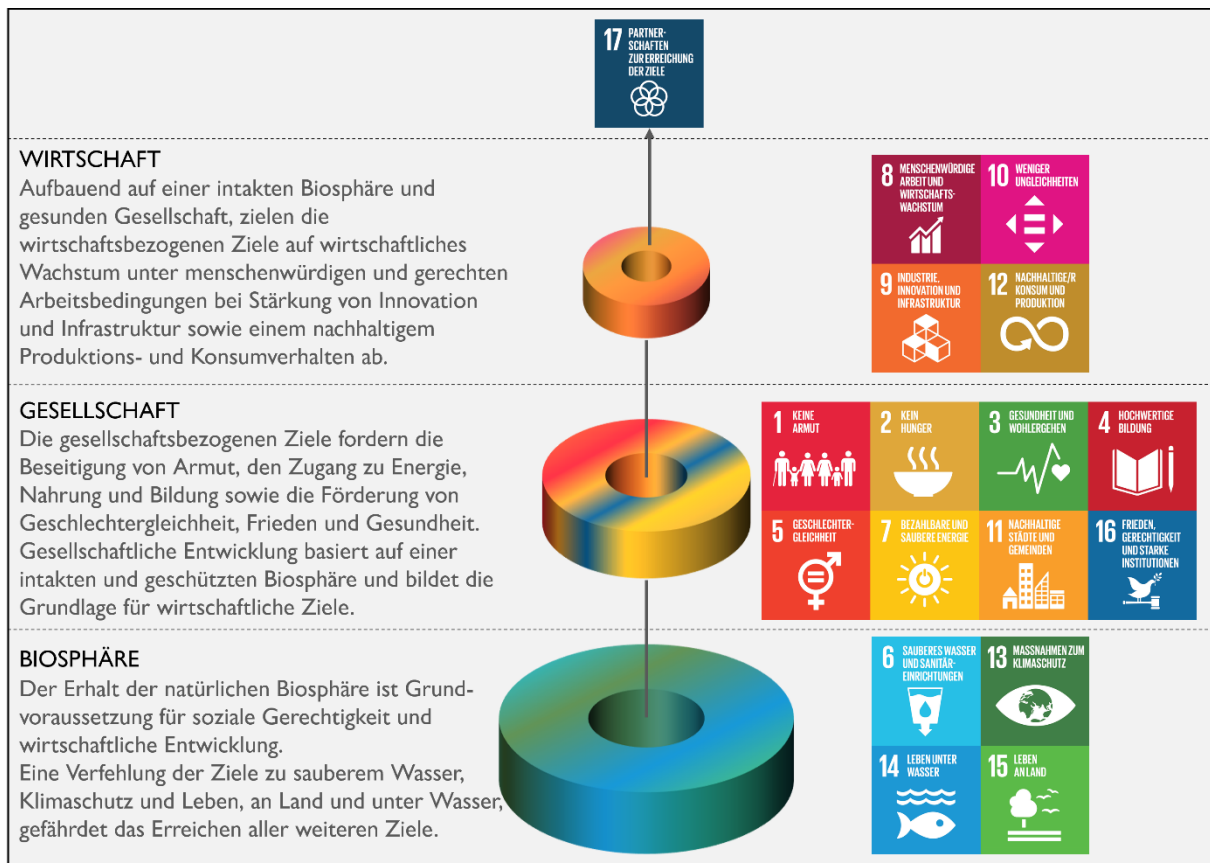


Abbildung 2.1: Sustainable Development Goals und dreidimensionales Nachhaltigkeitskonzept

Quelle: Eigene Darstellung nach Pretlove und Blasiak (2018), Rockström und Sukhdev (2016)

Auf nationaler Ebene überführen unterzeichnende Staaten die SDGs in nationale Nachhaltigkeitsstrategien mit landesspezifischen Zielstellungen. Der Fortschritt bei der Erreichung einzelner (Unter-)Ziele für UN-Mitgliedsstaaten kann anhand von insgesamt 240 Indikatoren beurteilt werden, welche von einer Expertengruppe der UN (engl. Inter-Agency and Expert Group on SDG Indicators, IAEG-SDGs) definiert und fortlaufend weiterentwickelt werden. Jeder Teilnehmerstaat kann der UN-Statistikkommission zudem regelmäßig Daten zu relevanten Indikatoren in einem standardisierten Format übermitteln, welche anschließend von der IAEG-SDG konsolidiert in einer Datenbank gespeichert und öffentlich abrufbar aufbereitet werden (UN 2017, 2023b).⁴ Indikatorenspezifikationen und standardisierte Berechnungsschemata sind öffentlich verfügbar, ebenso aggregierte ad-hoc-Auswertungen bereits vorhandener Daten. (UN 2023a, 2023c). Derzeit liegen dabei für 148 der 240 Indikatoren regelmäßig erhobene und repräsentative Daten vor.

Die hierarchische Darstellung der SDGs in Abbildung 2.1 verdeutlicht zudem die Bedeutung eines angemessenen Umgang mit natürlichen Ressourcen, insbesondere den Ressourcen Wasser und Energie, in Bezug auf volkswirtschaftliche Entwicklung. Ein Ressourcenmanagement unter umweltbezogenen Nachhaltigkeitszielstellungen ist essentiell für die langfristige Sicherstellung der Wasser- und Energieverfügbarkeit und somit die langfristige (volks-)wirtschaftliche Entwicklung (UN 2015). Aus diesem

⁴ Einzelne Nationen bereiten ihre Daten ebenso für externen Abruf auf. So informiert das Statistische Bundesamt auf einer Online Plattform (Destatis 2023) zu SDG-Indikatoren der Agenda 2030 sowie der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie, welche die nationale Umsetzung der Agenda 2030 ist. Zu jedem der 17 SDGs wurde jeweils mindestens ein thematisch relevanter Indikator in die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie aufgenommen.


Grund sollten strategische Entscheidungen im Wasser- und Energieressourcenmanagement, insbesondere bei solchen von multilateralem und transnationalem Charakter und mit langfristigen Wirkungshorizont, wie das in dieser Arbeit betrachtete Entscheidungsproblem der Wasserversorgung im Nahen Osten, stets in Anbetracht der SDGs und eines mehrdimensionalen Nachhaltigkeitsverständnisses getroffen werden. Um der dabei auftretenden Zielkonkurrenz gerecht zu werden, bieten sich MCDA Verfahren zur Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen an.

Die SDGs 6 und 7 beziehungsweise deren spezifischere Unterziele und Fortschrittsindikatoren, dargestellt in Tabelle 2.1, sind für die Problemstellung dieser Arbeit besonders relevant. Das SDG 6 („Sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen“) befasst sich mit der nachhaltigen Bewirtschaftung von Wasserressourcen und Sicherstellung der Verfügbarkeit sanitärer Einrichtungen⁵. SDG 7 („Bezahlbare und saubere Energie“) zielt darauf ab, Zugang zu erschwinglicher Energie mit möglichst geringer Umweltwirkung zu tragfähigen ökonomischen Kosten zu gewährleisten. Darüber stehen weitere Ziele, wie die SDGs 2, 3, 11, 13, 14 und 15 indirekt mit SDG 6 und 7 in Beziehung. So beinhaltet SDG 13 die "Entwicklung von Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und seinen Auswirkungen" und ist somit eng mit SDG 6 und 7 verknüpft, da sowohl der Wasser- als auch der Energiesektor durch den Klimawandel beeinflusst werden, beziehungsweise durch Ressourcenentnahmen und Eingriffe in aquatische sowie terrestrische Ökosysteme zu dessen Auswirkungen beitragen (Rasul und Sharma 2016). Gleichmaßen zeigt sich eine wesentliche Verknüpfung zwischen den SDGs 6 und 7. So besteht zur Gewinnung von Energieträgern und deren Umwandlung sowie Bereitstellung als Sekundär- oder Endenergie an verschiedenen Stellen der Wertschöpfungskette ein erheblicher Wasserbedarf, um einem möglichst großen Teil der Weltbevölkerung den Zugang zu dieser Energie zu ermöglichen. Auch die in den SDGs 6.1 und 6.2 definierten Ziele, allen Menschen Zugang zu sauberem Trinkwasser und einer angemessenen Sanitärversorgung zu ermöglichen, erfordern beispielsweise erhebliche Energiemengen, um das Wasser aufzubereiten und zu den Entnahmestellen zu transportieren. Basierend auf einem gekoppelten Management natürlicher Ressourcen zur Steigerung der Effizienz, Versorgungssicherheit und Realisierung von Synergieeffekten bei Nachhaltigkeitszielen, hat sich in der internationalen Entwicklungspolitik das Konzept des Wasser-Energie Nexus (engl. water-energy nexus, WEN) als neues Leitbild herausgebildet.

⁵ Die deutschen Übersetzungen der von der UN-Generalversammlung gewählten Bezeichnungen (UN General Assembly 2015) wurden gemäß BMZ (2023a) gewählt.

Tabelle 2.1: Unterziele und Indikatoren für SDG 6 und SDG 7

Ziele nachhaltiger Entwicklung - Sustainable Development Goals		SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS	
Ziel 6		6 CLEAN WATER AND SANITATION	
Verfügbarkeit und nachhaltige Bewirtschaftung von Wasser und Sanitärversorgung für alle gewährleisten			
Unterziele		Indikatoren	
6.1	Bis 2030 den allgemeinen und gerechten Zugang zu einwandfreiem und bezahlbarem Trinkwasser für alle erreichen	6.1.1	Anteil der Bevölkerung, der eine sicher verwaltete Trinkwasserversorgung nutzt
6.2	Bis 2030 den Zugang zu einer angemessenen und gerechten Sanitärversorgung und Hygiene für alle erreichen und der Notdurftverrichtung im Freien ein Ende setzen, unter besonderer Beachtung der Bedürfnisse von Frauen und Mädchen und von Menschen in prekären Situationen	6.2.1	Anteil der Bevölkerung, der a) eine sicher verwaltete Sanitärversorgung und b) eine Gelegenheit zum Händewaschen mit Wasser und Seife nutzt
6.3	Bis 2030 die Wasserqualität durch Verringerung der Verschmutzung, Beendigung des Einbringens und Minimierung der Freisetzung gefährlicher Chemikalien und Stoffe, Halbierung des Anteils unbehandelten Abwassers und eine beträchtliche Steigerung der Wiederaufbereitung und gefahrlosen Wiederverwendung weltweit verbessern	6.3.1	Anteil der sicher behandelten Haushalts- und Industrieabwässer
		6.3.2	Anteil der Gewässer mit guter Wasserqualität
6.4	Bis 2030 die Effizienz der Wassernutzung in allen Sektoren wesentlich steigern und eine nachhaltige Entnahme und Bereitstellung von Süßwasser gewährleisten, um der Wasserknappheit zu begegnen und die Zahl der unter Wasserknappheit leidenden Menschen erheblich zu verringern	6.4.1	Veränderung der Wassernutzungseffizienz im Zeitverlauf
		6.4.2	Grad an Wasserstress: Süßwasserentnahme im Verhältnis zu den vorhandenen Süßwasserressourcen
6.5	Bis 2030 auf allen Ebenen eine integrierte Bewirtschaftung der Wasserressourcen umsetzen, gegebenenfalls auch mittels grenzüberschreitender Zusammenarbeit	6.5.1	Grad der integrierten Wasserbewirtschaftung
		6.5.2	Anteil der grenzüberschreitenden Wassereinzugsgebiete mit einer operativen Vereinbarung zur Wasserkooperation
6.6	Bis 2020 wasserverbundene Ökosysteme schützen und wiederherstellen, darunter Berge, Wälder, Feuchtgebiete, Flüsse, Grundwasserleiter und Seen	6.6.1	Veränderung des Umfangs wasserbezogener Ökosysteme im Zeitverlauf
6.a	Bis 2030 die internationale Zusammenarbeit und die Unterstützung der Entwicklungsländer beim Kapazitätsaufbau für Aktivitäten und Programme im Bereich der Wasser- und Sanitärversorgung ausbauen, einschließlich der Wassersammlung und -speicherung, Entsalzung, effizienten Wassernutzung, Abwasserbehandlung, Wiederaufbereitungs- und Wiederverwendungstechnologien	6.a.1	Umfang der öffentlichen Entwicklungszusammenarbeit (ODA) für Wasser- und Sanitärversorgung, die Teil eines geregelten öffentlichen Haushaltsplans ist
6.b	Die Mitwirkung lokaler Gemeinwesen an der Verbesserung der Wasserbewirtschaftung und der Sanitärversorgung unterstützen und verstärken	6.b.1	Anteil der lokalen Verwaltungseinheiten mit etablierten und operativen Strategien und Verfahren zur Beteiligung der Gemeinden am Wasser- und Abwassermanagement

Ziele nachhaltiger Entwicklung - Sustainable Development Goals		SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS	
Ziel 7		7 AFFORDABLE AND CLEAN ENERGY 	
Zugang zu bezahlbarer, verlässlicher, nachhaltiger und moderner Energie für alle sichern			
Untertitel		Indikatoren	
7.1	Bis 2030 den allgemeinen Zugang zu bezahlbaren, verlässlichen und modernen Energiedienstleistungen sichern	7.1.1	Anteil der Bevölkerung mit Zugang zu Elektrizität
		7.1.2	Anteil der Bevölkerung, der vorwiegend saubere Energieträger und Technologien nutzt
7.2	Bis 2030 den Anteil erneuerbarer Energie am globalen Energiemix deutlich erhöhen	7.2.1	Anteil der erneuerbaren Energien am gesamten Endenergieverbrauch
7.3	Bis 2030 die weltweite Steigerungsrate der Energieeffizienz verdoppeln	7.3.1	Energieintensität gemessen als Primärenergie zum BIP
7.a	Bis 2030 die internationale Zusammenarbeit verstärken, um den Zugang zur Forschung und Technologie im Bereich saubere Energie, namentlich erneuerbare Energie, Energieeffizienz sowie fortschrittliche und saubere Technologien für fossile Brennstoffe, zu erleichtern, und Investitionen in die Energieinfrastruktur und saubere Energietechnologien fördern	7.a.1	Internationale Finanzströme in Entwicklungsländer zur Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich saubere Energie und zur Erzeugung von Energie aus erneuerbaren Energiequellen, einschließlich mittels Hybridsystemen
7.b	Bis 2030 die Infrastruktur ausbauen und die Technologie modernisieren, um in den Entwicklungsländern und insbesondere in den am wenigsten entwickelten Ländern, den kleinen Inselentwicklungsländern und den Binnenentwicklungsländern im Einklang mit ihren jeweiligen Unterstützungsprogrammen moderne und nachhaltige Energiedienstleistungen für alle bereitzustellen	7.b.1	Installierte Kapazitäten zur Erzeugung erneuerbarer Energie in Entwicklungsländern (in Watt pro Kopf)

Quelle: Eigene Darstellung nach BMZ (2023e, 2023d, 2023f); Destatis (2023)

2.2 Chronologie des WEN als entwicklungspolitisches Leitbild

Die Verfügbarkeit von Wasser sowie die Bereitstellung von Energie sind zentrale Grundvoraussetzungen für eine nachhaltige Entwicklung von Volkswirtschaften, sowohl auf ökonomischer als auch auf gesellschaftlicher Ebene (IEA 2017). Durch die Auswirkungen des Klimawandels stehen Entscheidungstragende im Wasser- und Energiesektor jedoch vor der grundsätzlichen Herausforderung, zunehmend knapper werdende Ressourcen effektiv und nachhaltig zu bewirtschaften und zu verteilen. Dazu sind neben ökonomischen und gesellschaftlichen Zielstellungen ebenso umweltbezogene Ziele, wie der Erhalt bestehender Ökosysteme, zu berücksichtigen. Der Erhalt von Ökosystemen und daraus gewonnene Ökosystemleistungen (z. B. natürliche Wasserspeicher, Grundwasserreinigung, Hochwasserpuffer) stellen die Grundlage für die Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen dar und bieten darüber hinaus weitere Vorteile für Mensch und Gesellschaft (Wood et al. 2018; UN 2022). Im Hinblick auf die Wasserddefizitproblematik in Israel, Jordanien und Palästina, aber auch ähnliche Planungsfragen der Wasser- und Energieversorgung, ist eine Betrachtung nach dem Ansatz des WEN sinnvoll.

Nexus-Ansätze basieren auf einem gekoppelten Management natürlicher Ressourcen zur Steigerung der Effizienz und Versorgungssicherheit. Der Ursprung einer verknüpften Betrachtung natürlicher Ressourcen bei Planungsfragen wird in einem 1983 durch die Universität der Vereinten Nationen (engl. United Nations University, UNU) initiierten Programm zum Ernährungs-Energie Nexus, als Reaktion auf die Erkenntnisse der Ölkrise in den 1970er Jahren, gesehen (Sachs und Silk 1990; Endo et al. 2017). Auf nachfolgenden Fachkonferenzen, wie z. B. der *Food, Energy, and Ecosystems* in Brasilia 1986 oder der *Food-Energy Nexus and Ecosystems* in New Delhi, wurden Nexus-Ansätze erstmals in der internationalen Forschungsgemeinschaft diskutiert. In den 1990er und 2000er Jahren wurden zunehmend Nexus-Ansätze entwickelt, um der lokal begrenzten landwirtschaftlichen Nahrungsmittelproduktion oder der Wasserknappheit in ariden Regionen wie dem Nahen Osten zu begegnen (z. B. McCalla 1997). In diesem Zusammenhang sind neue Konzepte des gekoppelten Ressourcenmanagements, wie das des *virtuellen Wassers*⁶, entstanden.

Die Berücksichtigung der Interdependenzen zwischen der Wasserversorgung und dem Energiesektors über einen Nexus-Ansatz fand ab 2003 mit dem Weltwasserforum in Kyoto Eingang in den internationalen Diskurs (Hussey und Pittock 2012; Scott et al. 2011). Auch internationale Lobbyorganisationen wie das Weltwirtschaftsforum (engl. World Economic Forum, WEF) beschäftigten sich zunehmend mit der Idee einer integrativen Bewirtschaftung von Wasser, Energie und Nahrungsmittelproduktion (Cairns und Krzywoszynska 2016) und publizierten diese im Januar 2011 unter dem Titel *Water security: The water-food-energy-climate nexus* (WEF 2011). Mit der Bonner Nexus-Konferenz im November 2011, an der Akteure aus internationaler Politik, Wirtschaft und Wissenschaft teilnahmen, wurde der Wasser-Energie-Ernährungssicherheit-Nexus (engl. water-energy-food nexus) als Grundlage für die Konferenz der Vereinten Nationen über nachhaltige Entwicklung (engl. United Nations Conference on Sustainable Development, UNCSD), oftmals auch als "Rio+20" Konferenz bezeichnet, im Juni 2012 formalisiert. Im Zuge dieser Konferenz wurden zentrale Handlungsprinzipien für Entscheidungstragende erarbeitet, um die multidimensionalen Ziele nachhaltiger Entwicklung und wechselseitige Beziehungen bei der Gestaltung von Handlungsmaßnahmen zu berücksichtigen (Martin-Nagle et al. 2012).

⁶ Das Konzept des *virtuellen Wassers* quantifiziert den Frischwasseraufwand zur Produktion von Nahrungsmitteln und betrachtet den gezielten Nahrungsmittelimport wasserarmer Länder somit als Kompensationsmöglichkeit zur Minderung lokaler Wasserknappheiten (vgl. z. B. Allan 2003).

Die begleitende Veröffentlichung mit dem Titel *Understanding the Nexus* (Hoff 2011) hat sich im Zeitverlauf zu einem Standardwerk für politische Entscheidungstragende und die akademische Gemeinschaft bei der Erarbeitung von Maßnahmen zur Bewältigung zunehmender Ressourcenknappheitsprobleme und der Bearbeitung entwicklungspolitischer Fragestellungen unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten entwickelt (Albrecht et al. 2018). Mit der Rio+20 Konferenz und der Entwicklung der SDGs (vgl. Abschnitt 2.1) wurden die Bestrebungen intensiviert, Synergien und Zielkonflikte zwischen Ressourcensektoren in entwicklungspolitisches Handeln zu integrieren (Mohtar 2022).

Weitere Aktivitäten nationaler und internationaler Entwicklungsorganisationen sowie die Veröffentlichung grauer Literatur zu Nexus-Ansätzen bekräftigen die fortwährende Relevanz des Themas im entwicklungspolitischen Diskurs. So wurde z. B. 2012 das UNU-Institut für integriertes Management von Stoffströmen und Ressourcen (UNU-FLORES) in Dresden gegründet, die Weltbank startete im Jahr 2013 die Initiative *Thirsty Energy* (Rodriguez et al. 2013) und das durch G-20 Mitgliedsstaaten gegründete Clean Energy Ministerial-Forum initiierte im Jahr 2015 die *Energy-Water-Food Nexus Initiative* (Clean Energy Ministerial 2010, 2023). Neben den systemischen Wechselwirkungen zwischen Wasser, Energie und landwirtschaftlicher Nahrungsmittelproduktion (ADB 2013; Bizikova et al. 2013; UN ESCAP 2013) werden dabei ebenfalls wesentliche Ökosystemeinflüsse der Wasser- und Energiewirtschaft untersucht (vgl. z. B. European Report on Development 2012; Andrews-Speed et al. 2012; UNECE Task Force on Water–Energy–Food–Ecosystems 2013).

Die Chronologie von Nexus-Aktivitäten offenbart die heterogene Auffassung hinsichtlich der zu inkludierenden Sektoren und der dabei gewählten Betrachtungsgrenzen. Heterogenität spiegelt sich dabei in unterschiedlich definierten Nexus-Typen wider. So differenzieren Endo et al. (2017) auf übergeordneter Ebene zwischen dem *water-food*, *water-energy-food*, *water-energy-food-climate change* und *water-energy nexus*, aber auch innerhalb dieser Nexus-Typen wird die hohe Brandbreite verschiedener Begriffsauffassungen und Unklarheit bezüglich des konkreten Betrachtungsgegenstandes mangels einer einheitlichen Konzeptionierung kritisiert (Benson et al. 2015; Al-Saidi und Elagib 2017). Diese konzeptionelle Debatte zeigt die relative thematische Neuheit eines gekoppelten Ressourcenmanagements in der Wissenschaft und im öffentlichen Diskurs auf (Allouche et al. 2015; Pandey und Shrestha 2017). Im folgenden wird der Begriff des WEN daher charakterisiert, definiert und von bestehenden wasserwirtschaftlichen Planungskonzepten, wie dem des integrierten Wasserressourcenmanagements, abgegrenzt.

2.3 Charakterisierung, Abgrenzung und Begriffsdefinition

Wie zuvor aufgezeigt, tauchen Nexus-Ansätze in der Literatur an verschiedenen Stellen auf. Sie sind, unter Mitwirkung der wissenschaftlichen Gemeinschaft, Gegenstand entwicklungspolitischer Fragestellungen auf internationaler und nationaler Ebene sowie Gegenstand von Aktivitäten zivilgesellschaftlicher Interessensgruppen und Nichtregierungsorganisationen (engl. non-governmental organization, NGO) (Endo et al. 2017). Dabei sind verschiedene Auffassungen des Nexusbegriffs und Ansprüche an sektorübergreifende Ansätze zum integrierten Ressourcenmanagement zu beobachten.

Allgemein werden Nexus-Ansätze als übergeordnete Prozesse zur Aufarbeitung und Integration der Sichtweisen, Ansprüche und Ziele verschiedener Interessensgruppen in unterschiedlichen Sektoren charakterisiert, um eine nachhaltige Entwicklung möglichst effizient zu erreichen (Endo et al. 2017; De

Laurentiis et al. 2016). Effizienz im Hinblick auf nachhaltige Entwicklungsprozesse soll durch die Berücksichtigung von Abhängigkeiten und Wechselwirkungen⁷ bei der Gestaltung von Handlungsmaßnahmen erreicht werden (Simpson und Jewitt 2019b). Das Verständnis von nachhaltiger Entwicklung in Nexus-Ansätzen orientiert sich an dem in der Rio-Erklärung und der Agenda 21 manifestierten drei-Säulen Konzept (UN 1992b), das im Zuge der Rio-Konferenz 2012 über die SDGs konkretisiert und operationalisiert wurde (UN 2012).

Die SDGs unterliegen im drei-Säulen Konzept der nachhaltigen Entwicklung hierarchischen Abhängigkeiten (vgl. Abschnitt 2.1), wobei eine intakte Biosphäre die Grundlage für das Erreichen gesellschaftspolitischer Zielstellungen und wirtschaftliches Wachstum darstellt. Ebenso können Maßnahmen zur Erreichung spezifischer SDGs beziehungsweise deren Unterziele das Erreichen weiterer SDGs kompromittieren oder begünstigen (Gallagher et al. 2016). Nach Ansatz des WEN sollten Entscheidungstragende sich deshalb gezielt mit integrierten Ressourcennutzungs- und Versorgungskonzepten und deren Auswirkungen auf die natürliche Umwelt und Gesellschaft beschäftigen. Durch die Aufarbeitung und Berücksichtigung der intersektoralen Beziehungen zwischen wasser- und energiewirtschaftlichen Prozessen sind so Synergien bei der Erreichung von SDGs realisierbar (Salam et al. 2017; Pandey und Shrestha 2017). Als integrativer Planungsansatz beeinflusst der WEN zunehmend internationale Entwicklungsarbeiten und fließt in nationale und regionale politische Programme ein (Middleton et al. 2015). Er ergänzt und erweitert dabei allgemein anerkannte wasserwirtschaftliche Planungsansätze mit integrativem und multilateralem Charakter, wie den des integrierten Wasserressourcenmanagements (engl. integrated water resources management, IWRM).

Das IWRM ist ein Planungsansatz zur koordinierten Bewirtschaftung von Wasserressourcen und zielt auf eine ganzheitliche Betrachtung vorhandener Wasserquellen und -nutzungsformen bei der koordinierten Steuerung von Wasserangebot und -nachfrage ab (Kurian 2017; Agarwal et al. 2000). Dem IWRM liegt ebenfalls ein dreidimensionales Verständnis der Nachhaltigkeit zugrunde, wie die von der UN-Partnerorganisation Global Water Partnership (GWP) gegebene Definition verdeutlicht:

„IWRM stellt einen Prozess dar, der die koordinierte Entwicklung und Bewirtschaftung von Wasser, Land und damit verbundene Ressourcen fördert, um das sich daraus ergebende wirtschaftliche und soziale Gemeinwohl auf gerechte Weise zu maximieren, ohne dabei die Nachhaltigkeit der vitalen Ökosysteme zu gefährden.“

Nowack und Günther (2009) nach Agarwal et al. (2000)

Zudem wurde das IWRM im Unterziel 6.5 in die SDGs aufgenommen (vgl. Tabelle 2.1), weshalb es ein zentrales Element zur Erreichung von Nachhaltigkeitszielen im Wassersektor ist. Im Konzept des IWRM werden weitere Sektoren, wie die Energiewirtschaft, private Haushalte oder die Landwirtschaft, jedoch lediglich als Bedarfspunkte interpretiert. Der Betrachtungsrahmen wird dabei auf die operative und taktische Ebene der koordinierten Bewirtschaftung von Wassereinzugsgebieten beschränkt (Keskinen et al. 2021). Implementierungsmechanismen zur koordinierten Bewirtschaftung von Wasserressourcen umfassen wasserwirtschaftliche Instrumente zur sektorübergreifenden Steuerung von Angebot und Nachfrage, wie z. B. Bedarfsanalysen und Allokationsstrategien, wobei Wassereinzugsgebiete ganzheitlich und über administrative Grenzen hinweg betrachtet werden (Keskinen et al. 2021).

⁷ Wechselwirkungen (engl. interdependencies) differenzieren sich im Zusammenhang von Nexus-Konzepten von Abhängigkeiten (engl. dependencies) durch das Vorliegen rückgekoppelter Ursache-Wirkungs-Beziehungen (Simpson und Jewitt 2019a).

Im WEN wird der integrierte Planungsansatz des IWRM aufgegriffen und der Betrachtungsrahmen um eine energiewirtschaftliche Perspektive erweitert. Abbildung 2.2 fasst die Charakteristika und Implementierungsmechanismen des IWRM zusammen und zeigt die durch das Konzept des WEN vorgenommene Perspektivenerweiterung gegenüber dem IWRM auf. Durch die Analyse der wechselseitigen Beziehungen zwischen dem Wasser- und dem Energiesektor lösen sich Nexus-Ansätze von der wasserzentrierten Sichtweise des IWRM und ermöglichen so die Erschließung von Zielsynergien in Bezug auf die SDGs und mögliche unerwünschte Rückkopplungseffekte auf die Biosphäre und die Gesellschaft (Smajgl et al 2016).

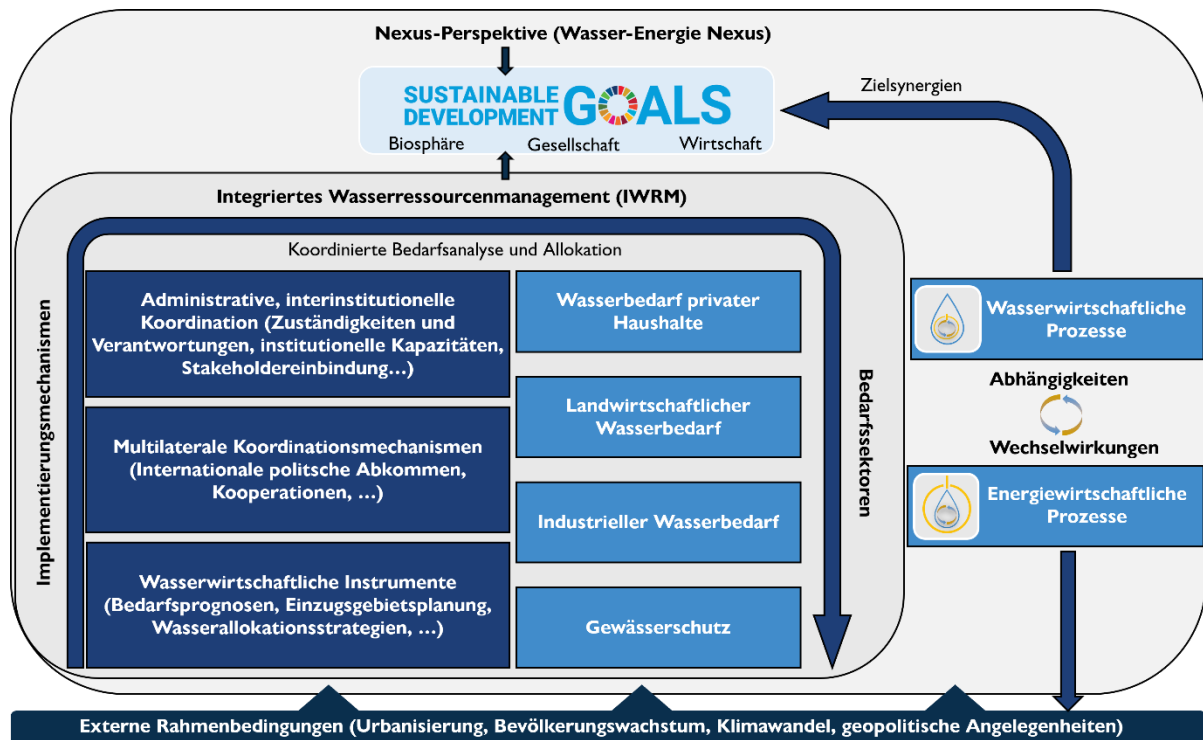


Abbildung 2.2: Verknüpfungen zwischen den Planungsansätzen im IWRM und im WEN

Quelle: Eigene Darstellung nach Hoff (2011), Agarwal et al. (2000) und Keskinen et al. (2021)

Aufgrund ihrer Perspektivenerweiterung sind Planungsansätze nach dem WEN ein ergänzender Baustein zum IWRM im Wassersektor. Sie helfen bei der Erarbeitung intersektoraler Zusammenhänge, der Antizipation künftiger Engpässe und Entwicklung von Handlungsmaßnahmen im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung. Handlungsmaßnahmen umfassen sowohl wasser- und energiewirtschaftliche Strategien, Technologien aber auch die Veränderung bestehender und Einführung neuer Prozesse. Das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) gibt daher sowohl das IWRM als auch den WEN als wesentliche Leitbilder für das Erreichen internationaler Nachhaltigkeitsziele aus. Der WEN wird vom BMZ wie folgt definiert:

„Bei diesem Ansatz werden Wechselwirkungen zwischen eng verbundenen Sektoren berücksichtigt (Nexus = lateinisch für Verbindung, Gefüge). Der Kerngedanke des Nexus-Ansatzes lautet: In Anbetracht von Ressourcenknappheit und unzureichender Versorgung müssen die Bewirtschaftung der Ressourcen Wasser, Energie und Land und die Sicherung der (Grund-)Versorgung durch die beteiligten Sektoren in Zusammenarbeit geplant und ausgeführt werden. [...] Mit einem gemeinschaftlichen Ressourcennutzungs- und Versorgungskonzept – dem Wasser-, Energie- und Ernährungssicherheits-Nexus – kann die Effizienz gesteigert und es können Synergien geschaffen und bei Engpässen faire Kompromisse ausgehandelt werden. Ganz im Sinne der Agenda 2030 soll dabei die Versorgungssicherheit in einem Sektor nicht auf Kosten anderer Sektoren erreicht werden. Der Nexus-Ansatz ist ein wichtiger Baustein für die Erreichung der international vereinbarten Nachhaltigkeitsziele.“

(BMZ 2023c)

Durch die integrierte Betrachtung wasserwirtschaftlicher und energiewirtschaftlichen Fragestellungen im WEN, z. B. bei der Allokation von Wasserressourcen oder der Kapazitätsplanung für Kraftwerke und Entsalzungsanlagen, können dynamische, langfristige Wechselwirkungen bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden (Zhang und Vesselinov 2016). Eine Betrachtung von Entscheidungsproblemen aus Perspektive des WEN bietet Entscheidungstragenden somit analytische Unterstützung zur Verbesserung der Ressourceneffizienz, zur Vermeidung unerwünschter Auswirkungen auf die natürliche Umwelt und die Gesellschaft sowie zur robusteren Gestaltung von Wasser- und Energieversorgungssystemen. Insbesondere in der betrachteten Region des Nahen Ostens besteht ein hohes Potenzial durch die Einnahme einer Nexusperspektive, z. B. durch die Berücksichtigung des Energieverbrauchs und die Auswahl geeigneter Energieträger bei energieintensiven Prozessen in der Wasserwirtschaft oder die Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser, um den Bedarf an Süßwasser aus energieintensiver MWE zu reduzieren (Whitman 2019). Zudem kann eine gemeinsame nationale oder transnationale Planung der Wasserinfrastruktur, die energetische Implikationen berücksichtigt, den Weg zu kohlenstoffarmen, kreislauforientierten und gerechteren Energie- und Wasserversorgungssystemen im Sinne der SDG und des Pariser Klimaabkommens ebnen (Oppenheimer et al. 2015).

Die Zielsetzung dieser Arbeit besteht daher in der Entwicklung eines Verfahrens zur multikriteriellen Bewertung von Handlungsmaßnahmen zur Behebung des Wasserdefizitproblems im Nahen Osten nach dem Leitbild des WEN. Gemäß dem Leitbild des WEN sollen bei der Erarbeitung und Bewertung dieser Handlungsmaßnahmen wesentliche intersektorale Zusammenhänge aufgezeigt und berücksichtigt werden, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

2.4 Intersektorale Beziehungen bei wasserwirtschaftlichen Entscheidungen

Die Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung und Verteilung von Süßwasser benötigen weltweit etwa 4 % des jährlichen Bedarfs an elektrischem Strom, was ca. 1000 Terrawattstunden (TWh) entspricht (IEA 2017). Zusätzlich werden ca. 600 TWh an thermischer Energie für diese technischen Aufgaben der Wasserwirtschaft benötigt. Sie sind in Abbildung 2.3 dargestellt. Wesentliche Energiebedarfsstellen des Wassersektors sind elektrische Antriebe aller Art für die Wasserförderung, für Armaturen oder für sonstige Einrichtungen, wie z. B. Verdichter, Gebläse, Rührwerke oder Zentrifugen (Baur et al. 2019, S. 385 ff.). Daneben wird Energie für weitere Prozesse zur Beseitigung von Verunreinigungen mittels Ozonung oder den Betrieb von Mess-, Steuer- und Regelungstechnik und ähnlichen Anwendungen benötigt (Baur et al. 2019, S. 386). In Tabelle 2.2 sind wesentliche Prozesse des Wassersektors und deren spezifischer Energiebedarf aufgeführt. Bislang entfällt der größte Teil des gesamten wasserwirtschaftlichen

Energiebedarfs auf Förderungsprozesse (Baur et al. 2019, S. 386). Der mittlere kumulierte Energieaufwand für die Bereitstellung eines Kubikmeters Süßwasser in einem Bedarfsbereich beträgt ca. 0,5 kWh/m³ (Plath und Wichmann 2009), wobei topografisch bedingt bei großen Förderhöhen auch Energieaufwände von über 1 kWh/m³ anfallen können (Baur et al. 2019, S. 385).

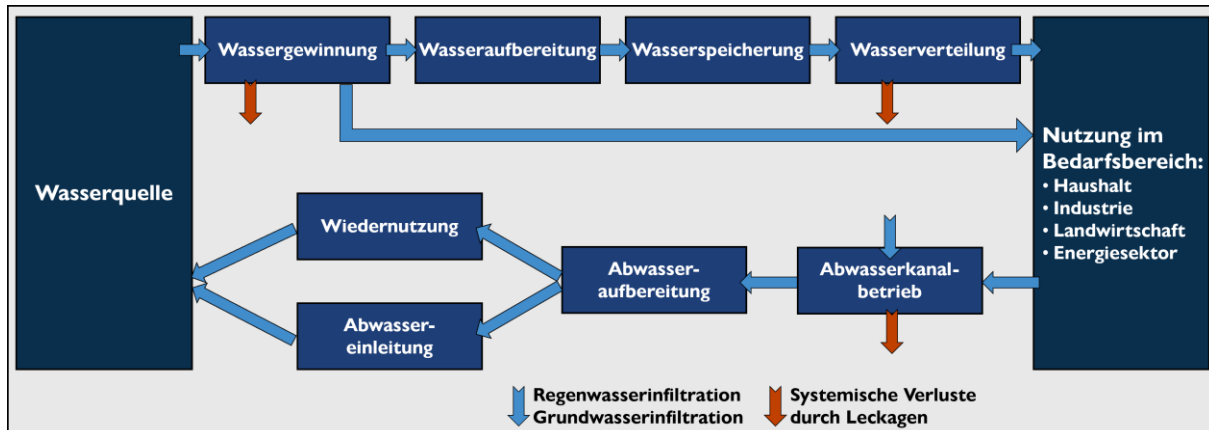


Abbildung 2.3: Technische Aufgaben der Wasserwirtschaft und Ressourcenströme

Quelle: Eigene Darstellung nach IEA (2017), Sanders und Webber (2012)

Bis zum Jahr 2050 wird, aufgrund des weltweiten Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstums, ein langfristiger Anstieg der globalen Süßwassernachfrage um mehr als 55 % erwartet. Dieser ist vor allem auf Nachfragesteigerungen in den Sektoren der Sachgüterproduktion (+400 % sektorale Nachfragesteigerung gegenüber 2014) und Energie (+140 %) sowie den privaten Haushalten (+130 %) zurückzuführen (Shahzad et al. 2017). Der starke Anstieg der Nachfrage könnte im Jahr 2050 die Wasserversorgung von mehr als der Hälfte der Weltbevölkerung gefährden, die voraussichtlich auf 9,4 bis 10,2 Milliarden Menschen anwachsen wird (+16 bis 26 % gegenüber dem Jahr 2023) (UN 2018; Burek et al. 2016). Dies stellt enorme Anforderungen an die Wasserwirtschaft, da zudem davon auszugehen ist, dass sich die Nachfragesteigerung auf Entwicklungsländer Afrikas und Asiens konzentriert, die bereits heute größtenteils unter Wasserstress leiden (Boretti und Rosa 2019).

Sind natürliche Süßwasserquellen in erreichbarer räumlicher Nähe nicht ausreichend vorhanden, muss der Bedarf durch weitere Methoden der Süßwassergewinnung, wie z. B. der MWE, gedeckt werden. Hierzu sind weltweit Anlagen mit einer installierten Produktionskapazität von 35,5 Milliarden Kubikmetern Süßwasser pro Jahr (m³/a) installiert und mindestens weitere 6,5 Milliarden m³/a bereits projiziert (Stand 2020, nach Eke et al. (2020); GWI (2020)). Es wird erwartet, dass die installierte Kapazität der MWE bis zum Jahr 2030 auf 54 Milliarden m³/a ansteigt und der Zubau sich insbesondere auf Länder in der Region des Nahen Ostens mit geringen Süßwasserreserven konzentriert (Shahzad et al. 2017; UN 2014). Sowohl die MWE als auch die weiteren Prozesse zur Gewinnung, Aufbereitung und Förderung von Frisch- oder Trinkwasser (Abbildung 2.3) sind auf die Verfügbarkeit von Energie angewiesen. Die Süßwassergewinnung aus Meerwasser mittels Entsalzungsverfahren ist jedoch besonders energieintensiv, da die Konzentration an organischen sowie anorganischen gelösten Feststoffen (engl. total dissolved solids, tds) erheblich reduziert werden muss. Selbst moderne Technologien, die auf dem Verfahren der Umkehrosmose basieren und nahe an der Untergrenze des thermodynamisch möglichen Energieaufwandes liegen, benötigen noch etwa 3 kWh Energie pro m³ Trinkwasser, das aus Meerwasser mit einem Feststoffgehalt von 35.000 Teilchen pro Million (engl. parts per million, ppm) gewonnen wird (Nassrullah et al. 2020).

Tabelle 2.2: Spezifische Energiebedarfe für verschiedene Prozesse des Wassersektors

Bedarfsbereich	Prozess	Spezifischer Energiebedarf
Wassergewinnung	<ul style="list-style-type: none"> Wassergewinnung aus Entsalzung von Brack- oder Meerwasser 	<ul style="list-style-type: none"> 2,2–8,5 kWh/m³ Gesamtenergie (kWh_{th} + kWh_{el}), je nach Verfahren
	<ul style="list-style-type: none"> Wasserförderung über technische Einrichtungen 	<ul style="list-style-type: none"> 0,4–0,6 kWh/m³ bei 100 m Förderhöhe
Wasseraufbereitung	<ul style="list-style-type: none"> Filtrationsverfahren (Aktivkohle-, Membran-, Oberflächenfiltration, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> 30–800 Wh/m³, je nach Verfahren
	<ul style="list-style-type: none"> Ozonung zur Entfernung von Mikroverunreinigungen (Hormone, Arzneimittel, Biozide, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> 7–60 Wh/m³
	<ul style="list-style-type: none"> Belüftung zum Gasaustausch und zur Oxidation 	<ul style="list-style-type: none"> 25–100 Wh/m³
Wasserspeicherung	<ul style="list-style-type: none"> Wasserförderung über technische Einrichtungen 	<ul style="list-style-type: none"> 0,4–0,6 kWh/m³ bei 100 m Förderhöhe
	<ul style="list-style-type: none"> Zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage; Stauhaltung von Pumpspeicherkraftwerken 	<ul style="list-style-type: none"> Kein Nettoenergiebedarf bei Pumpspeicherkraftwerken
Wasserverteilung	<ul style="list-style-type: none"> Wasserförderung über technische Einrichtungen 	<ul style="list-style-type: none"> 0,4–0,6 kWh/m³ bei 100 m Förderhöhe

Quelle: Eigene Darstellung nach Nassrullah et al. (2020), BFE (2004), DVGW (2010), Baur et al. (2019)

Daher sollten bei einer intensiven Nutzung der MWE zur Deckung des Süßwasserbedarfs, wie sie in Israel, Jordanien und Palästina geplant ist, auch die damit verbundenen Auswirkungen auf den Energiesektor berücksichtigt werden. So wird bereits heute mehr als ein Viertel des gesamten Energiebedarfs des Wassersektors für die MWE aufgewendet, obwohl damit nur 1 % des weltweiten Bedarfs an Süßwasser gedeckt werden kann (IEA 2017). Aufgrund des stark steigenden Bedarfs an energieintensiver MWE und den damit verbundenen Fördermaßnahmen zu den Bedarfspunkten wird bis zum Jahr 2040 sogar eine Verdoppelung des weltweiten Energiebedarfs für den Wassersektor erwartet (IEA 2017). Der prognostizierte absolute Energiebedarf für nicht entsalzungsinduzierte Wassergewinnung, -aufbereitung, -speicherung und -verteilung verbleibt dabei hingegen nahezu konstant (Bijl et al. 2016; Luck et al. 2015).

Für die in dieser Arbeit betrachtete Region des Nahen Ostens ist anhand der projektierten Entsalzungskapazitäten daher davon auszugehen, dass in naher Zukunft ein wesentlicher Teil des gesamten Endenergiebedarfs (>10 %) auf technische Einrichtungen zur MWE und Förderung des entsalzten Wassers entfallen wird (IEA 2017). Dies hat zur Folge, dass der Energiebedarf des Wassersektors in dieser Region einerseits absolut steigen wird. Andererseits wird er sich stark lokal konzentrieren und hohe Anforderungen an die lokalen Energiesysteme stellen. Im Hinblick auf Nachhaltigkeitsziele sind die Energieeffizienz und die Auswahl von Energieträgern und Energietechnologien daher zunehmend wichtige Faktoren bei der Auslegung technischer Anlagen im Wassersektor und insbesondere im Nahen Osten (Baur et al. 2019, S. 903 ff.). Darüber hinaus bedarf es insbesondere in Regionen mit großem Süßwasserdefizit,

wie der des Nahen Ostens, einer verstärkten intersektoralen Koordination, um den steigenden und stärker lokalisierten Anforderungen an den Energiesektor gerecht zu werden. Gleichzeitig sollten zur Vermeidung unerwünschter Wechselwirkungen nach dem Konzept des WEN, wie z. B. eines erhöhten Wasserverbrauchs infolge energiewirtschaftlicher Maßnahmen, die Auswirkungen von Entscheidungen im Energiesektor auf den Wassersektor untersucht werden. Diese werden deshalb im folgenden Abschnitt betrachtet.

2.5 Intersektorale Beziehungen bei energiewirtschaftlichen Entscheidungen

Die Internationale Energieagentur (engl. International Energy Agency, IEA) beschäftigt sich seit Beginn der 2010er Jahre zunehmend mit den Auswirkungen energiewirtschaftlicher Handlungen auf den Wassersektor. Im Jahr 2012 wurde erstmals die wechselseitige Beziehung zwischen den Ressourcen Wasser und Energie in den Jahresbericht aufgenommen und dem Wasserbedarf des Energiesektors dabei ein eigenes Kapitel gewidmet (IEA 2012). Die Analyse von intersektoralen Interdependenzen aus einer Nexusperspektive ist seitdem ein fester Bestandteil der von der IEA bearbeiteten Themen (IEA 2017, 2018). Insbesondere vor dem Hintergrund der weltweit zunehmenden Süßwasserknappheit wird die Ressource Wasser dabei als zunehmend wichtiges Kriterium herangezogen, um die physische, ökonomische und umweltbezogene Nachhaltigkeit von Energieprojekten zu beurteilen (IEA 2022b).

Um die qualitativen und quantitativen Auswirkungen von Entscheidungen im Energiesektor auf die Ressource Wasser zu untersuchen, wird die gesamte energiewirtschaftliche Wertschöpfungskette betrachtet (Abbildung 2.4). Die energiewirtschaftliche Wertschöpfungskette kann dabei in die Prozesse zur Erschließung von Primärenergieträgern sowie die Prozesse zur Energieumwandlung und Bereitstellung von Sekundärenergie in elektrischer und thermischer Form unterteilt werden. Am Ende der Wertschöpfungskette steht die Nutzungs- und Rückgewinnungsphase (IRENA 2015). Die Auswirkungen dieser Prozesse auf die Entnahme, den Verbrauch und die Qualität der Wasserressourcen werden durch die gewählten Energieträger, aber auch durch andere Faktoren wie die Wahl der Technologie oder die genutzten Wasserträger bestimmt.

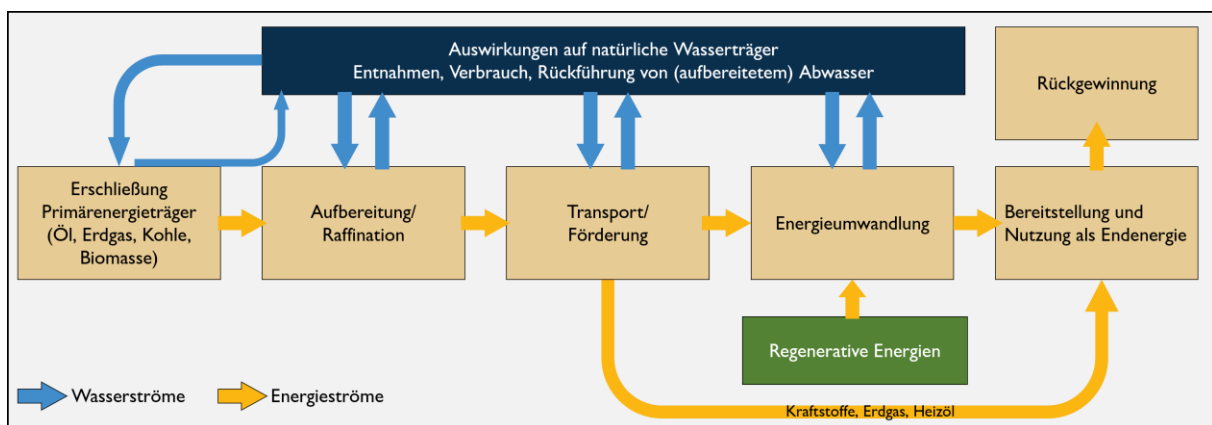


Abbildung 2.4: Energiewirtschaftliche Wertschöpfungskette und Auswirkungen auf Wasserressourcen
Quelle: Eigene Darstellung nach Water in the West (2013), IRENA (2015)

Bei der Erschließung von Primärenergieträgern wird Wasser vor allem als Kühlmittel im Abbau fossiler Energieträger eingesetzt (IEA 2012). Bei speziellen Gewinnungsverfahren, wie z. B. der hydraulischen Frakturierung, wird Wasser zudem als Betriebsmittel zur Durchführung von hydraulischen Bohrungen verwendet. Außerdem wird es als Förder- und Renaturierungsmedium im Tagebau benötigt. Neben

den quantitativ hohen Wasserentnahmen und -verbräuchen sind dabei zudem qualitative Umweltbeeinträchtigungen des Grund- und Oberflächenwassers, z. B. durch den Umgang mit wassergefährdenden Chemikalien oder die Freisetzung säurebildender Stoffe wie Eisen- und Schwefelsäure, möglich (Bormann et al. 2019).

Im Zuge der technologischen Umwandlung fossiler und nuklearer Primärenergie in Sekundärenergie wird Wasser insbesondere als Prozessmedium für Kühl-, Dampf- und Wärmekreisläufe eingesetzt. Neben der dafür notwendigen Entnahmen und Verbräuche bestehen Risiken für natürliche Wasserträger durch die direkte Einleitung von kontaminiertem beziehungsweise radioaktiv belastetem Abwasser oder dessen indirekter Wiederaufbereitung über den natürlichen Wasserkreislauf (IEA 2017). Darüber hinaus gefährdet die Erwärmung von Gewässern durch thermische Ableitungen, z. B. über Kühlwasser aus Kernkraftwerken, aquatische Ökosysteme und biochemische sowie physiologische Aktivitäten darin befindlicher Mikroorganismen (Caissie 2006).

Regenerative Energiequellen sind zunächst häufig frei verfügbar und erfordern nur minimalen Aufwand für Gewinnung, Umwandlung und Transport bzw. Übertragung. Ein weniger treibhausgasintensives Energiesystem ist jedoch nicht zwingend mit geringeren Wasserentnahmen und geringerem Wasserverbrauch verbunden. Technologien zur Bereitstellung von Sekundärenergie aus regenerativen Quellen haben sehr heterogene Auswirkungen auf natürliche Wasserträger, was die Notwendigkeit zur Differenzierung zwischen klimaneutraler und wasserschonender Energiewirtschaft verdeutlicht (IEA 2017). Die Energieumwandlung aus Windkraft und Photovoltaik (PV) weist einen geringen spezifischen Wasserbedarf auf, welcher sich im Wesentlichen auf die Produktion von Maschinen und Infrastruktur sowie Säuberungsarbeiten im Betrieb beschränkt. Solarthermische Kraftwerke und geothermische Kraftwerke hingegen können, je nach gewählter Kühl- und Kollektortechnologie, erheblichen Wasserverbrauch sowie eine starke Kontamination lokaler Wasservorkommen mit sich bringen (IEA 2012). Die Strombereitstellung aus Wasserkraft weist technologiebedingt grundsätzlich einen hohen Wasserbedarf auf. Der tatsächliche Wasserverbrauch ist hingegen stark variabel und ergibt sich aus Standortspezifika, wie dem lokalen Klima, der Bauweise des Reservoirs oder der Gestaltung der Triebwasserleitung. Wasserkraftwerke mit großer Stauhaltung weisen generell deutlich höhere spezifische Wasserverbräuche gegenüber Laufwasserkraftwerken mit geringeren Evaporationsverlusten auf (IEA 2012). Auch kann die Wasserkraft starke Auswirkungen auf lokale aquatische Ökosysteme haben (Quaschnig 2021, S. 365). Die Energiegewinnung aus Biomasse erfordert größere Mengen Wasser für den Anbau, die Verarbeitung und den Transport von Biomasse. Wie viel Wasser benötigt wird und wie stark die Auswirkungen auf natürliche Wasserträger sind, hängt vom Bewässerungsbedarf und weiteren Faktoren ab (Pflanzenart, lokale klimatische Bedingungen) (IRENA 2015). Darüber hinaus können Effizienz- und somit Klimabilanzverbesserungen bei fossilen Energietechnologien mit erhöhtem Kühlwasserverbrauch einhergehen (IEA 2017). Tabelle 2.3 fasst Verzahnungen der Energiewirtschaft mit dem Wassersektor sowie den potenziellen Konsequenzen zusammen.

Für die Region des Nahen Ostens sind insbesondere die Bereiche der Öl- und Gasgewinnung sowie die Umwandlung aus fossilen und regenerativen Quellen von Bedeutung. Seit Ende 2019 fördert Israel große Mengen Erdgas aus einem submarinen Gasfeld an der Mittelmeerküste und ist damit zu einem wichtigen Exporteur der Region geworden (NewMed Energy 2023). Jordanien verfügt nur über geringe eigene Vorkommen an fossilen Energieträgern und ist auf den Import von Erdöl und Erdgas aus Nachbarländern angewiesen, um den inländischen Energiebedarf zu decken (IEA 2022a; UNDP 2008). Langfristig weisen jedoch insbesondere die Solarthermie und PV erhebliches Potenzial auf, die Abhängigkeit vom Import fossiler Energieträger zu reduzieren (EIA 2023; Janowitz et al. 2022c).

Tabelle 2.3: Zentrale Verzahnungen der Energiewirtschaft mit dem Wassersektor

Bedarfsbereich	Prozess	Auswirkungen auf Wasserressourcen
Öl- und Gasgewinnung	<ul style="list-style-type: none"> Einsatz als Kühlmittel bei Bohrarbeiten Einsatz als Medium bei der hydraulischen Frakturierung (engl. <i>fracking</i>) Ölsandförderung im Tagebau oder untertägige Trennung von Kohlenwasserstoffen und Mineralfraktion Prozesswasser bei Raffinations- und Veredelungsprozessen 	<ul style="list-style-type: none"> Entnahme und Verbrauch für direkte Nutzung im jeweiligen Prozess Kontaminierung von Oberflächen- und Grundwasser durch Versickerung von Abraum Kontaminierung durch Anreicherung mit Bindemitteln und Öl bei hydraulischer Frakturierung
Kohleabbau	<ul style="list-style-type: none"> Als Schneidemedium, Kühlmittel und zur Staubbindung Als Medium zur Reinigung gewonnener Kohle Zur Renaturierung geschlossener Tagebauten Als Medium bei Transport von Schlammkohle über Rohrleitungen 	<ul style="list-style-type: none"> Entnahme und Verbrauch für direkte Nutzung im jeweiligen Prozess Kontaminierung von Oberflächen- und Grundwasser durch saures Grubenwasser Kontaminierung von Oberflächen- und Grundwasser durch Versickerung von Abraum
Herstellung von Biokraftstoffen	<ul style="list-style-type: none"> Bewässerung im landwirtschaftlichen Anbau Prozesswasser bei Aufbereitung landwirtschaftlicher Erzeugnisse zu Kraftstoffen. 	<ul style="list-style-type: none"> Entnahme und Verbrauch für direkte Nutzung im jeweiligen Prozess Erzeugung von mit Schadstoffen belastetem Abwasser bei Raffinerieprozessen Kontaminierung von Oberflächen- und Grundwasser durch Düngemittel und Pestizide
Umwandlung aus fossilen Energieträgern	<ul style="list-style-type: none"> Speisung von Dampf- und Heißwasserkesseln Kühlung von Dampfkondensatoren Prozesswasser zur Abgasreinigung. 	<ul style="list-style-type: none"> Anstieg oder Abfall der Temperatur des Oberflächenwassers (thermische Verschmutzung) Kontaminierung natürlicher Wasservorkommen durch direkte (z. B. Einleitung von Abwasser) oder indirekte Zuführung (z. B. Verdampfung) Veränderung aquatischer Ökosysteme
Umwandlung aus regenerativen Quellen	<ul style="list-style-type: none"> Speisung von Dampf- und Heißwasserkesseln Kühlung von Dampfkondensatoren Einsatz als Leitmedium bei solarthermischen Kraftwerken Energetische Nutzung im Wasser gespeicherter kinetischer Energie Als Energiespeichermedium bei Wasserkraftwerken mit Speicherbecken 	<ul style="list-style-type: none"> Anstieg oder Abfall der Temperatur des Oberflächenwassers (thermische Verschmutzung) Veränderung aquatischer Ökosysteme. Eingriff in das natürliche Flussverhalten von Wasserläufen Evaporationsverluste Aus Speicherbecken
Umwandlung von Kernenergie	<ul style="list-style-type: none"> Als Siedewasser im Reaktorblock Als Speisewasser zur Kühlung und Speisung des Reaktorblocks Als Medium im Kühlkreislauf 	<ul style="list-style-type: none"> Anstieg oder Abfall der Temperatur des Oberflächenwassers (thermische Verschmutzung) Kontaminierung natürlicher Wasservorkommen durch direkte oder indirekte Zuführung von radioaktiv belastetem Wasser

Quelle: Eigene Darstellung nach IEA (2012)

2.6 Zusammenfassung

Für eine nachhaltige Entwicklung ist der schonende Umgang mit natürlichen Ressourcen, insbesondere Wasser und Energieträgern, von zentraler Bedeutung. Die zunehmenden Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels erhöhen weltweit die Anforderungen an die Wasserversorgungssysteme und das Risiko lokaler Süßwasserknappheit. Zur Begrenzung des anthropogenen Klimawandels und zur langfristigen Erhaltung der Biosphäre als Grundlage für gesellschaftliches Wohlergehen und wirtschaftliches Wachstum ist darüber hinaus eine Umstrukturierung und Dekarbonisierung der Energiesysteme erforderlich.

Die im internationalen Konsens beschlossenen Ziele nachhaltiger Entwicklung der Vereinten Nationen und deren Unterziele formen normative Endpunkte für Entscheidungstragende bei der Gestaltung wasser- und energiewirtschaftlicher Handlungsmaßnahmen. Die SDGs 6 und 7 zielen darauf ab, möglichst vielen Menschen langfristig den Zugang zu Energie, Trinkwasser und sanitärer Grundversorgung zu ermöglichen. Sie werden auf nationaler Ebene in länderspezifische Nachhaltigkeitsstrategien überführt, deren Erreichung anhand von Indikatoren gemessen wird. Aus dem mehrdimensionalen Nachhaltigkeitskonzept und den daraus abgeleiteten SDGs ergeben sich Abhängigkeiten und Zielkonflikte zwischen den einzelnen Ansprüchen, so dass eine isolierte Betrachtung einzelner Ziele zu unerwünschten Auswirkungen in Bezug auf andere Ziele führen kann. Nexus-Ansätze adressieren solch komplexe umweltwissenschaftliche und entwicklungspolitische Fragestellungen deshalb durch Einnahme einer multisektoralen Perspektive. Im Wasser-Energie Nexus (WEN) werden Wasser- und Energieversorgung gemeinschaftlich unter der Berücksichtigung von Synergiepotenzialen und ungewünschten Wechselwirkungen geplant. Der Ansatz des WEN ergänzt damit sektorspezifische Ansätze, wie das des integrierten Wasserressourcenmanagements. Er wurde zudem im Vorfeld der UN-Konferenz für nachhaltige Entwicklung (Rio+20) im Jahr 2011 als Leitbild für die internationale Entwicklungspolitik im Wasser- und Energiesektor erarbeitet.

Nach dem Ansatz des WEN werden nicht nur strukturelle Analogien zwischen Wasser- und Energieversorgungssystemen untersucht, sondern ebenso deren funktionale Wirkungszusammenhänge. Durch Erarbeitung dieser intersektoralen Beziehungen zwischen wasser- und energiewirtschaftlichen Prozessen werden Synergiepotenziale identifiziert und bestehende Zielkonflikte aufgezeigt. Zudem werden Akteure aus verschiedenen Bereichen und Disziplinen wie Forschende, politische Entscheidungstragende, unterschiedliche Ingenieurdisziplinen und die Zivilgesellschaft zusammengebracht, um grenzüberschreitende Fragen des Ressourcenmanagements zu lösen. So können Handlungsmaßnahmen entwickelt werden, welche die Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit sektorübergreifend erhöhen. Im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung geht es dabei nicht allein darum, Angebot und Nachfrage von Wasser und Energie quantitativ auszugleichen und dabei eine gewisse wirtschaftliche Effizienz zu gewährleisten. Vielmehr ist der Wasser- und Energiesektor als Teil komplexer natürlicher und gesellschaftlicher Systeme zu betrachten, so dass neben einer technisch-ökonomischen Betrachtung auch umweltbezogene Auswirkungen und soziale Implikationen bei der Entscheidungsfindung explizit zu berücksichtigen sind.

Die Nexus-Ansätze erheben jedoch nicht den Anspruch, alle wechselseitigen Beziehungen zwischen den Sektoren Wasser und Energie vollständig und allgemeingültig zu erfassen und zu modellieren, was unlösbar wäre. Vielmehr geht es darum, ein gutes Verständnis der wichtigsten Wirkungszusammenhänge zu entwickeln, um möglichst fundierte und konsensfähige Entscheidungen mit klar definierten Grenzen zu treffen.

Wesentliche wechselseitige Beziehungen, d. h. Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen dem Wasser- und dem Energiesektor, wurden in den Abschnitten 2.4 und 2.5 aufgezeigt. Die Betrachtung dieser intersektoralen Beziehungen bietet wichtige Ansatzpunkte, um das Konzept des WEN in die praktische Entscheidungsfindung zu überführen. Insbesondere in Regionen mit zunehmendem Wasserstress gewinnt die Wechselbeziehung zwischen Wasser und Energie an Bedeutung, da häufig energieintensive Verfahren eingesetzt werden, um zusätzliches Süßwasser zu gewinnen und an Bedarfsorte zu fördern. Aus diesem Grund sollten in diesen Regionen bei einer intensiven Nutzung der MWE zur Deckung des Süßwasserbedarfs die Auswirkungen von wasserwirtschaftlichen Maßnahmen auf den Energiesektor nach dem Ansatz des WEN berücksichtigt werden, um eine effizientere Nutzung von Wasser- und Energieressourcen im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung zu ermöglichen.

Im Hinblick auf die Wasserdefizitproblematik in Israel, Jordanien und Palästina bietet der WEN deshalb einen geeigneten Ansatzpunkt zur Entwicklung und Bewertung von Handlungsmaßnahmen. Entscheidungsträger benötigen jedoch geeignete methodische Instrumente, um Handlungsmaßnahmen hinsichtlich ökologischer, gesellschaftspolitischer und ökonomischer Ziele gleichzeitig zu bewerten. Die Verfahren der multikriteriellen Entscheidungsanalyse sind in diesem Zusammenhang generell geeignet und werden bereits häufig bei Entscheidungsproblemen im Wasser- und Energiebereich eingesetzt (vgl. z. B. Diakoulaki et al. 2005; Greening und Bernow 2004; Hajkowicz und Collins 2007). Sie ermöglichen eine quantifizierte Bewertung der Konsequenzen von Handlungsmaßnahmen unter Berücksichtigung mehrerer Ziele, etwa aus den Bereichen der Ökonomie, Umwelt oder Politik, und können bei der Auswahl und Priorisierung von Handlungsmaßnahmen sowie der Budgetallokation unterstützen. Daher wird im folgenden Kapitel 3 in die multikriterielle Entscheidungsanalyse und zur Verfügung stehende Verfahren eingeführt. Wie in diesem Kapitel gezeigt wurde, sind die Entscheidungsprobleme im Rahmen des WEN darüber hinaus durch komplexe intersektorale Wechselwirkungen, durch Unsicherheiten und durch eine Vielfalt von beteiligten Akteuren gekennzeichnet. Zur Entwicklung von Handlungsmaßnahmen und zur Förderung eines kohärenten Problemverständnisses zwischen allen beteiligten Akteuren ist deshalb der ergänzende Einsatz weiterer methodischer Instrumente zweckmäßig. Diese, als problemstrukturierende Methoden bezeichneten Instrumente, werden ebenfalls erörtert, um im Anschluss ein Verfahren für die Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Behebung des Wasserdefizitproblems im Nahen Osten zu entwickeln (Kapitel 4).

3 MCDA und problemstrukturierende Methoden

Entscheidungen im Energie- und Umweltbereich sind oftmals nicht auf ein einziges Ziel beschränkt. Vielmehr sind sie komplex und vielschichtig, da unterschiedliche Aspekte und Interessen zu berücksichtigen sind, welche sich häufig gegenseitig beeinflussen und mitunter sogar konfliktieren. Wie anhand der SDGs als operationalisierte Ziele eines nachhaltigen Ressourcenmanagements ersichtlich wurde, sollten zu treffende Entscheidungen gleichermaßen den Erhalt der natürlichen Umwelt sowie gesellschaftliche Auswirkungen berücksichtigen und dabei wirtschaftlichen Anforderungen entsprechen. Neben Zielkonflikten kann die Entscheidungsfindung dabei zusätzlich einen multilateralen Konsens heterogener Interessensgruppen erfordern. Bei rein intuitiven Entscheidungen können aufgrund des kontextbedingten Komplexitätsgrades wichtige Informationen verloren gehen, Interessen nicht angemessen berücksichtigt und wesentliche Unsicherheiten ignoriert werden (Eisenführ et al. 2010, S. 1 ff.). Handlungsalternativen, die einer Interessensgruppe intuitiv als "rational" erscheinen, können von anderen Interessensgruppen als stark asymmetrisch empfunden und abgelehnt werden (Belton und Stewart 2002). Als Reaktion auf die zu beobachtende Unzulänglichkeit des Menschen, viele unterschiedliche Informationen effektiv zu verarbeiten und zu integrieren, wurden daher die Verfahren der multi-kriteriellen Entscheidungsanalyse (engl. multiple criteria decision analysis, MCDA) entwickelt (Keeney und Raiffa 1972). MCDA Verfahren basieren auf stärker formalisierten Rationalitätspostulaten für Entscheidungsprozesse, in denen der multikriterielle Charakter ein wesentliches Merkmal des Problems ist und dessen Lösung nicht allein der Intuition überlassen werden kann (Belton und Stewart 2002). Das Ziel der MCDA besteht darin nur scheinbar rationale Entscheidungen zu verhindern, deren Auswahl- und Bewertungsprozess jedoch von Inkonsistenzen und kognitive Verzerrungen geprägt ist (Belton und Stewart 2002). Während die Anwendung einer MCDA grundsätzlich auch dazu dient, ein Entscheidungsproblem zu strukturieren (Belton und Stewart 2002), ist für bestimmte Probleme oder Kontexte zusätzlicher Aufwand erforderlich, um die Entscheidungssituation in einem für die Durchführung der MCDA benötigten Maß aufzubereiten (Marttunen et al. 2017). Daraufhin hat sich in den späten 1990er Jahren unter dem Begriff der problemstrukturierenden Methoden (engl. problem structuring methods, PSM) eine Reihe von stärker formalisierten und fokussierten Ansätzen entwickelt, um solche komplexen oder schlecht strukturierten Entscheidungsprobleme effektiv zu strukturieren (Rosenhead 2013). Anwendungsfelder umfassen beispielsweise strategische Entscheidungen in der industriellen Produktion (Bana e Costa et al. 1999), in der öffentlichen Verwaltung (Ensslin et al. 2000), im Gesundheitswesen (Belton et al. 1997) und insbesondere die Entscheidungsprobleme mit multidisziplinären Ansprüchen des Energiebereichs (Wang et al. 2009) und des Umweltmanagements (Huang et al. 2011; Kiker et al. 2005).

Als Teilgebiet der Entscheidungstheorie bietet die MCDA eine Reihe von Verfahren zur Bewältigung des in dieser Arbeit betrachteten Entscheidungsproblems des WEN. In diesem Kapitel wird daher in Abschnitt 3.1 zunächst in die Entscheidungstheorie eingeführt und der Begriff der Rationalität definiert. In Abschnitt 3.2 werden darauf aufbauend Methoden der multi-kriteriellen Entscheidungsanalyse definiert, charakterisiert und klassifiziert, um einen Überblick über die grundsätzlich verfügbaren Verfahren zu geben und das gewählte Verfahren einordnen zu können. Der strukturierte Ablauf von MCDA Verfahren zur Problemstrukturierung und Bewertung von Handlungsalternativen wird in Abschnitt 3.3 vorgestellt. In diesem Zuge werden wesentliche Bestandteile von MCDA Verfahren klassifiziert, definiert und formal beschrieben. In Abschnitt 3.4 wird in die PSM eingeführt und Einbindungsmöglichkeiten von PSM in den Ablauf von MCDA Verfahren sowie deren spezifischer Nutzen für eine

MCDA erörtert. Die methodische Einbindung verschiedener Interessensgruppen mittels der Multi-Actor Multi-Criteria Analysis (MAMCA) und PROMETHEE, dem zur Bearbeitung des Entscheidungsproblems dieser Arbeit gewählten MCDA Aggregationsverfahren, wird in 3.5 erläutert. Das Kapitel endet mit einer Zusammenfassung in Abschnitt 3.6.

3.1 Einordnung der MCDA in die Entscheidungstheorie

Die Entscheidungstheorie gliedert sich nach Eisenführ et al. (2010) in zwei wesentliche Teilgebiete mit unterschiedlicher Zielstellung: einerseits in die empirische Forschung der deskriptiven Entscheidungstheorie zur Beschreibung des tatsächlichen menschlichen Entscheidungsverhaltens und andererseits in die Verfahren zur Organisation und Synthese multikriterieller Entscheidungssituationen der präskriptiven Entscheidungstheorie.

Die deskriptive Entscheidungstheorie, auch als empirisch-kognitive Entscheidungstheorie bezeichnet, will reales Entscheidungsverhalten mittels empirischer Überprüfung beschreiben, erklären und vorher sagen (Zimmermann und Gutsche 1991, S. 5 ff.). Innerhalb der deskriptiven Entscheidungstheorie wird somit untersucht, wie menschliche Entscheidungen in der Realität getroffen werden (Lerche 2016, S. 2 f.). Sie geht dabei von intendiert rationalem Verhalten aus, welches sich auf ein individuelles Werte-, Zielvorstellungs- und Verhaltensmodell bezieht (Langer und Rogowski 2009). Aufgrund der beschränkten Kapazität menschlicher Informationsverarbeitung kann es zu inkonsistenten Entscheidungen und Urteilen im Sinne einer Verletzung der intendierten Rationalität kommen (Zimmermann und Gutsche 1991). Der Begriff der kognitiven Verzerrungen (engl. cognitive bias) beschreibt solche systematisch fehlerhaften Muster im menschlichen Entscheidungsverhalten und Urteilsvermögen (Tversky und Kahneman 1974).

Die Verfahren der präskriptiven Entscheidungstheorie (im Englischen wird üblicherweise der Begriff *decision analysis* gewählt) sind ein Teilgebiet des Operations Research (OR) und haben zum Ziel dem Menschen in schwierigen, d. h. neuartigen, nicht routinisierten und nur schwer vorhersehbaren Entscheidungssituationen das Treffen möglichst rationaler Entscheidungen zu ermöglichen (Eisenführ et al. 2010, S. 4). Sie leiten bei der Gewinnung von Erkenntnissen über die jeweils konkret vorliegende Entscheidungsproblematik an und helfen Entscheidungstragenden bei der Aufdeckung ihrer eigenen Wertevorstellungen und denen weiterer beteiligter Akteure. Durch die Organisation, Synthese und differenzierte Präsentation der Erkenntnisse über das Entscheidungsproblem und dessen Komponenten mittels Verfahren der präskriptiven Entscheidungstheorie wird intuitives Entscheiden hinterfragt, ergänzt und die Rationalität von Entscheidungen erhöht (Belton und Stewart 2002).

Der Rationalitätsbegriff wird innerhalb der präskriptiven Entscheidungstheorie durch zwei Grundprinzipien konkretisiert. Eine rationale Entscheidung zeichnet sich nach Eisenführ et al. (2010, S. 5 ff.) dabei durch prozedurale Rationalität und Konsistenz aus. Prozedurale Rationalität bezieht sich auf den von Entscheidungstragenden zur Entscheidungsfindung gewählten Prozess und die Ausgestaltung von dessen Teilschritten (Munda 2003). Prozedurale Rationalität beinhaltet das Verfolgen eines systematischen und dem Ausmaß des Entscheidungsproblems angemessenen Ansatzes, die Nutzung verfügbarer Informationen und die Berücksichtigung von Verzerrungen und begrenzter Vorstellungskraft (Simon 1976). Ein rationaler Entscheidungsprozess untersucht ein Problem in klar abgegrenztem sinnvollem Umfang, wobei Aufwand zur Informationsbeschaffung und Bedeutung des Problems in angemessenem Verhältnis zueinander stehen und mögliche Unsicherheiten sowie kognitive Verzerrungen und deren Ursachen ausdrücklich Berücksichtigung im Prozess finden sollen (Eisenführ et al. 2010, S.

6). Das Grundprinzip der Konsistenz verlangt die ständige Übereinstimmung des Entscheidungsverhaltens mit den Anforderungen, deren Berechtigung Entscheidungstragende anerkennen und denen sie folgen wollen (Eisenführ et al. 2010, S. 7). Rationales Entscheidungsverhalten ist somit stringent zukunftsorientiert, transitiv, invariant und unabhängig von irrelevanten Handlungsalternativen. Insbesondere bei komplexeren Entscheidungsproblemen kann menschliches Entscheidungsverhalten in der Realität allerdings von verschiedenen kognitiven Verzerrungen und Heuristiken beeinflusst werden und systematisch von den Rationalitätspostulaten der Konsistenz abweichen (vgl. z. B. Tversky und Kahneman 1981).

Wenngleich die beiden entscheidungstheoretischen Teilgebiete der deskriptiven und präskriptiven Entscheidungstheorie zunächst grundlegend unterschiedliche Ziele verfolgen, fließen Erkenntnisse der deskriptiven Entscheidungstheorie⁸ daher maßgeblich und an unterschiedlichen Stellen in Modelle der präskriptiven Entscheidungstheorie ein, um kognitiven Verzerrungen methodisch zu begegnen (vgl. z. B. Eisenführ et al. 2010, S. 159 ff.). Einen Überblick über entscheidungsanalytisch relevante kognitive Verzerrungen sowie weiteren Verhaltenseffekten und Techniken zu deren Überwindung geben Montibeller und Von Winterfeldt (2015). Entscheidungsprobleme im Umweltbereich sind häufig mit Umständen behaftet, die irrationales Verhalten aufgrund kognitiver Verzerrungen begünstigen können (French und Geldermann 2005). Daher werden die Ursachen und der Umgang mit kognitiven Verzerrungen bei der Entscheidungsfindung (vgl. z. B. Pöyhönen und Hämäläinen 2000; Bell et al. 2001; Hämäläinen und Alaja 2008) oder damit verbundenen Modellierungsprozessen (Hämäläinen 2015) zunehmend untersucht.

3.2 Definition, Charakterisierung und Abgrenzung von MCDA Verfahren

Die Ziele nachhaltiger Entwicklung operationalisieren Nachhaltigkeitsbestrebungen und bieten damit auch Entscheidungstragenden im Kontext des WEN normative Ansatzpunkte. Das Konzept der nachhaltigen Entwicklung setzt gesellschaftliches Wachstum und Umweltschutz nicht in einen scharfen Gegensatz zueinander, sondern strebt die Harmonisierung und gleichzeitige Verwirklichung von wirtschaftlichem Wachstum, gesellschaftlichen Verbesserungen und Umweltbelangen an (Munda 2016). Aufgrund des wachsenden Bewusstseins für die Schwierigkeiten bei der Bewertung und Auswahl von Handlungsalternativen in Fragestellungen mit mehreren Zielgrößen und mehreren beteiligten Personen und Interessenseignern, wie beispielsweise denen im Umweltmanagement, wurden in den 1970er Jahren MCDA Verfahren als Teilgebiet der präskriptiven Entscheidungstheorie entwickelt (Zimmermann und Gutsche 1991; Linkov et al. 2004). Im Gegensatz zu den Verfahren der klassischen Nutzentheorie (vgl. z. B. Von Neumann und Morgenstern 2007) oder der mathematischen Optimierung (vgl. z. B. Dantzig 1963), in welchen eine Bewertung oftmals lediglich als eine reelle Zahl darstellbar ist und auf einer Zielgröße basiert, charakterisieren MCDA Verfahren verschiedene Handlungsalternativen anhand mehrerer Zielgrößen und durch wertende Vektoren oder über Generierung von Ordnungen (Zimmermann und Gutsche 1991).

Die MCDA ist als ein Prozess zur Auswahl, Kategorisierung oder Ordnung von Handlungsalternativen (kurz: Alternativen) aus einer Grundmenge durch Identifikation von entscheidungsrelevanten Zielen und Präferenzen beteiligter Interessensgruppen und Aufstellung eines Entscheidungsmodells zur Aggregation von Bewertungen der Alternativen hinsichtlich dieser Ziele und Präferenzen definiert (Cinelli

⁸ Siehe beispielsweise die Arbeiten von Tversky und Kahneman (1974) oder das deutschsprachige Einführungswerk in die Entscheidungspsychologie von Jungermann et al. (2010).

et al. 2020; Roy 1996). Die Zielgrößen werden zur Aufstellung des Entscheidungsmodells dabei konkretisiert und in Kriterien operationalisiert (Bouyssou 1990). Die Präferenzen werden in zwei Informationstypen eingeteilt (Brans und De Smet 2016; Bertsch 2008). Präferenzen drücken einerseits die relative Bedeutung der Kriterien im Hinblick auf das Entscheidungsproblem aus (sog. *inter-kriterielle* Präferenzen, teils auch Artenpräferenz) und andererseits die Bedeutungsstärke unterschiedlicher Kriterienausprägungen von Alternativen je Kriterium (sog. *intra-kriterielle* Präferenzen, teils auch Höhenpräferenz).

Die Anwendung der MCDA bietet dabei sowohl Möglichkeiten, den Entscheidungsprozess zu strukturieren (Pohl 2023; Gregory et al. 2012a; Belton und Stewart 2002), als auch Methoden für eine umfassende Entscheidungsempfehlung basierend auf dem Vergleich und der Analyse von Alternativen, z. B. über die Erstellung ordinaler Ordnungen, visueller Auswertungen und Verwendung von Robustheitsmaßen (Tsoukiàs 2007; Cinelli 2017; Stewart 2005). Das in dieser Arbeit behandelte Entscheidungsproblem ist unter anderem durch die Vielzahl und Heterogenität der möglichen Alternativen und beteiligten Akteure gekennzeichnet. Die MCDA kann dazu beitragen, den Entscheidungskontext offen zu legen und Alternativen zu generieren, die Kohärenz zwischen den verschiedenen Zielsetzungen beteiligter Akteure fördern und einen Rahmen für Diskussionen und der Erlangung eines gemeinsamen Problemverständnisses auf wissenschaftlich gefestigter Grundlage bieten (Roy 2016; Banville et al. 1998). Insbesondere Entscheidungsprobleme mit mehreren beteiligten Interessensgruppen sind aufgrund der Pluralität und möglichen Heterogenität an vorhandenen Zielen und Wertevorstellungen, unabhängig vom Problemkontext, bereits von multikriterieller Natur (Roy 2016). Eine grundlegende Charakteristik der MCDA ist daher die methodisch gestützte Überführung eines breiten Spektrums von Zielen und Wertvorstellungen der Akteure in ein ganzheitliches Entscheidungsmodell in einer Art und Weise, welche die originäre Information und deren intendierte Bedeutung im Hinblick auf das Gesamtproblem weitestgehend erhält (Bana e Costa und Pirlot 1997). Ferner erkennt die MCDA die Grenzen im Wunsch nach Objektivität an und ist bestrebt, an verschiedenen Stellen des Prozesses bewusst mit Subjektivität (Buchanan et al. 1998), Unschärfe (Geldermann et al. 2000) und Unsicherheiten (French 1995) in der Modellierung und Auswertung umzugehen, ohne den Anspruch zu erheben, diese vollständig eliminieren zu können (Roy 2016).

Mittlerweile steht innerhalb der Entscheidungstheorie eine Vielzahl etablierter MCDA Verfahren mit unterschiedlichen Charakteristika und methodischen Werkzeugen zur Verfügung (Greco et al. 2016). Eine Übersicht über mehr als 200 verschiedene MCDA Verfahren, deren Eigenschaften sowie die softwaregestützte Empfehlung eines geeigneten Verfahrens für ein gegebenes Entscheidungsproblem findet sich in Cinelli et al. (2022). Im folgenden werden wesentliche und häufig angewandte MCDA Verfahren grundlegend charakterisiert und repräsentativ vorgestellt.

MCDA Verfahren werden üblicherweise zunächst anhand des gewählten Ansatzes zur Lösung des Entscheidungsproblems in verschiedene Verfahrensklassen eingeteilt, wie in Tabelle 3.1 dargestellt. Die grundlegenden Unterschiede in den Charakteristika dieser drei wesentlichen Verfahrensklassen sind in Abbildung 3.1 verdeutlicht. Verfahren der Klasse des multiple objective decision making (MODM) betrachten ein Entscheidungsproblem als mathematisches Optimierungsproblem mit mehreren, simultan zu optimierenden Zielfunktionen (Bertsch 2008). Innerhalb des MODM werden die Verfahren nach dem Zeitpunkt der Erfassung von Präferenzinformationen im Verfahrensablauf und deren Skalenniveau klassifiziert (Hwang und Masud 2012). Der Lösungsraum wird durch Nebenbedingungen beschränkt und bestimmt die Menge zulässiger Alternativen. In der Regel werden die Zielfunktionen maximiert und die Menge zulässiger Alternativen besteht aus zusammenhängenden Teilmengen im euklidischen

Raum, d. h. es gibt unendlich viele Alternativen (Zimmermann und Gutsche 1991). Multi-Attribut Verfahren (engl. multiple attribute decision making, MADM) sowie Outranking Verfahren bieten hingegen Methoden zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen in Kontexten, in denen eine bevorzugte Option aus einer diskreten Menge von Handlungsalternativen anhand eines Präferenzmodells ausgewählt werden soll.

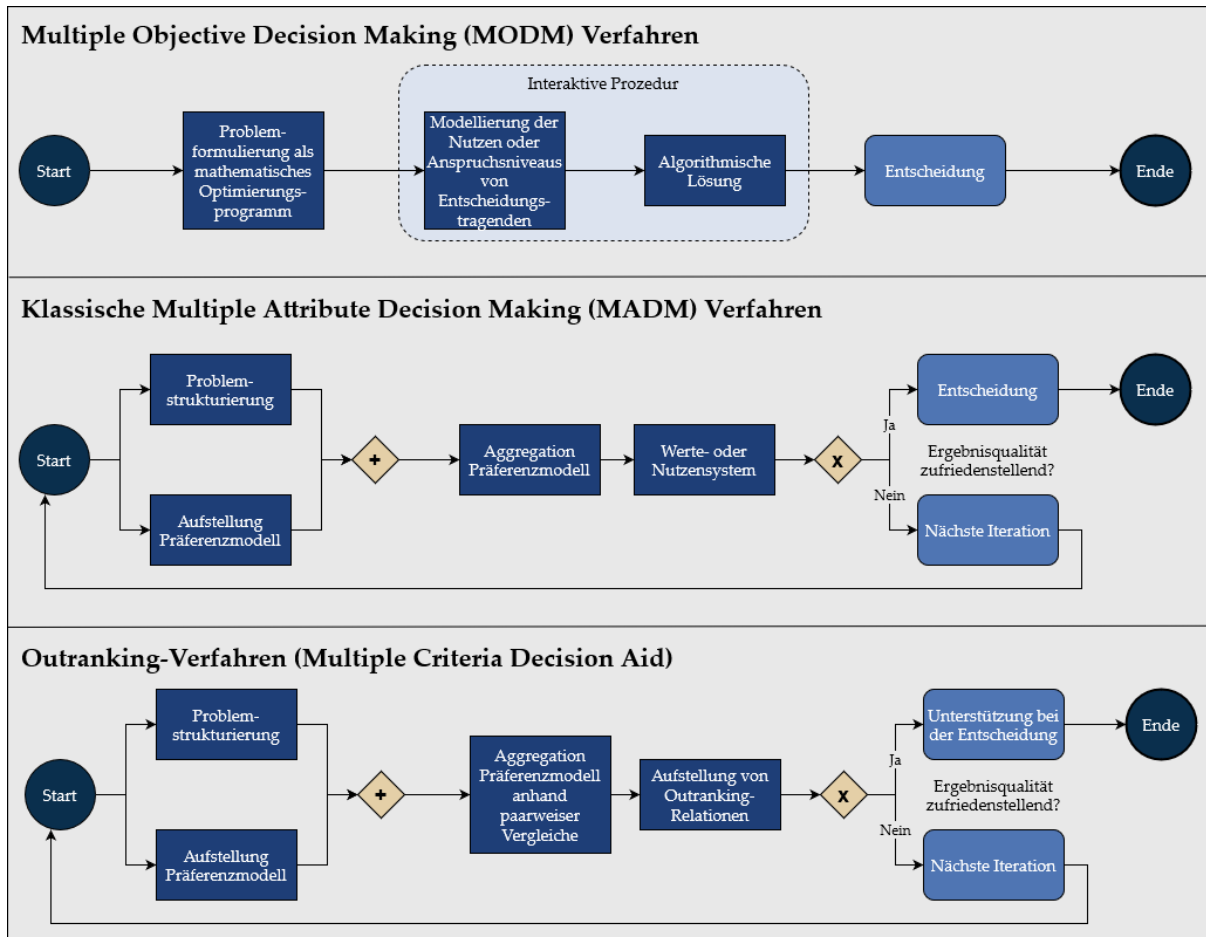


Abbildung 3.1: Charakteristika wesentlicher Verfahrensklassen der MCDA

Quelle: Eigene Darstellung nach Siskos et al. (2016)

Die Entwicklung der MADM und der Outranking-Methoden ist das Ergebnis unterschiedlicher Prämissen zur Präferenzmodellierung. MADM Verfahren⁹ basieren auf der Annahme, die Präferenzen von Entscheidungstragenden möglichst exakt erheben und abbilden zu können. Bei Verfahren der Multiple Attribute Value Theory (MAVT) geschieht dies über Wertefunktionen, bei den Verfahren der Multiple Attribute Utility Theory (MAUT) über Nutzenfunktionen. Hierbei wird zwischen Entscheidungssituationen unter Sicherheit beziehungsweise Unsicherheit (innerhalb der MAVT Verfahren) und Risiko (innerhalb der MAUT Verfahren) differenziert (Keeney und Raiffa 1993). Je nach Entscheidungssituation wird jedem Attribut für jede Alternative ein Teilwert oder ein Teilnutzen zugeordnet, der anschließend über alle Attribute zu einem Gesamtwert beziehungsweise Gesamtnutzen aggregiert wird. Die Aggregation kann durch gewichtete additive oder multiplikative Funktionen geschehen, wobei die Gewich-

⁹ Oftmals spricht man im Zusammenhang der MADM Methoden auch von der klassischen oder der amerikanischen Denkschule (Köksalan et al. 2016).

tung die *inter-kriteriellen* Präferenzen widerspiegelt. *Intra-kriterielle* Präferenzen werden über entsprechende Funktionen modelliert, welche von Entscheidungstragenden möglichst präzise zu erheben sind. Die *Utilité Additive* Methoden (UTA) basieren auf den MAUT Verfahren und zielen darauf ab, mittels ordinaler Regressionsmodelle die Genauigkeit der Präferenzmodellierung gegenüber den MAUT Verfahren zu verbessern (Jacquet-Lagrece und Siskos 1982). Der *Analytic Hierarchy Process* (AHP) von Saaty (1988) ist an die Nutzwertverfahren angelehnt und bestimmt anhand paarweiser Vergleiche und auf Basis einer vorgegebenen Skala von 1 bis 9 für jede Alternative einen Gesamtnutzenwert über gewichtete additive Aggregation. Der AHP ist jedoch lediglich an die Nutzwertverfahren angelehnt und legt daher nicht die grundlegenden Axiome des rationalen Entscheidens der präskriptiven Entscheidungstheorie zugrunde (Belton und Stewart 2002, S. 152).

Die *Outranking* Verfahren¹⁰ sind aus dem Diskurs um Prämissen der MADM Verfahren entsprungen (Guitouni und Martel 1998). So sei es bei nicht direkt quantitativ ermittelbaren Kriterienausprägungen in realen Entscheidungssituationen schwierig Präferenzen von Entscheidungstragenden methodisch exakt zu erfassen (Roy 1991). Zudem sind sich Entscheidungstragende nach Roy, insbesondere bei Vorliegen von Unsicherheit, ihrer Präferenzen möglicherweise nicht vollständig bewusst oder in der Lage, diese in der geforderten Weise zu artikulieren, so dass Informationen nicht in der gewünschten Güte zur Verfügung stehen und Rationalitätspostulate verletzt werden könnten. MCDA Verfahren sollten daher eher pragmatisch im Sinne von unterstützenden Werkzeugen mit ordnungsbezogenem anstatt aggregierendem Charakter betrachtet werden (Roy 1993). *Outranking* Verfahren stellen daher geringere kognitive Anforderungen an Entscheidungstragende und ermöglichen es durch paarweise Vergleiche von Alternativen, widersprüchliche Informationen in den Kriterienausprägungen und den Präferenzinformationen zu berücksichtigen. In der Ergebnisdarstellung können daher auch verschiedene Präferenzstärken (sog. Präferenzrelationen) ausgedrückt werden (Belton und Stewart 2002). Der Kerngedanke von *Outranking* Verfahren ist, dass eine Alternative in Bezug auf ein Kriterium nur dann einer anderen Alternative vorgezogen werden kann, wenn sie in Bezug auf dieses Kriterium besser abschneidet (Linkov et al. 2020, S. 8 f.).

Um den Charakter der *Outranking* Verfahren hervorzuheben und von den klassischen MADM Verfahren der amerikanischen Schule abzugrenzen, werden diese in der englischsprachigen Literatur häufig unter dem Begriff der *multikriteriellen Entscheidungsunterstützung* (engl. *multiple criteria decision aid*) geführt, während im Zusammenhang mit den klassischen Verfahren häufig von *multikriterieller Entscheidungsfindung* (engl. *multiple criteria decision making*) gesprochen wird (Zimmermann und Gutsche 1991). Die bekanntesten und am häufigsten verwendeten *Outranking* Verfahren sind die Methodenfamilien *Élimination et Choix Traduisant la REalité* (engl. *Elimination and Choice Translating Reality, ELECTRE*) von Roy (1991) und *Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations (PROMETHEE)* von Brans et al. (1986) (Belton und Stewart 2002, S. 233).

¹⁰ Auch als Verfahren der europäischen Schule bezeichnet (Roy und Vanderpooten 1996).

Tabelle 3.1: Klassifizierung von MCDA Verfahren und Methodenbeispiele

Verfahrensklasse	Charakterisierung	Methodenbeispiele	Referenzen
Multiple Objective Decision Making (MODM)	Präferenzerfassung a priori	Zielprogrammierung	Charnes et al. (1955)
	Präferenzerfassung a posteriori	ϵ -constraint Methode	Ehrgott und Ruzika (2008)
	Präferenzerfassung interaktiv	Tradeoff-Methoden	Kahraman et al. (2015)
		Fuzzy Programmierung	Miettinen et al. (2016)
	Keine Präferenzerfassung	Globalkriteriumoptimierung (GCM)	Rao (2019)
Multiple Attribute Decision Making (MADM)	Entscheidung unter (Un)sicherheit	Multi-Attribute Value Theory (MAVT)	Keeney und Raiffa (1993)
	Entscheidung unter Risiko	Multi-Attribute Utility Theory (MAUT)	Fishburn (1979)
		Utilité Additive Methoden (UTA)	Jacquet-Lagrezze und Siskos (1982)
	Paarweiser Alternativenvergleich	Analytischer Hierarchieprozess (AHP)	Saaty (1988)
Outranking Verfahren (Multiple Criteria Decision Aid)	Paarweise Alternativenvergleiche	ÉLimination et Choix Traduisant la REalité (ELECTRE)	Roy (1991)
		Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations (PROMETHEE)	Brans et al. (1986)

Quelle: Eigene Darstellung nach Greco et al. (2016)

3.3 Der strukturierte Ablauf und Taxonomie von MCDA Verfahren

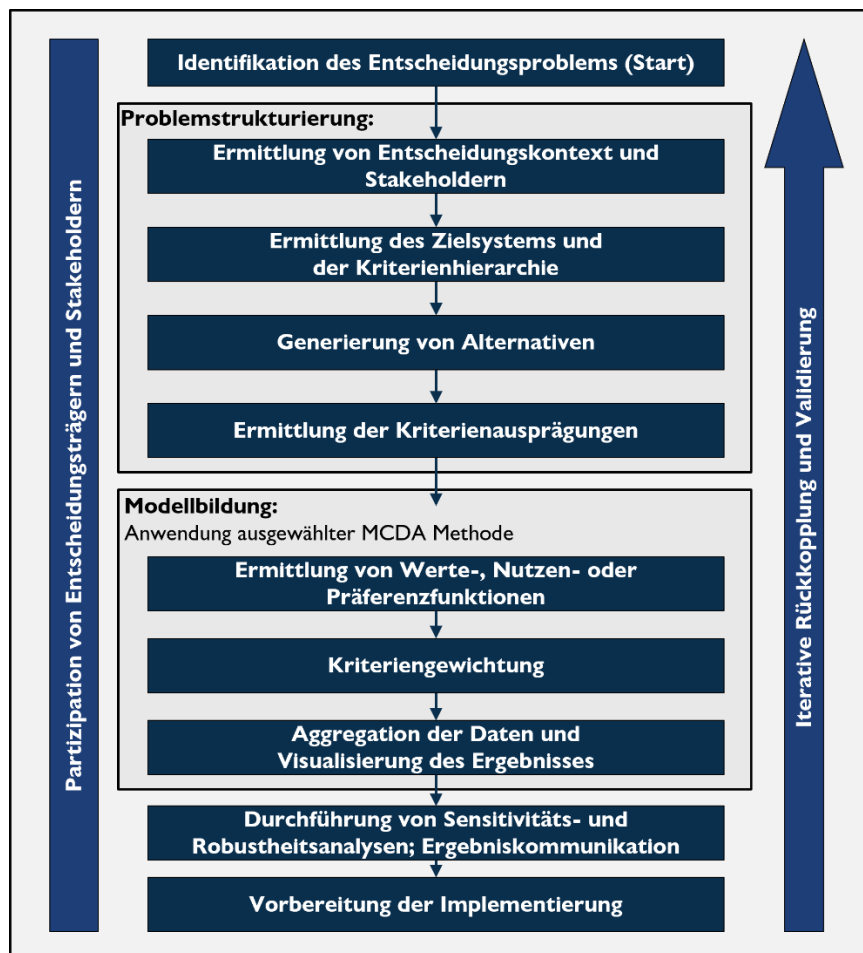


Abbildung 3.2: Ablaufschema der MCDA

Quelle: Eigene Darstellung nach (Belton und Stewart 2002, S. 6; Lerche 2016, S. 14)

Die strukturierte Anwendung der MCDA führt zu einer klaren und mathematisch korrekten Darstellung der wesentlichen Elemente eines Entscheidungsproblems. Ein solches Vorgehen schafft Klarheit für Entscheidungstragende und ermöglicht die Anwendung von Rechenoperationen, um auch bei komplexen Entscheidungsproblemen, wie denen im Kontext des WEN, eine möglichst objektive Integration der verfügbaren Informationen vorzunehmen und rational zu handeln (Linkov et al. 2020). Das in Abbildung 3.2 dargestellte Ablaufschema zeigt die wesentlichen Verfahrensschritte einer MCDA und deren Abfolge im Prozess der Entscheidungsunterstützung. Ausgehend von der Identifikation eines Entscheidungsproblems ist, je nach Komplexität, zunächst eine strukturierte Klärung des Kontextes und eine Konkretisierung der Bestandteile des Entscheidungsproblems erforderlich. Nach ihrer Formalisierung werden die Präferenzen modellgestützt durch Anwendung ausgewählter Aggregationsmethoden ermittelt. Das Schema hat einen stark iterativen Charakter und der Ablauf ist ausdrücklich als Orientierung und nicht als obligatorische Prozessfolge ausgelegt (Belton und Stewart 2002). Rückkopplungen sind explizit vorgesehen und sollten so lange vorgenommen werden, bis Entscheidungstragende mit dem Ergebnis zufrieden sind, d. h. ein gewünschtes Problemverständnis entwickelt haben, ihre Präferenzen als angemessen abgebildet erachten, alle wesentlichen Interessensgruppen berücksichtigt sehen und Implikationen von Handlungsempfehlungen bestimmen können (Pohl 2023, S. 44 nach; Roy und Mousseau 1996). Die einzelnen Verfahrensschritte werden in den folgenden Abschnitten genauer beschrieben.

3.3.1 Identifikation des Entscheidungsproblems

Der Prozess einer MCDA beginnt mit dem Wunsch von Entscheidungstragenden den Status quo eines Systems oder einer Situation verändern zu wollen (Zimmermann und Gutsche 1991). Das Entscheidungsproblem wird in Bezug auf Typ, Kontext und Grundstruktur beschrieben, jedoch noch nicht formal und quantitativ definiert (Linkov et al. 2020). Aussagen über Ziele und Bedürfnisse haben zu diesem Punkt der Analyse noch allgemeinen Charakter.

Hierbei wird nach Roy (2016) zwischen drei grundlegenden Typen von Entscheidungsproblemen unterschieden:

- *Ordnung* (engl. ranking): Erstellung von Präferenzrelationen für eine gegebene Menge von Alternativen. Die Ordnung kann partiellen (Unvergleichbarkeit von Alternativen auf gleicher Ordnungsstufe) oder vollständigen Charakter (Alternativen sind eindeutig nach absteigender Präferenz geordnet) haben.
- *Zuordnung* (engl. sorting): Alternativen werden vorausgewählten Präferenzkategorien zugewiesen, d. h. ordinal klassifiziert.
- *Selektion* (engl. choice): Auswahl der besten Alternative oder einer als gut erachteten Teilmenge von Alternativen, um die Identifikation einer zufriedenstellenden Alternative zu erleichtern.

Bei der Problemstellung dieser Arbeit handelt es sich im entscheidungstheoretischen Sinne um ein Ordnungsproblem, d. h. Maßnahmen zur Behebung des Wasserdefizitproblems im Nahen Osten, sind durch Ermittlung von Präferenzrelationen zur bewerten. Neben den hier betrachteten Typen werden an anderer Stelle in der Fachliteratur weitere Problemtypen, z. B. Clustering- oder Portfolioprobleme, aufgeführt (vgl. Bana e Costa et al. 1997; Almeida Dias 2011).

Je nach Entscheidungskontext kann sich die Menge der analysierten Alternativen aufgrund des iterativen Charakters der MCDA verändern. Eine dynamische Menge von Alternativen kann die Stabilität von relativen Bewertungen beeinflussen, so dass sich nach Hinzufügen oder Entfernen einer Alternative aus der Menge der betrachteten Alternativen die erlangten Präferenzrelationen verändern. Dieses Phänomen wird auch als Rangumkehr (engl. rank reversal) bezeichnet und kann innerhalb des AHP sowie den Outranking Verfahren ELECTRE und PROMETHEE auftreten (Cinelli et al. 2014). Eine mögliche Rangumkehr sollte daher bei der Problemlösung und Analyse beachtet werden, z. B. durch Zuordnungsverfahren auf Basis externer Referenzalternativen (Cinelli et al. 2020).

3.3.2 Problemstrukturierung

In den Verfahrensschritten zur Strukturierung des Problems wird das Entscheidungsproblem definiert und algebraisch beschrieben. Auf Basis einer Konkretisierung des Entscheidungskontextes werden Entscheidungstragende und weitere Interessensgruppen ermittelt. Die Definition des Entscheidungsproblems geschieht durch Identifikation von Zielen samt Überführung in Kriterien, der Spezifizierung konkreter Handlungsalternativen und Beurteilung der Alternativen hinsichtlich der Kriterien (Cinelli et al. 2020).

Belton und Stewart (2002) betonen, dass die Phase der Problemstrukturierung in einer Weise gestaltet werden sollte, die divergentes Denken stimuliert. Das Ziel einer effektiven Problemlösung besteht darin, die Komplexität eines Problems zu erfassen und auf explorativem Wege ein klares und einheitliches Problemverständnis zwischen den beteiligten Akteuren herzustellen.

3.3.2.1 Ermittlung von Entscheidungstragenden und Interessensgruppen

Der Verfahrensschritt der strukturierten Identifikation der am Entscheidungsproblem beteiligten Akteure und ihrer Ziele ist ein essentieller Bestandteil einer MCDA (Marttunen et al. 2017). Um das Entscheidungsproblem umfassend zu begreifen und die Alternativen angemessen zu bewerten, ist ein klares Verständnis der Ziele aller beteiligten Akteure wichtig. Zu den Akteuren zählen, neben den Entscheidungstragenden, auch andere Interessensgruppen, die in den Entscheidungsprozess einbezogen werden sollten oder deren Interessen berücksichtigt werden sollten. So sind bei Entscheidungsproblemen im Wasser- und Energiesektor typischerweise häufig zahlreiche privatwirtschaftliche und zivilgesellschaftliche Akteure oder Nichtregierungsorganisationen beteiligt.

Entscheidungstragende sind diejenigen, welche die Verantwortung zu dessen Umsetzung tragen (Belton und Stewart 2002, S. 14). Entscheidungstragende können Einzelpersonen, eine kleine Gruppe von Personen mit mehr oder weniger ähnlichen Zielen oder Personen, die im Namen einer großen Gruppe mit unterschiedlichen Interessen handeln, z. B. Politiker oder Unternehmensleitungen, sein (Belton und Stewart 2002). Interessensgruppen (engl. stakeholder) bezeichnen eine oder mehrere Personen die von den Konsequenzen einer Entscheidung betroffen sind oder sich betroffen fühlen und daher das Anliegen äußern, ihre Sichtweisen und Wertvorstellungen zu berücksichtigen (Schär und Geldermann 2021 nach ; French und Geldermann 2005).

Bei Vorliegen einer homogenen Gruppe von Akteuren mit geteilten Zielen kann der MCDA-Prozess direkt zur Ermittlung der endgültigen Entscheidung verwendet werden. Bei Entscheidungsproblemen mit divergierenden Zielen ist es jedoch wahrscheinlich, dass der Entscheidungsprozess eine Form der Verhandlung und der Suche nach einem Konsens oder Kompromiss beinhalten wird. Dies bedeutet einen zusätzlichen methodologischen Anspruch an den MCDA-Prozess, um die angemessene Integration der Ziele aller Beteiligten zu unterstützen, und erfordert ein Bewusstsein dafür, dass die Einbeziehung mehrerer Interessensgruppen auch eine ethische Frage in Bezug auf die Art und Weise, wie mit ihnen in einem MCDA-Prozess umgegangen wird, aufwirft (Banville et al. 1998). Die MCDA Methoden selbst enthalten keine speziellen Ansätze für diese Aufgabe, jedoch werden in der Fachliteratur eine Reihe methodischer Vorgehensweisen vorgeschlagen (Marttunen et al. 2017). Der Rückgriff auf bestehende Netzwerke und E-Mail-Verteiler (vgl. z. B. Lienert et al. 2015) kann ein nützlicher Ausgangspunkt für die Ermittlung von beteiligten Akteuren sein (Nordström et al. 2010). Weitere Methoden zur methodisch gestützten Ermittlung, Analyse und Einbeziehung von Akteuren in MCDA Verfahren stellen u. a. Eden und Ackermann (1998) oder Macharis et al. (2009) vor.

3.3.2.2 Ermittlung von Zielen und Aufstellung der Kriterienhierarchie

Die Ermittlung der Ziele der am Entscheidungsproblem beteiligten Akteure stellt einen wesentlichen Bestandteil einer MCDA dar (Laux et al. 2005). Ziele repräsentieren von Entscheidungstragenden angestrebte Zustände und sind die Grundlage für die Beurteilung und rationale Auswahl von Alternativen (Eisenführ et al. 2010, S. 35 ff.). Ein klares Bewusstsein über die einer Entscheidung zugrundeliegenden Ziele fördert das Erkennen von potenziell guten und bisher unbekanntem Alternativen und sollte daher vor Festlegung der betrachteten Alternativen ermittelt werden (Keeney 1992). Das entscheidungsrelevante Zielsystem sollte alle für das Entscheidungsproblem relevanten Gesichtspunkte widerspiegeln

und vollständig, redundanzfrei, präferenzunabhängig¹¹ sowie möglichst einfach und eindeutig sein (Eisenführ et al. 2010, S. 68; Pohl 2023), wobei Zielkonflikte zwischen den Zielen auftreten können.

Die Aufdeckung entscheidungsrelevanter Ziele kann einen hohen mentalen Aufwand erfordern, weshalb der Einsatz von Kreativitätstechniken (vgl. z. B. Keeney 2007) und ein systematisches Vorgehen zur Zielermittlung und dessen Konkretisierung empfohlen wird. Zur systematischen Konkretisierung von Zielen empfiehlt Keeney (1992) ein hierarchisches Vorgehen, wie in Abbildung 3.3 schematisch dargestellt. Per „top-down“ Verfahren wird zunächst ein allgemein gehaltenes Oberziel, (s. Abschnitt 3.3.1) formuliert (Morton und Fasolo 2009). Dieses wird schrittweise und beliebig oft in Unterziele gegliedert, bis der benötigte Detailgrad erreicht ist (Eisenführ et al. 2010, S. 70; Bouyssou 1990). Eine systematische und hierarchische Zielermittlung mit möglichst vielen an der Entscheidung beteiligten Personen verbessert das Problemverständnis durch eine konzeptionelle Gruppierung von Zielen, z. B. nach Nachhaltigkeitsdimensionen, und erleichtert die Handhabbarkeit großer Informationsmengen (Marttunen et al. 2018). Bei der Gliederung von Zielen sollten keine Unterziele herangezogen werden, die ihre Bedeutung ausschließlich aus der vermuteten Wirkung auf übergeordnete Ziele herleiten (sog. Mittel-Ziel-Relationen), da Mittel-Ziel-Relationen Annahmen über Wirkungszusammenhänge ausdrücken und keinen direkten Bezug zu den angestrebten Wunschzuständen der Entscheidungstragenden haben (Eisenführ et al. 2010, S. 63 ff.). Nach hierarchischer Aufspaltung der Ziele müssen konkrete Kriterien abgeleitet werden, anhand derer sich die Zielerreichung von Alternativen beurteilen lässt.

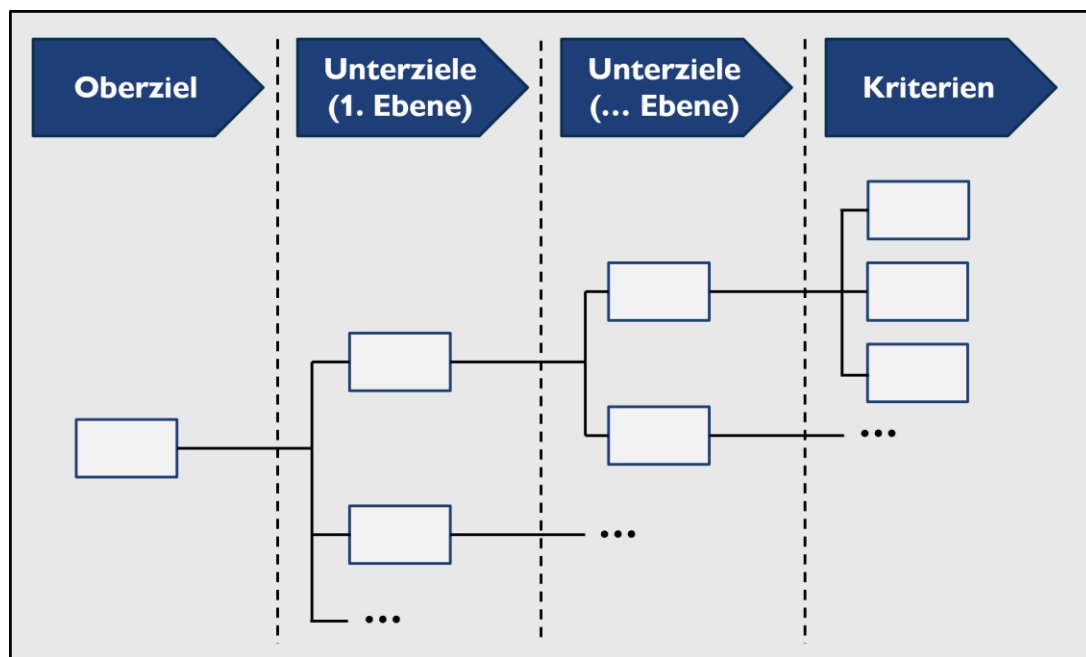


Abbildung 3.3: Strukturierte Ermittlung des Zielsystems und Aufstellung einer Kriterienhierarchie

Quelle: Eigene Darstellung nach Lerche (2016) und Keeney (1992)

Ein Kriterium, bezeichnet mit g , ist ein Instrument zur Bewertung und zum Vergleich potenzieller Maßnahmen im Hinblick auf ein bestimmtes Ziel (Roy 2016). Die Bewertung kann auf drei verschiedenen Skalentypen stattfinden, wobei die Wahl des Skalentyps für die anwendbaren Aggregationsmethoden

¹¹ Ein Ziel ist von den übrigen Zielen präferenzunabhängig, wenn die Präferenz von Entscheidungstragenden bzgl. der Alternativenbewertungen eines Ziels nicht durch die Bewertungen hinsichtlich der anderen Ziele beeinflusst wird (vgl. Eisenführ et al. 2010, S. 135).

(s. Abschnitt 3.3.3) und die Aussagekraft der erlangten Ergebnisse einer MCDA von großer Bedeutung sind (Roy 2016):

- **Ordinalskala (qualitativ):** Die Abstufungen in Bezug auf ein Kriterium lassen keine eindeutige Aussage über die Stärke der Präferenz zu. Bei verbalen Ordinalskalen kann die Präferenz zwischen aufeinanderfolgenden Abstufungspaaren (z. B. bei Wahl der Abstufungen „sehr gut, gut, schlecht“) stark variieren. Gleiches gilt bei numerischen Ordinalskalen (z. B. Schulnoten von 1 bis 6). Ein Unterschied von Schulnoten kann entlang der Skala in seiner Bedeutungsschwere variieren.
- **Kardinalskala (quantitativ):** Numerische Skala, dessen Abstufungen Bedeutungen zugeordnet werden können, da Abstufungen sich auf konkrete Maßeinheiten mit definiertem Nullpunkt beziehen und das Verhältnis zwischen Abstufungen klar bestimmbar und interpretierbar ist.
- **Intervallskala (Mischtyp):** Die Abstände zwischen Abstufungen lassen sich exakt bestimmen, jedoch existiert nicht zwingend ein Nullpunkt, so dass die Abstufungen nicht in einem klaren Verhältnis zueinander stehen (z. B. handelt es sich bei der Celsius-Temperaturskala um eine Intervallskala, wohingegen die Kelvin-Temperaturskala kardinal skaliert ist (Roy 1999). Für Kriterien, für die nur vage Informationen erhoben werden können oder bei denen die Informationen eine gewisse Variabilität aufweisen, werden in der MCDA häufig auf der Fuzzylogik basierende oder stochastische Skalentypen verwendet (vgl. Dias et al. 2012; Pelissari et al. 2021; Cinelli et al. 2020). Für weitere Mischtypen, die in praktischen MCDA Anwendung finden, siehe (Grabisch und Labreuche 2016; Martel und Roy 2005).

Die endliche Menge aller Kriterien G umfasst schließlich n Elemente, so dass:

$$G = \{g_1, g_2, \dots, g_j, \dots, g_n\}.$$

Kriterien sind die Grundlage für die Definition, Bewertung und Diskussion von Handlungsalternativen, wenn jedem Akteur hinreichend klar ist, wofür jedes einzelne Kriterium herangezogen wird. Jedes Kriterium wird somit von allen Akteuren als relevantes Instrument für den Vergleich potenzieller Maßnahmen auf der diesem Kriterium zugeordneten Skala und Maßeinheit anerkannt. Dabei wird zunächst noch nichts über die jeweilige Bedeutungsschwere eines Kriteriums ausgesagt (Cinelli et al. 2020).

Kriterien machen den Grad der Zielerreichung von Alternativen möglichst treffend und eindeutig messbar (Eisenführ et al. 2010, S. 74). In einigen Fällen (z. B. bei technischen oder monetären Zielen) ergibt sich ein quantifizierbares Kriterium mit direktem Zusammenhang zum entsprechenden Ziel durch die sukzessive Aufspaltung der Ziele. Findet sich kein Kriterium, welches den Grad der Zielerreichung direkt oder quantitativ messbar macht (dies ist häufig bei immateriellen Zielen wie z. B. der gesellschaftlichen Akzeptanz der Fall), können Proxy-Kriterien oder Indikatoren konstruiert werden, für die kein direkter Zusammenhang zu der eigentlichen Zielgröße besteht (Eisenführ et al. 2010, S. 75; Keeney und Gregory 2005). Das nun vollständige System aus hierarchisch aufgespalteten Zielen und operationalisierbaren Kriterien wird auch Kriterienhierarchie genannt (Corrente et al. 2016).

Da die Ausgestaltung der Kriterienhierarchie zu unbewussten, aber substanziellen Verzerrungen bei der Präferenzhebung führen kann, geben Marttunen et al. (2018) folgende generelle Empfehlungen zur Erstellung von möglichst verzerrungsresistenter Zielsysteme:

- **Prägnanz:** Die maximale Anzahl der Kriterien auf der untersten Ebene der Hierarchie sollte auf 13-15 begrenzt werden. Andernfalls sollten Möglichkeiten zur Vereinfachung der Hierarchie geprüft werden.

- *Aufstellung möglichst symmetrischer Hierarchien:* Asymmetrische Hierarchien spalten Ziele auf übergeordneten Ebenen in unterschiedliche viele Ziele auf untergeordneten Ebenen auf, was zu unerwünscht übermäßig starker Gewichtung der stärker aufgespaltenen Ziele führen kann (Hämäläinen und Alaja 2008; Lienert et al. 2016).
- *Aufstellung möglichst flacher Hierarchien:* Tiefe, stark aufgespaltene Zielsysteme mit einer großen Anzahl sind anfälliger für kognitive Verzerrungen als flachere Hierarchien. Je mehr Hierarchieebenen es gibt, desto mehr Urteile müssen Entscheidungstragende bei bestimmten Gewichtungsverfahren fällen. Zugleich sind Urteile auf höhergelagerten Hierarchieebenen kognitiv anspruchsvoller (Von Nitzsch und Weber 1993). Darüber hinaus erhöhen tiefe Hierarchien die Gefahr für Asymmetrie.
- *Positionierung ökonomischer Ziele:* Die Positionierung ökonomischer Kriterien in der Kriterienhierarchie kann große Auswirkungen auf deren Gewichtung haben. Ökonomische Ziele sollten daher möglichst auf den übergeordneten Ebenen im Zielsystem platziert und als eigener Zweig aufgespalten werden, um eine Trennung zwischen Kosten und Nutzen im Zielsystem sicherzustellen. Zudem sollte der Einfluss ökonomischer Kriterien auf die Ergebnisse der MCDA in der Sensitivitätsanalyse überprüft werden.
- *Konsistenzkontrolle:* Bei Anwendung eines hierarchischen Gewichtungsverfahrens sollte ein nachträglicher Abgleich der höchsten und niedrigsten Gewichtung im Zielsystem vorgenommen werden. Dieser Vergleich ist besonders wichtig, wenn die Anzahl der Ziele hoch ist und es mehrere Hierarchiezweige mit einer unterschiedlichen Anzahl von Teilzielen gibt.
- *Einsatz unterstützender Methoden:* Durch die Verwendung interaktiver und iterativer Verfahren zur Bestimmung der Gewichte, die eine Diskussion über die Gewichte ermöglichen, werden Inkonsistenzen aufgedeckt und das Risiko von Fehlern und Verzerrungen verringert (Marttunen und Hämäläinen 2008; Schuwirth et al. 2012). Dies sollte durch eine Aufklärung der Entscheidungstragenden über das eingesetzte Gewichtungsverfahren und die möglichen Arten kognitiver Verzerrungen im Rahmen gemeinsamer Workshops begleitet werden (Hämäläinen und Alaja 2008; Anderson und Clemen 2013).
- *Bewusster Umgang mit Zielspaltung:* Bei Verwendung nicht-hierarchischer Gewichtungsverfahren kann die Zusammenlegung oder Aufspaltung von Kriterien auf unterster Ebene im Zielsystem die Gewichtung des gesamten Zweiges der Kriterienhierarchie beeinflussen. Dies wird auch als *splitting bias* bezeichnet (vgl. u. a. Weber et al. 1988; Borchering und von Winterfeldt 1988). Bei hierarchischen Verfahren hingegen hat die Anzahl der Ziele auf übergeordneten Ebenen einen stärkeren Einfluss auf die Gewichtung. Insgesamt scheinen nicht-hierarchische Gewichtungsverfahren weniger anfällig für häufig auftretende kognitive Verzerrungen zu sein, auch wenn dies zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht hinreichend belegt ist (Marttunen et al. 2018).

3.3.2.3 Definition von Handlungsalternativen und Ermittlung von Kriterienausprägungen

Die MCDA wurde in Abschnitt 3.2 als ein Prozess zur Auswahl, Kategorisierung oder Ordnung von Handlungsalternativen definiert. Eine Alternative a beschreibt dabei eine potenzielle Wahlmöglichkeit aus der Menge aller verfügbaren Wahlmöglichkeiten A , die, je nach Typ des Entscheidungsproblems, Gegenstand des Entscheidungsproblems ist oder zu dessen Lösung beiträgt (Roy 2016). Eine Aussage über die tatsächliche Realisierbarkeit dieser Wahlmöglichkeit ist mit dieser Definition jedoch noch nicht verbunden, so dass z. B. auch hypothetische Alternativen mit ideellem Charakter Bestandteil einer MCDA sein können. Ebenso ist der Begriff „Alternative“ nicht im wörtlichen Sinne zu verstehen, so

dass sich Wahlmöglichkeiten nicht zwangsläufig gegenseitig ausschließen müssen (vgl. z. B. Salo et al. 2011; Roy 1996).

Je nach Art des Entscheidungsproblems und dessen Modellierung kann eine Alternative verbal spezifiziert sein, einen Vektor von Entscheidungsvariablen repräsentieren (vgl. Ehrgott und Gandibleux 2006) oder mehrstufig sein, d. h. aus einer Kombination von Wahlmöglichkeiten bestehen (vgl. Keeney 1994; Von Winterfeldt und Fischer 1975). Nach Gregory et al. (2012a, S. 152 ff.) gelten Alternativen als gut definiert, wenn sie die folgenden Eigenschaften erfüllen:

- *Vollständig*: Die Alternativen berücksichtigen alle wesentlichen Aspekte des Problems und basieren auf einheitlichen Annahmen, so dass sie direkt vergleichbar sind.
- *Zielorientiert*: Die Alternativen adressieren explizit und vorrangig die dem Entscheidungsproblem zugrundeliegenden Ziele der Entscheidungstragenden und bilden ein breites Spektrum möglicher Mittel zur Zielerreichung ab.
- *Spezifisch*: Die Alternativen sind hinreichend detailliert definiert, auf logisch konsistente Annahmen gestützt und lassen möglichst keine Mehrdeutigkeiten zu.
- *Kohärent*: Die Alternativen bestehen aus logisch zusammenhängenden Elementen, die in ihrer Gesamtheit geeignet sind, die Ziele eines Entscheidungsproblems wirksam und nachvollziehbar zu erreichen.
- *Facettenreich*: Die Menge aller Alternativen bietet Entscheidungstragenden eine tatsächliche Wahl zwischen klar differenzierbaren Möglichkeiten.

Bei einfachen Entscheidungsproblemen in alltäglichen Situationen sind gut definierte Alternativen oft aus dem Problemkontext vorgegeben. Bei komplexeren Entscheidungsproblemen hingegen, wie etwa im Umweltbereich oder der Planung von Wasserinfrastruktur, umfassen Alternativen eine Reihe voneinander abhängiger Maßnahmen, die gemeinsam mit den involvierten Akteuren erarbeitet werden müssen (Lienert et al. 2015). Zudem sollte nicht nur die Anzahl bereits bekannter Alternativen herangezogen werden. Wesentlicher Bestandteil einer MCDA ist das Aufdecken oder Entwickeln zuvor unbekannter Alternativen auf Grundlage der Ziele der Entscheidungstragenden (Gregory et al. 2012a, S. 154; Eisenführ et al. 2010, S. 83 ff.). Der Einsatz von Kreativitätstechniken stimuliert hierzu kreatives Denken und schafft eine Atmosphäre, in der involvierte Personen unbefangene neue Ideen in den Entscheidungsprozess einbringen können (vgl. z. B. Ackermann und Eden 2020; Clemen und Reilly 2013; Ferretti et al. 2019).

Innerhalb der klassischen MADM und Outranking Verfahren ist A eine diskrete Menge mit insgesamt m Alternativen, so dass:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_m\}.$$

Nach Festlegung der Kriterien und Definition der Alternativen wird jede Alternative $a \in A$ hinsichtlich jedes Kriteriums $g \in G$ bewertet. Die Bewertung von Alternative a hinsichtlich Kriterium g wird als Kriterienausprägung bezeichnet (Roy 2016). Formal wird eine Kriterienausprägung in dieser Arbeit mit $g(a)$ notiert. Die Maßeinheit von $g(a)$ entspricht der Maßeinheit des entsprechenden Kriteriums g . Zur Ermittlung der Kriterienausprägungen für das konkret vorliegende Entscheidungsproblem werden in der Literatur verschiedene Methoden und Verfahren vorgeschlagen, die dem Kontext des Entscheidungsproblems, der Datenverfügbarkeit und dem Skalenniveau des jeweils betrachteten Kriterium angepasst werden sollten (Cinelli et al. 2020). Als Ausgangspunkt können bereits vorhandene Daten, Li-

teraturrecherchen und öffentliche Datenbanken genutzt werden (Eigner-Thiel et al. 2013, S. 341 ff.). Zusätzlich können eigene quantitative Berechnungen oder qualitative Erhebungen notwendig sein (Pohl 2023). Für Entscheidungsprobleme im Kontext der Nachhaltigkeitsbewertung können z. B. Methoden der Ökobilanzierung (engl. life cycle assessment, LCA) zur Bestimmung von Kriterienausprägungen im Hinblick auf umweltbezogene Kriterien angewendet werden (vgl. z. B. Dias et al. 2019). Techno-ökonomische Analysen können technische Kriterienausprägungen bestimmen und über Investitionsrechenverfahren die Alternativen hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit beurteilen (vgl. z. B. Geldermann und Rentz 2004). Experteninterviews können ergänzend und unter Beachtung der zugrundeliegenden Datenqualität zur Bestimmung von quantitativen Ausprägungen verwendet werden (vgl. z. B. Geldermann et al. 2003). Weitere qualitative Verfahren, wie strukturierte Befragungen von Interessensgruppen, werden häufig zur Ermittlung von Kriterienausprägungen bezüglich der gesellschaftlichen Akzeptanz einer Alternative durchgeführt (vgl. z. B. Marttunen und Hämäläinen 2008).

Tabelle 3.2: Entscheidungstabelle eines endlichen Entscheidungsproblems in allgemeiner Form

	g_1	g_2	...	g_j	...	g_n
a_1	$g_1(a_1)$	$g_2(a_1)$	...	$g_j(a_1)$	...	$g_n(a_1)$
a_2	$g_1(a_2)$	$g_2(a_2)$	...	$g_j(a_2)$	...	$g_n(a_2)$
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\ddots	\vdots
a_i	$g_1(a_i)$	$g_2(a_i)$	...	$g_j(a_i)$	...	$g_n(a_i)$
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\ddots	\vdots
a_m	$g_1(a_m)$	$g_2(a_m)$	...	$g_j(a_m)$	...	$g_n(a_m)$

Quelle: Eigene Darstellung nach Brans und De Smet (2016), Pohl (2023)

Die ermittelten Kriterien, Alternativen und Kriterienausprägungen werden typischerweise in einer Entscheidungstabelle¹² zusammengefasst, in der in jeder Zeile eine Alternative und in jeder Spalte ein Kriterium aufgeführt ist und die Tabelleneinträge die Kriterienausprägungen enthalten, so dass sich die in Tabelle 3.2 aufgezeigte allgemeine Form ergibt. Die Entscheidungstabellen für das in dieser Arbeit behandelte Entscheidungsproblem sind in Abschnitt 5.2.3 gezeigt.

¹² teils auch als Entscheidungsmatrix bezeichnet (vgl. Lerche 2016, S. 18; Eisenführ et al. 2010, S. 46).

3.3.3 Anwendung einer MCDA Methode

In einer basalen Form der MCDA kann eine Entscheidungstabelle bereits das Endprodukt des Verfahrens sein, wenn es eine Alternative gibt, die in mindestens einem Kriterium besser als alle anderen Alternativen ist und in den weiteren Kriterien mindestens genauso gut ist (Dodgson et al. 2009, S. 21). In vielen Entscheidungsproblemen wird eine Alternative a_i in Bezug auf einige Kriterien jedoch besser sein als eine andere Alternative a_x , während Alternative a_x bei anderen Kriterien besser abschneidet als a_i . In solchen Fällen ist es schwierig die Kriterienausprägungen von a_i und a_x über alle Kriterien hinweg zu vergleichen und zu einem Gesamturteil zu gelangen. Entscheidungstragende haben dann zu beurteilen, in welchem Maße die Kriterienausprägungen einer Alternative ihren Zielen und Wünschen entsprechen. Die intuitive Lösung von Entscheidungstabellen dieser Art kann einerseits zwar schnell und effizient sein, aber auch zu ungerechtfertigten Annahmen führen und durch heuristische Denkstrukturen irrationales Handeln begünstigen (Tversky und Kahneman 1974), so dass nuanciertere Methoden benötigt werden.

Bei klassischen MADM- und Outranking Verfahren werden die Informationen aus der Entscheidungstabelle daher weiter verarbeitet. Über Werte-, Nutzen- und Präferenzfunktionen werden zusätzliche subjektive Informationen zur Bedeutungsstärke der unterschiedlichen Kriterienausprägungen aus Sicht der Entscheidungstragenden berücksichtigt. Durch die von Entscheidungstragenden erhobenen Kriteriengewichte wird die subjektive Wichtigkeit der Kriterien modelliert. Die Informationen der Entscheidungstabelle werden anschließend unter Berücksichtigung der individuellen Präferenzen von Entscheidungstragenden aggregiert und visualisiert. Abhängig von der gewählten MCDA Methode folgt das genaue Vorgehen bei der Modellierung und Aggregation zur Konstruktion einer Entscheidungsempfehlung einer unterschiedlichen Logik (vgl. z. B. Zimmermann und Gutsche 1991, Kap. 2 und Kap. 5). Je nach gewählter MCDA Methode ergeben sich so unterschiedliche Charakteristika in Bezug auf die Präferenzermittlung, das Kompensationsverhalten und die Art und Darlegungsform der Ergebnisse (Cinelli et al. 2020).

Generelles Ziel der Anwendung von MCDA Methoden ist die Ermittlung von zusammenfassenden Beurteilungen der Alternativen, in einer Form welche Rückschlüsse über

- die Präferenz einer Alternative gegenüber anderen Alternativen zulässt,
- die Abwesenheit von Präferenz einer Alternative gegenüber anderen Alternativen aufzeigt (Indifferenz), und
- darlegt, wenn es nicht möglich ist, anhand der verfügbaren Informationen Präferenzen für eine Alternative gegenüber anderen Alternativen zu ermitteln (Unvergleichbarkeit) (Roy 2016).

Zusätzlich kann ein Ausdruck über die relative Stärke der Beurteilung von Alternativen gewünscht sein, um die „Nähe“ zweier Alternativen zueinander beziehungsweise den „Abstand“ zwischen Präferenzen wiederzugeben (Moretti et al. 2016).

Dies geschieht durch die Aufstellung eines Präferenzmodells, welches es erlaubt, zwischen allen Paaren zweier Alternativen $a_i, a_x \in A$ anhand ihrer Kriterienausprägungen $g(a_i)$ bzw. $g(a_x)$ binäre Ordnungsrelationen zu bestimmen (vgl. Moretti et al. 2016; Pohl 2023). Ein Präferenzmodell ist ein auf eindeutigen Axiomen basierendes Modell, welches den Vergleich beliebiger Paare von Alternativen in klarer oder unscharfer Sprache formalisiert und Rückschlüsse auf das Vorliegen von Präferenz, Indifferenz oder Unvergleichbarkeit zulässt (Roy 2016). Ein Präferenzmodell wird jedoch nicht mit dem Anspruch er-

stellt, das gesamte Präferenzsystem der Entscheidungstragenden exakt und mittels eines deterministischen Verfahrens abbilden zu können. Vielmehr ist ein Präferenzmodell in der MCDA ein Werkzeug, um das Entscheidungsproblem mit den Entscheidungstragenden zu vertiefen, zu durchdringen und zu diskutieren (Roy 2016).

Eine Ordnungsrelation R auf die Menge A ist nach Moretti et al. (2016) eine Teilmenge des kartesischen Produktes $A \times A$. Dies entspricht somit einer Menge geordneter Tupel von Alternativen (a_i, a_x) mit $a_i, a_x \in A : R \subset A \times A$. Ein geordnetes Tupel (a_i, a_x) von R wird als $(a_i, a_x) \in R$ oder $a_i R a_x$ notiert.

Ordnungsrelationen R können u. a. folgende Eigenschaften besitzen (vgl. z. B. Moretti et al. 2016):

R ist <i>reflexiv</i> , falls	$a_i R a_i,$	$\forall a_i \in A$
R ist <i>symmetrisch</i> , falls	$a_i R a_x \rightarrow a_x R a_i,$	$\forall a_i, a_x \in A$
R ist <i>asymmetrisch</i> , falls	$a_i R a_x \rightarrow$ nicht $a_x R a_i,$	$\forall a_i, a_x \in A$
R ist <i>transitiv</i> , falls	$(a_i R a_x \text{ und } a_x R a_y) \rightarrow a_i R a_y,$	$\forall a_i, a_x, a_y \in A$
R ist <i>vollständig</i> , falls	$(a_i R a_x \text{ oder } a_x R a_i),$	$\forall a_i \neq a_x \in A$

Vollständigkeit und Transitivität gelten als grundlegende Axiome für ein rationales Entscheidungsverhalten (Eisenführ et al. 2010, S. 111).

Ein Präferenzmodell in der präskriptiven Entscheidungstheorie besteht aus einer Menge von Ordnungsrelationen auf einer Menge an Alternativen (Pohl 2023; Moretti et al. 2016). Es bildet die Einstellungen von Entscheidungstragenden zu Handlungsalternativen beziehungsweise zu deren Konsequenzen ab (Eisenführ et al. 2010, S. 35). Auf Basis der Eigenschaften von Ordnungsrelationen wird zwischen drei verschiedenen Präferenzrelationen differenziert, die einen Vergleich des Tupels der Alternativen $a_i, a_x \in A$ und damit die Bildung eines Präferenzmodells ermöglichen (vgl. z. B. Eisenführ et al. 2010, S. 35; Dyer 2016):

- *Strikte Präferenz*: a_i wird gegenüber a_x präferiert. Notiert als $a_i > a_x$.
- *Indifferenz*: Weder Präferenz für a_i noch für a_x , d. h. weder $a_i > a_x$ noch $a_x > a_i$ gilt. Notiert als $a_i \sim a_x$.
- *Schwache Präferenz*: a_i wird mindestens so stark präferiert wie a_x , d. h. $a_i > a_x \cup a_i \sim a_x$. Notiert als $a_i \succcurlyeq a_x$.

Die Präferenzrelation der strikten Präferenz gilt als konsistent, wenn sie für alle Tupel $a_i, a_x \in A$ asymmetrisch ist, d. h. es gibt kein Tupel, für welches $a_i > a_x$ und $a_x > a_i$ gilt. Zudem sollte eine strikte Präferenz *negativ transitiv* sein. D. h., eine dritte Alternative a_y sollte in eine bestehende binäre Ordnungsrelation $a_i > a_x$ eingeordnet werden können, so dass entweder $a_i > a_y$ oder $a_y > a_x$ oder beides gilt (Dyer 2016). Asymmetrische und negativ transitive Ordnungsrelationen eines Präferenzmodells werden auch als schwache Präferenzordnungen bezeichnet. Wenn die Präferenzrelation der strikten Präferenz also eine schwache Ordnung ist, dann lässt sich für Entscheidungstragende eine eindeutige Rangfolge von Alternativen ermitteln (Dyer 2016). Die Präferenzrelation der Indifferenz ist transitiv, reflexiv ($a_i \sim a_i, \forall a_i \in A$) und symmetrisch ($a_i \sim a_x \rightarrow a_x \sim a_i$). Die Präferenzrelation der schwachen Präferenz ist transitiv und vollständig, d. h. für zwei Alternativen a_i und a_x gilt entweder $a_i \succcurlyeq a_x$ oder $a_x \succcurlyeq a_i$. Weiteres zu den Eigenschaften der Präferenzrelationen findet sich u. a. in Bouyssou und Pirlot (2016) und Fishburn (1979, S. 9 ff.).

Zur Aufstellung des Präferenzmodells verwenden die klassischen MADM Verfahren und Outranking Verfahren jeweils verschiedene Ansätze. Klassische MADM Verfahren (vgl. Abschnitt 3.2 und Greco et al. 2016, Kap. 8–10) aggregieren die Kriterienausprägungen $g_1(a_i) \dots g_n(a_i)$ sowie subjektive Informationen der Entscheidungstragenden anhand von formalisierten Regeln zu einem synthetisierenden und normalisierten numerischen Wert v für jede Alternative $a_i \in A$. In allgemeiner Form kann v wie folgt ausgedrückt werden:

$$v(a_i) = V[g_1(a_i), \dots, g_n(a_i)] \quad (3.1)$$

Die Präferenzbeurteilung von Alternativen wird anhand der Höhe des Wertes $v(a_i)$ vorgenommen. Eine Ordnungsrelation für das Tupel der Alternativen (a_i, a_x) lässt sich durch Vergleich von $v(a_i)$ und $v(a_x)$ erstellen (Roy 2016).

Outranking Verfahren verwenden einen Aggregationsansatz, bei dem nicht jede Alternative $a_i \in A$ getrennt von den weiteren Alternativen aus A betrachtet wird. Stattdessen wird jede Alternative a_i sukzessive paarweisen Vergleichen mit allen weiteren Alternativen a_1, \dots, a_m unterzogen. Im Zuge eines paarweisen Vergleichs (a_i, a_x) werden sämtliche Kriterienausprägungen beider Alternativen, $g_1(a_i) \dots g_n(a_i)$ und $g_1(a_x) \dots g_n(a_x)$, sowie subjektive Informationen der Entscheidungstragenden aggregiert, um zu einer binären Ordnung der beiden betrachteten Alternativen zu gelangen (Roy 2016). Zudem können die binären Ordnungen aller möglichen paarweisen Vergleiche innerhalb der Menge A zu einem Präferenzmodell aller Alternativen synthetisiert werden.

Weitere Charakteristika in Bezug auf die Präferenzermittlung, das Kompensationsverhalten und die Art und Darlegungsform der Ergebnisse dieser zwei unterschiedlichen Aggregationsansätze werden im Folgenden weiter herausgestellt, um anschließend ein MCDA Verfahren zur Lösung der Entscheidungsproblematik dieser Arbeit auszuwählen.

3.3.3.1 Erhebung intra-kriterieller Präferenzinformationen

Das aufzustellende Präferenzmodell basiert auf zwei wesentlichen Komponenten: (1) den *intra-kriteriellen* und (2) den *inter-kriteriellen* Präferenzinformationen, welche als Parameter in den Aggregationsprozess der gewählten MCDA Methode eingehen.

Intra-kriterielle Präferenzinformationen modellieren die Höhenpräferenz, d. h. wie jede Alternative bezüglich der einzelnen Kriterien abschneidet, und ermöglichen die Transformation der Kriterienausprägungen in unterschiedlichen Maßeinheiten auf ein einheitliches Skalenniveau (French 2000; Belton und Stewart 2002). Sie drücken aus, wie stark eine Alternative gegenüber einer anderen Alternative in Bezug auf ein Kriterium bevorzugt wird (Lerche 2016). Zur Ermittlung intra-kriterieller Präferenzen werden je nach gewählter MCDA Methode entweder Werte-, Nutzen- oder Präferenzfunktionen zusammen mit den Entscheidungstragenden ermittelt (Belton und Stewart 2002, S. 86).

Die Nutzen- und Wertefunktionen in den Verfahren der Multiple Attribute Value Theory (MAVT) beziehungsweise Multiple Attribute Utility Theory (MAUT) werden somit für jedes Kriterium j bestimmt und sind auf einer Skala von 0 bis 1 definiert (Bertsch 2008, S. 18):

$$v_j: \begin{cases} \mathbb{R} \rightarrow [0,1] \\ g_j(a) \rightarrow v_j(g_j(a)) \end{cases} \quad \forall a \in A, g_j \in G \quad (3.2)$$

Ein Wert von 1 entspricht der bestmöglichen Beurteilung einer Alternative hinsichtlich eines Kriteriums, ein Wert von 0 entspricht der schlechtesten Beurteilung. Man spricht daher bei v_j auch von Einzelwert- beziehungsweise Einzelnutzenfunktionen (Eisenführ et al. 2010, S. 131). Der Funktionsverlauf

von v_j wird typischerweise über Befragungen modelliert, in denen Entscheidungstragende Präferenzaussagen zu fiktiven Alternativen mit unterschiedlichen Kriterienausprägungen hinsichtlich eines Kriteriums treffen (Pöyhönen et al. 2001). In der Regel ist v_j eine stetige, monoton konkave oder konvexe Funktion, deren genauer Verlauf frei modellierbar ist (Keeney und Raiffa, 1993). Lineare Funktionen eines Kriteriums repräsentieren dabei eine zunehmende beziehungsweise abnehmende Präferenz für Alternative a bei Zunahme der Kriterienausprägung $g_j(a)$, wie in Abbildung 3.4 beispielhaft dargestellt. Da v_j auf das Intervall $[0, 1]$ definiert ist, sollte der Ursprung der Funktion in der geringsten beobachteten Kriterienausprägung (g_j^{min}) liegen und bis zur höchsten beobachteten Kriterienausprägung (g_j^{max}) definiert sein (Bertsch 2008, S. 18 f.). Die Funktionsgrenzen können jedoch auch bewusst etwas breiter gewählt werden, so dass bei neu hinzukommenden Alternativen, deren Kriterienausprägungen außerhalb von $[g_j^{min}, g_j^{max}]$ liegen, keine nachträgliche Normierung notwendig ist (Eisenführ et al. 2010, S. 131).

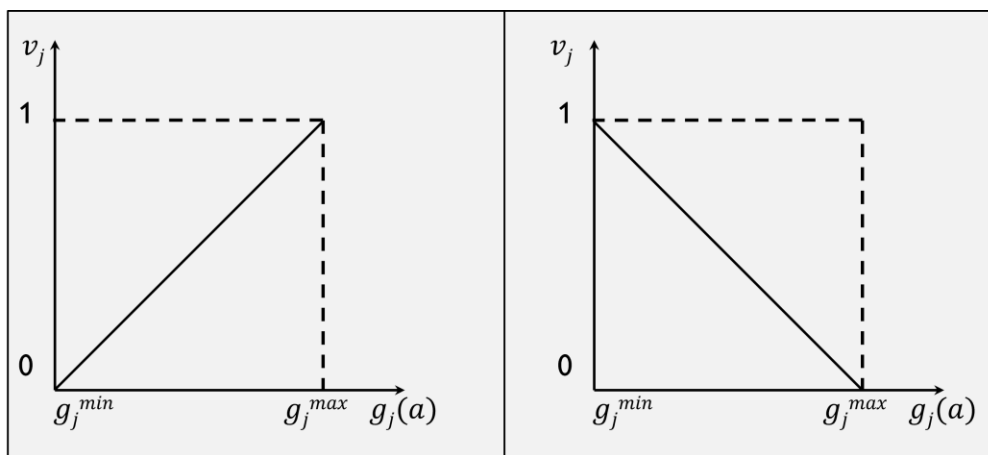


Abbildung 3.4: Einzelwertfunktionen mit linearem Verlauf

Quelle: Eigene Darstellung nach Bertsch (2008)

Darüber hinaus gibt es keine weiteren Anforderungen zur Modellierung der Einzelwert- beziehungsweise Einzelnutzenfunktionen, solange sie die Präferenzen von Entscheidungstragenden möglichst adäquat modellieren (s. Abschnitt 3.2). In der Praxis werden häufig monoton steigende oder fallende exponentielle Funktionstypen verwendet (Bertsch 2008, S. 19; Kirkwood 1997). Für komplexe Entscheidungsprobleme im Umweltbereich werden jedoch auch Funktionen, die sich an keiner vorab spezifizierten Funktionsformen orientieren, verwendet, um der Modellierung von Unsicherheiten angemessen gerecht zu werden und Kompensation zu verhindern (vgl. z. B. Haag et al. 2019a). Nutzenfunktionen werden unter Risiko verwendet, d. h. wenn die Eintrittswahrscheinlichkeiten der mit einer Handlung verbundenen Konsequenzen bekannt sind. Wertefunktionen hingegen beziehen sich auf Situationen der Ungewissheit, in denen die Konsequenzen einer Entscheidung von Umwelteinflüssen abhängen, die Entscheidungstragende nicht vollständig determinieren können (Eisenführ et al. 2010, S. 23). Der AHP ermittelt Präferenzen durch paarweise Vergleiche von Alternativen auf intra-kriterieller Ebene. Die Stärke der Präferenz wird dabei auf einer Verhältnisskala zwischen 1 und 9 ausgedrückt (Saaty 1988).

Die Outranking Verfahren der Methodenfamilie PROMETHEE ermitteln die Präferenzstärke bei paarweisem Vergleich von Alternativen im Hinblick auf ein Kriterium j über Präferenzfunktionen. Hierfür stehen sechs generische Typen mit jeweils unterschiedlichem Funktionsverlauf zur Verfügung, wie in Tabelle 3.3 dargestellt. Im Unterschied zu den klassischen MADM-Verfahren ist somit nicht die gesamte

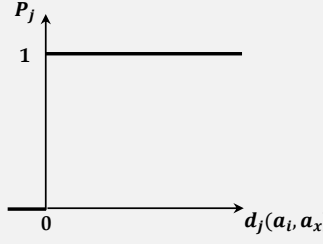
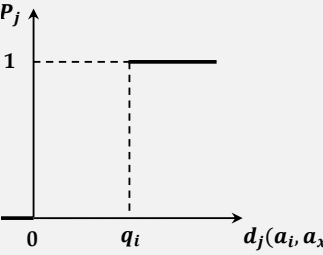
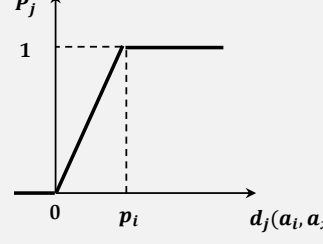
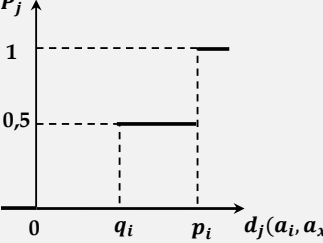
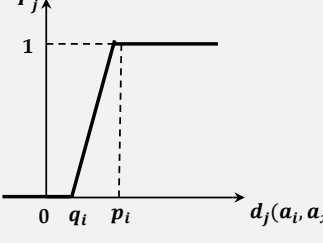
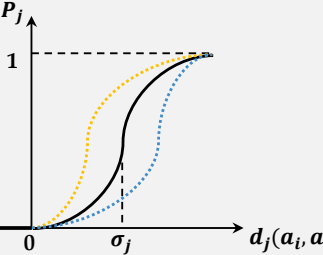
Funktion zu spezifizieren, sondern lediglich die Parameter der Funktionen. In Abhängigkeit des gewählten Funktionstyps sind pro Kriterium j der Indifferenzschwellenwert q , der Präferenzschwellenwert p oder der Wendepunkt σ festzulegen. Die Festlegung der Parameter geschieht entweder gemeinsam mit den Entscheidungstragenden oder zunächst über Näherungsverfahren mit anschließender Validierung durch die Entscheidungstragenden. Tsoutsos et al. (2009) schlagen vor, die Bandbreite der Kriterienausprägungen als Ausgangspunkt für die Bestimmung der Schwellenwerte zu verwenden. Für die Indifferenzschwelle q_j wird ein Wert i. H. v. 5-15 % von $|g_j^{max} - g_j^{min}|$ und für die Präferenzschwelle p_j ein Wert i. H. v. 10-30 % der Bandbreite der Kriterienausprägungen vorgeschlagen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, den Präferenzschwellenwert in Abhängigkeit der Anzahl betrachteter Alternativen m zu bestimmen, so dass:

$$p_j = \frac{|g_j^{max} - g_j^{min}|}{m} \quad (3.3)$$

Der Wendepunkt σ der kontinuierlich wachsenden Präferenzfunktion des Typs 6 bestimmt die Sensitivität der Präferenzen. Ein relativ geringer Wert für σ führt zu höherer Sensitivität bei kleinen Unterschieden in den Kriterienausprägungen, während bei einem relativ hohen Wert von σ große Unterschiede in den Kriterienausprägungen zweier Alternativen stärkere Auswirkungen auf die Präferenz haben, wie die alternativen Funktionsverläufe in Tabelle 3.3 verdeutlichen (Brans und De Smet 2016). Nach Brans und De Smet (2016) sollten für über den Funktionstyp 6 (vgl. Tabelle 3.3) modellierte Kriterien zunächst fiktive Werte für q und p bestimmt werden, welche als Orientierung für die Wahl von σ dienen.

Die im Rahmen dieser Arbeit aufzustellenden Alternativen werden, in Abstimmung mit den Entscheidungstragenden, mittels PROMETHEE multikriteriell bewertet. PROMETHEE wurde insbesondere aufgrund der zugrundeliegenden Rationalitätspostulate in Verbindung mit den Möglichkeiten zur flexiblen und nichtkompensatorischen Präferenzmodellierung ausgewählt. Zudem bieten die distinktierten Analysemöglichkeiten von PROMETHEE eine hohe Transparenz und einfache Nachvollziehbarkeit der erlangten Ergebnisse. In Abschnitt 3.3.3.3 wird die Aggregationsprozedur von PROMETHEE näher beleuchtet und die spezifische Eignung für das vorliegende Entscheidungsproblem des WEN durch einen Vergleich mit weiteren Aggregationsmethoden erläutert.

Tabelle 3.3: Generische Präferenzfunktionen in PROMETHEE

Kriterientyp und Definition	Funktionsverlauf	Beschreibung
<p>Typ 1: Gewöhnliches Kriterium</p> $P_j(d_j) = \begin{cases} 0, & d_j \leq 0 \\ 1, & d_j > 0 \end{cases}$		<p>Strikte Präferenz der Alternative mit höherer Kriterienausprägung.</p>
<p>Typ 2: Quasi-Kriterium</p> $P_j(d_j) = \begin{cases} 0, & d_j \leq q_j \\ 1, & d_j > q_j \end{cases}$		<p>Strikte Präferenz der Alternative mit höherer Kriterienausprägung, sofern diese um mindestens q Einheiten besser ist.</p>
<p>Typ 3: Kriterium mit linearer Präferenz</p> $P_j(d_j) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ \frac{d_j}{p_j}, & 0 \leq d_j \leq p_j \\ 1, & d_j > p_j \end{cases}$		<p>Strikte Präferenz der Alternative mit höherer Kriterienausprägung, sofern diese um mindestens p Einheiten besser ist. Sonst linear zunehmende Präferenz.</p>
<p>Typ 4: Stufen-Kriterium</p> $P_j(d_j) = \begin{cases} 0, & d_j \leq q_j \\ \frac{1}{2}, & q_j < d_j \leq p_j \\ 1, & d_j > p_j \end{cases}$		<p>Strikte Präferenz analog zu Typ 3. Sonst schwache Präferenz, sofern eine Alternative um mindestens q Einheiten besser ist oder Indifferenz.</p>
<p>Typ 5: Kriterium mit linearer Präferenz und Indifferenz</p> $P_j(d_j) = \begin{cases} 0, & d_j \leq q_j \\ \frac{d_j - q_j}{p_j - q_j}, & q_j < d_j \leq p_j \\ 1, & d_j > p_j \end{cases}$		<p>Strikte Präferenz analog zu Typ 3. Sonst linear zunehmende Präferenz, sofern eine Alternative um mindestens q Einheiten besser ist oder Indifferenz.</p>
<p>Typ 6: Gauß'sches Kriterium</p> $P_j(d_j) = \begin{cases} 0, & d_j \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d_j^2}{2\sigma_j^2}}, & d_j > 0 \end{cases}$		<p>Zunehmende Präferenz mit zunehmender Kriterienausprägung nach s-förmigem Kurvenverlauf.</p>

Quelle: Eigene Darstellung nach Brans und De Smet (2016), Linkov et al. (2020)

Die Präferenzfunktionen tragen den Unterschied d in den Kriterienausprägungen zweier Alternativen a_i und a_x im Hinblick auf ein Kriterium j gegenüber der Präferenzstärke auf einer Skala von 0 (Indifferenz) bis 1 (strikte Präferenz) anhand eines Präferenzindikators P_j ab (Brans und De Smet 2016):

$$P_j(a_i, a_x) = P_j(d_j(a_i, a_x)) = P_j(g_j(a_i) - g_j(a_x)) \quad \begin{array}{l} \forall a_i, a_x \in A, \\ j = 1, \dots, n \end{array} \quad (3.4)$$

Entscheidungsstragende können für jedes Kriterium sowohl eine entsprechende Präferenzfunktion wählen, als auch den Verlauf der Funktion durch Wahl von Präferenz- und Indifferenzschwellen anpassen. Outranking Verfahren der Methodenfamilie ELECTRE hingegen erlauben auf intra-kriterieller Ebene die Angabe von Veto-Schwellen (Figueira et al. 2010). Überschreitet der Unterschied in den Kriterienausprägungen zweier Alternativen im Hinblick auf ein Kriterium die von Entscheidungsstragenden festgelegte Veto-Schwelle, so wird diese Alternative gänzlich ausgesondert um Kompensation vorzubeugen (Roy und Słowiński 2013).

Außerhalb der Logik der spezifischen MCDA Methode haben die intra-kriteriellen Präferenzinformationen keine konkrete Bedeutung. Es existiert daher weder ein klar definierbares Maß für die Qualität der gesammelten Informationen, noch ist eine exakte Approximation der Parameter das Ziel dieses Prozessschrittes. Vielmehr geht es darum, in einem kollaborativen Prozess geeignete Modellierungen zu identifizieren, so dass das resultierende Präferenzmodell als nützliches Instrument für die Entscheidungsfindung anerkannt werden kann (Roy 2016). Wenngleich die Präferenzmodellierung nützlich zur Förderung des Problemverständnisses ist, hat diese Vorgehensweise den Nachteil mehr oder weniger kognitiv anspruchsvoll und zeitaufwändig zu sein. Bei komplexen Entscheidungsproblemen, die eine große Anzahl von Kriterien und Alternativen umfassen, kann die direkte Ermittlung von Nutzen- oder Wertfunktionen durch Fragebögen die Entscheidungsstragenden wohlmöglich überfordern und eine Quelle für Unsicherheit sein (Cinelli et al. 2020). Outranking Verfahren hingegen verwenden einen pragmatischeren Modellierungsansatz, welcher die Möglichkeiten zur Ausgestaltung intra-kriterieller Präferenzinformationen limitiert. Trotz dieser Limitation sind die Möglichkeiten der Outranking Verfahren für praktische Anwendungen dennoch oft ausreichend, so dass sie vielfach für komplexe Entscheidungsprobleme eingesetzt werden (Brans und De Smet 2016).

3.3.3.2 Erhebung der Kriteriengewichte

Die zweite wesentliche Komponente des im Ablauf einer MCDA aufzustellenden Präferenzmodells sind inter-kriterielle Präferenzinformationen. Inter-kriterielle Präferenzinformationen modellieren die Artenpräferenz, d. h. welche subjektive Bedeutung ein Ziel im Vergleich zu den weiteren Zielen aufweist¹³ (Belton und Stewart 2002; Lerche 2016, S. 18). Üblicherweise werden die inter-kriteriellen Präferenzen als positive Gewichtungsfaktoren der Kriterien auf unterster Ebene der Kriterienhierarchie modelliert, so dass sich über alle Kriterien ein zu normalisierender Gewichtungsvektor $w = (w_1, \dots, w_n)$ mit insgesamt n Kriteriengewichten ergibt (Bertsch 2008, S. 20):

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad \begin{array}{l} w_j \geq 0, \\ \forall j = 1, \dots, n \end{array} \quad (3.5)$$

¹³ Ergänzend ist anzumerken, dass ausgewählte MCDA Methoden, wie ELECTRE Iv, bewusst auf die Modellierung von Kriteriengewichten verzichten (Figueira et al. 2016).

Zur Erhebung der Kriteriengewichte stehen verschiedene direkte und indirekte Verfahren zur Verfügung (Eisenführ et al. 2010, S. 122 ff.; Dawes und Corrigan 1974). In direkten Verfahren werden Kriteriengewichte durch unmittelbare Befragung der Entscheidungstragenden, z. B. durch Allokation von Punkten zu Kriterien mit anschließender Normierung, erhoben (Bouyssou et al. 2006, S. 148 ff.). Ein direktes Gewichtungungsverfahren, das häufig in Entscheidungsproblemen mit Nachhaltigkeitsbezug angewendet wird, ist die Gleichgewichtung der von Entscheidungstragenden als relevant angesehen Kriterien (Wang et al. 2009). Eine Gleichgewichtung ist auch bei begrenztem Wissen über die Prioritäten der Entscheidungsträger anwendbar und erfordert praktisch keine zusätzlichen Eingaben (Dawes und Corrigan 1974). Allerdings ist das Verfahren jedoch möglicherweise nicht geeignet, die Präferenzen der Entscheidungstragenden adäquat abzubilden und bietet nur eingeschränkte Möglichkeiten zur aktiven Beteiligung der Entscheidungstragenden.

Die direkte Erhebung von Kriteriengewichten kann trotz ihrer technischen Simplizität kognitiv anspruchsvoll für die Entscheidungstragenden sein. Die Ergebnisse direkter Gewichtungsverfahren sind daher oftmals inkonsistent und insbesondere bei komplexen Entscheidungsproblemen nur von begrenzter Eignung für die anschließende Aggregation (vgl. Roy und Słowiński 2013; Lienert et al. 2016; Marttunen et al. 2015). Zudem werden Kriteriengewichte, je nach gewählter Aggregationsmethode, unterschiedlich verarbeitet und haben keine unmittelbare intrinsische Bedeutung (Roy und Mousseau 1996; Bouyssou 2000, S. 36 ff.). In einigen Aggregationsverfahren sind die Kriteriengewichte abhängig von den Kriterienausprägungen sowie deren Maßeinheiten und müssen bei Vorliegen unterschiedlicher Maßeinheiten entsprechend transformiert werden (Bouyssou et al. 2006, S. 148). Entscheidungstragende können die Auswirkungen der Gewichte auf die Aggregationsprozedur, z. B. bei direkter Vergabe von Punkten zu Kriterien, daher nur schwer oder gar nicht antizipieren und in ihre Urteile einbeziehen.

Daher werden in Entscheidungsproblemen dieser Art häufig *indirekte* Verfahren in Kombination mit Kreativitätstechniken eingesetzt, um die kognitive Belastung der Entscheidungstragenden zu reduzieren und durch interaktive Gestaltung der Erhebung ein besseres Bewusstsein für die eigenen Präferenzen zu fördern (Haag et al. 2019b). Im Verfahren der Simple Multi-Attribute Rating Technique (SMART) werden die Kriterien von den Entscheidungstragenden zunächst gemäß ihrer relativen Wichtigkeit geordnet. Diese ordinale Ordnung wird als Referenz für eine anschließende Bepunktung der Kriterien verwendet (Edwards 1977). In einer Weiterentwicklung dieses Verfahrens (SMART Exploiting Ranks, SMARTER) werden die Kriteriengewichte aus ordinalen Dominanzaussagen über Alternativen ermittelt, so dass eine direkte Bepunktung entfällt (Edwards und Barron 1994). Ein ähnliches Vorgehen verfolgt das *swing*-Verfahren (Von Winterfeldt und Edwards 1986, S. 286 ff.). Entscheidungstragenden werden künstliche Alternativen mit den potentiell schlechtesten Kriterienausprägungen präsentiert. Das Kriterium, für welches ein Wechsel zur bestmöglichen Ausprägung am stärksten gewünscht wird, erhält die höchste Gewichtung und dient als Referenz für die Gewichtung der weiteren Kriterien. Innerhalb der Nutzwert-basierten Verfahren werden zudem häufig hierarchische Gewichtungsmodelle (Keeney und Raiffa 1993; Belton und Stewart 2002) oder der AHP (Saaty 1980) zur Erhebung der Kriteriengewichte angewandt. Bei letzterem werden Substitutionsraten zwischen Paaren von Kriterien ermittelt und zur Herleitung von Kriteriengewichten verwendet (Eisenführ et al. 2010, S. 125 ff.). Einen ausführlichen Überblick über die am weitesten verbreiteten Gewichtungsmethoden auf der Grundlage relativer Vergleiche geben u. a. Belton und Stewart (2002), Pöyhönen und Hämäläinen (2001) oder Weber und Borchering (1993).

Unter den Ansätzen zur indirekten Erhebung von Kriteriengewichten hebt sich der Ansatz von Simos (1990) durch seine Verfahrensfreundlichkeit, Praktikabilität und zeiteffiziente Anwendung hervor. Simos' Ansatz basiert auf der Ordnung eines Kartensatzes, wobei jede Karte ein Kriterium oder Attribut darstellt. Der Kartensatz wird von den Entscheidungstragenden nach der relativen Bedeutungsstärke der Kriterien geordnet und jedes Kriterium j erhält einen Rang $r(j)$, wobei Kriterien mit gleicher Bedeutungsstärke auf gleicher Rangstufe, d. h. parallel, angeordnet werden können. Unterscheiden sich zwei Kriterien auf benachbarten Rängen stark in ihrer Bedeutung, können weiße Karten zwischen diese Kriterien gelegt werden. Weiße Karten erhöhen den Rang der nachfolgenden Kriterien und fungieren somit als virtuelle Ränge. Daher wird der Ansatz von Simos auch oft als „Karten-Methode“ bezeichnet. Der geordnete Kartensatz wird anschließend als Grundlage für die Berechnung des Gewichtungsvektors genutzt, wobei die Kriteriengewichte w_j sich vor Normalisierung gemäß folgender Berechnungsformel bestimmt:

$$w_j = 1 + (z - 1) \cdot \frac{r(j) - 1}{n - 1} \quad \begin{array}{l} z, w_j \geq 0, \\ \forall j = 1, \dots, n \end{array} \quad (3.6)$$

In einer späteren Erweiterung des Verfahrens von Simos durch Figueira und Roy (2002) können Entscheidungstragende zusätzlich die Bedeutung des letzten Kriteriums im geordneten Kartensatz gegenüber dem ersten Kriterium über einen Verhältnisfaktor z spezifizieren. Damit wird die dem Verfahren zugrundeliegende Annahme, dass der Gewichtungsabstand zwischen den ordinalen Rängen von der Anzahl der Ränge abhängt, gelockert. Das Verfahren von Simos ist, ähnlich wie die *SMART* und *swing*-Verfahren, ein beliebtes Verfahren zur Erhebung der Kriteriengewichte in den Outranking-Methoden (Wang et al. 2009). Ein weiteres, in den Outranking Verfahren angewendetes indirektes Verfahren, ist die stochastische Mehrziel-Akzeptanzanalyse (engl. Stochastic Multiobjective Acceptability Analysis, *SMAA*) von Corrente et al. (2014). Bei der *SMAA* werden die Parameter des Präferenzmodells stochastisch über Wahrscheinlichkeitsverteilungen anhand von Informationen der Entscheidungstragenden bestimmt. Für weitere Anwendungen der *SMAA* in den Outranking Verfahren, siehe u. a. Hokkanen et al. (1998), Corrente et al. (2021) oder Govindan et al. (2019).

In dem dieser Arbeit vorliegenden Entscheidungsproblem sind die Präferenzen einer Vielzahl von Beteiligten Personen und Interessensgruppen zu erheben und sowohl der verfügbare Zeitrahmen als auch die räumliche Distanz der internationalen Projektpartner und beteiligten Personen führen zu Herausforderungen. Daher wird für die Erhebung der Kriteriengewichte die verfahrensfreundliche und zugleich wissenschaftlich etablierte Kartenmethode von Simos verwendet.

Mögliche Fallstricke bei indirekten Verfahren wie *SMART* oder Simos' Verfahren bestehen darin, dass ein Urteil der relativen Bedeutung von Kriterien ohne Berücksichtigung der Bandbreite anzutreffender Kriterienausprägungen zu unerwünschten Effekten und Verzerrungen führen kann (Von Winterfeldt und Edwards 1986; Edwards und Barron 1994). So könnte ein Kriterium, z. B. Kosten, von Entscheidungstragenden zunächst als hoch relevant bewertet und damit hoch gewichtet werden. Unterscheiden sich die Kosten der Alternativen jedoch aus Sicht der Entscheidungstragenden nur unwesentlich voneinander, könnten sie dieses Kriterium für das vorliegende Entscheidungsproblem als deutlich unwichtiger einstufen, so dass sich für die ursprünglich aufgestellte Gewichtung eine zu geringe Gewichtung für alle übrigen Kriterien ergibt. Die Angabe der Bandbreite in den Kriterienausprägungen wird bei der Ermittlung der Gewichtung daher empfohlen und bei einigen Gewichtungsverfahren explizit gefordert (Belton und Stewart 2002, S. 134 f.; Marttunen et al. 2018).

Die Auswahl eines geeigneten Gewichtungsverfahrens in der MCDA wird an vielen Stellen in der Literatur diskutiert. Vergleicht man die verschiedenen Verfahren, so besteht die Möglichkeit, dass die Verwendung unterschiedlicher Gewichtungsverfahren für das gleiche Entscheidungsproblem zu unterschiedlichen Gewichtungen der Kriterien führt, obwohl es sich um das gleiche Entscheidungsproblem handelt (Choo et al. 1999). Dieser Umstand könnte unterschiedliche methodische Bedeutungen beziehungsweise Interpretationen der Kriteriengewichte implizieren (Pöyhönen und Hämäläinen 2001).

Wenngleich sich die Kriteriengewichte in ihrer Höhe je nach gewähltem Erhebungsverfahren unterscheiden können, hat sich jedoch auch gezeigt, dass die ordinale Ordnung der Kriterien nach relativer Wichtigkeit weitestgehend konstant bleibt (Groothuis-Oudshoorn et al. 2017). Dennoch sollte die Sensitivität der Kriteriengewichte in Bezug auf die Gesamtbeurteilung der Alternativen überprüft und sichergestellt werden, dass die Präferenzen der Entscheidungstragenden adäquat modelliert sind (Lienert et al. 2016). Die Durchführung von Konsistenzprüfungen, um die Stabilität der Urteile von Entscheidungstragenden zu gewährleisten, wird ebenfalls als gute Praxis angesehen (Belton und Stewart 2002, S. 141). Zudem unterstreicht die Erkenntnis, dass die Gewichtung der Kriterien je nach gewähltem Gewichtungsverfahren variieren kann, die Notwendigkeit eines bewussten Umgangs mit Unsicherheiten im Prozess der Erhebung von Präferenzinformationen (Ijzerman et al. 2012; van Til et al. 2014).

In Kontext der Präferenzhebung wird dabei zwischen drei Typen von Unsicherheit differenziert (Pelissari et al. 2021):

- *Unvollständigkeit*: Informationen über Präferenzen der Entscheidungstragenden fehlen teilweise. Entweder weil die Entscheidungstragenden sich weigern, die Informationen preiszugeben, oder aber weil sie sich nicht in der Lage sehen, die Informationen in der geforderten Weise offenzulegen (vgl. auch Lahdelma et al. 1998; Tervonen et al. 2009).
- *Stochastizität*: Die Angaben zu Präferenzen werden als stochastische Variablen bereitgestellt, z. B. in Form diskreter oder stetiger Wahrscheinlichkeitsverteilungen, da die Entscheidungstragenden sich ihrer Urteile nicht sicher sind oder die abgegebenen Urteile inkonsistent sind.
- *Mehrdeutigkeit*: Die Angaben zu den Präferenzen sind ungenau oder vage und können daher auf verschiedene Weise interpretiert werden. Dies ist der Fall, wenn Informationen auf ordinalem Skalenniveau erhoben werden, z. B. in Form linguistischer Begriffe (Yeh und Chang 2009) oder über Ordnungen und unscharfe Mengen (Campos et al. 2015; Nemery et al. 2015).

Eine Gruppe von Erhebungsverfahren, die häufig innerhalb der klassischen MADM Verfahren angewendet wird, ermöglicht die Erstellung von Präferenzmodellen bei unvollständiger Information. Das von Salo und Hämäläinen (1992) vorgeschlagene PAIRS-Verfahren (engl. preference assessment using the imprecise ratio statements) erlaubt es Entscheidungstragenden ordinale Beurteilungen abzugeben und führt zugleich Konsistenzprüfungen durch, um die Kohärenz aller gesammelten Informationen zu gewährleisten. Weiterentwicklungen in dieser Verfahrensguppe umfassen das PRIME-Verfahren (engl. preference ratios in multiple-attribute evaluation), welches die Kriteriengewichte in einem trade-off-basierten Verfahren mit Konsistenzprüfung ermittelt (Salo und Hamalainen 2001) und das hierarchische Gewichtungsverfahren RICH (engl. rank inclusion in criteria hierarchies) von Salo und Punkka (2005). Darüber hinaus geben Salo et al. (2011) eine ausführlichere Übersicht über Verfahren zur Erhebung von Kriteriengewichten bei unvollständigen Informationen und de Almeida et al. (2016) zu trade-off-basierten Verfahren.

Ebenso sollte der Effekt von Mehrdeutigkeit auf die erzielten Ergebnisse der MCDA betrachtet werden. In der Regel benötigen Verfahren zur Erhebung von Kriteriengewichten, wie das von Simos oder die

anderen oben genannten, einen vollständigen Datensatz mindestens ordinal skalierten Informationen von den Entscheidungstragenden. Bei ordinaler Skalierung können die ermittelten Kriteriengewichte mehrdeutig sein und statt eindeutiger numerischer Werte eine konvexe Hülle bilden, so dass weitere Sensitivitätsanalysen erforderlich sind, um die Robustheit der ermittelten Gewichte zu überprüfen (Siskos und Tsotsolas 2015). Die Auswirkungen stochastisch vorliegender Präferenzinformationen kann mittels Robustheitsanalysen untersucht werden (Kadziński et al. 2012).

3.3.3.3 Aggregation, Ergebnisanalyse und Ergebnisdarstellung

Nach Aufstellung der Entscheidungstabelle und Erhebung inter- und intra-kriterieller Präferenzinformationen werden die gesammelten Daten zur Erstellung eines Präferenzmodells aggregiert und visualisiert (Belton und Stewart 2002, S. 5 f.). Das resultierende Präferenzmodell formalisiert die Beurteilung der betrachteten Alternativen über Ordnungsrelationen und lässt Rückschlüsse auf das Vorliegen von Präferenz, Indifferenz oder Unvergleichbarkeit zu. Das Aggregationsverhalten der unterschiedlichen MCDA Methoden spiegelt sich dabei vor allem in der Möglichkeit für Kompensation, den erlangten Ordnungsrelationen und der Robustheit des Präferenzmodells gegenüber nachträglichem Hinzufügen oder Entfernen von Handlungsalternativen wider (Cinelli et al. 2020).

In den **klassischen MADM Verfahren** werden die in Einzelwert- beziehungsweise Einzelnutzenfunktionen übertragenen Kriterienausprägungen anschließend unter Einbeziehung der Kriteriengewichte zu einem synthetisierenden und normalisierten numerischen Wert v für jede Alternative $a_i \in A$ aggregiert.

Diese Aggregation wird meistens über eine additive Aggregationsvorschrift, bei welcher der Gesamtnutzen beziehungsweise Gesamtwert einer Alternative $v(a_i)$ über

$$v(a_i) = \sum_{j=1}^n w_j \cdot v_j, \quad \forall a_i \in A \quad (3.7)$$

bestimmt wird, vorgenommen, da er für Entscheidungstragende verschiedener Disziplinen schnell erklärbar und nachvollziehbar ist (Bertsch 2008, S. 21; Belton und Stewart 2002, S. 86). Die additive Aggregation setzt präferenzunabhängige und mindestens intervallskalierte Kriterienausprägungen voraus (Belton und Stewart 2002, S. 87 ff.; Keeney und Raiffa 1993, S. 66 ff.). Eine ebenfalls häufig genutzte Aggregationsvorschrift ist die multiplikative (vgl. z. B. Belton und Stewart 2002, S. 94; Kirkwood 1992), wobei weitere Modellierungen ebenfalls möglich sind, wie z. B. Choquet-Integrale, um Abhängigkeiten zwischen Kriterien zu modellieren (vgl. z. B. Angilella et al. 2015; Marcomini et al. 2008, S. 65 ff.).

Die Präferenzbeurteilung von Alternativen wird anhand der Höhe des Wertes $v(a_i)$ vorgenommen, wobei die Alternative mit der höchsten Gesamtbewertung als die attraktivste angesehen wird (Kirkwood 1992). Klassische MCDA Verfahren, die auf einfachen gewichteten Summenfunktionen basieren, wie z. B. SAW, der AHP und MAVT Verfahren mit additiver Gesamtwertfunktion, sind jedoch kompensatorisch. Kompensation bei MCDA Verfahren bezeichnet die Eigenschaft, dass eine hinreichend gute Kriterienausprägung in einem Kriterium mit niedriger Gewichtung eine schlechtere Kriterienausprägung eines als wichtiger erachteten Kriteriums ausgleichen kann (Geldermann et al. 2000; Roy 1989; Tsoukiàs und Vincke 1995). Die Kompensationsrate ergibt sich dabei aus den Kriteriengewichten (Haag et al. 2019a). Wenn also die Kriteriengewichte bestimmter Ziele gleich hoch sind, kann eine schlechte Kriterienausprägung hinsichtlich eines Ziels durch eine bessere bei einem anderen Ziel vollständig ausgeglichen werden. Klassische MCDA Verfahren können Alternativen daher lediglich nach dem Konzept der schwachen Nachhaltigkeit bewerten (Cinelli et al. 2014).

UTA Methoden bauen auf bestehenden additiven Präferenzmodellen auf. Hierzu wird aus einem bestehenden additiven Präferenzmodell u ein ungewichtetes Referenzmodell u' abgeleitet. Die in Gleichung (3.8) dargestellte Gesamtnutzenfunktion des Referenzmodells setzt sich dabei aus den in Gleichung (3.9) gezeigten Teilnutzenfunktionen unter Einbeziehung eines Fehlerterms ϵ zusammen.

$$u'(a_i) = \sum_{j=1}^n u'_j, \quad \forall a_i \in A' \quad (3.8)$$

$$u'[(g_j(a_i))] = \sum_{j=1}^n u'_j[g_j(a_i)] + \epsilon(a_i), \quad \forall a_i \in A' \quad (3.9)$$

Die abgeleiteten Teilnutzenfunktionen u' werden anschließend interpoliert und durch Aufstellung eines linearen Optimierungsprogramms, welches den Fehlerterm ϵ über alle Alternativen $a_i \in A'$ minimiert, stückweise linear approximiert (Siskos et al. 2016).

Im Gegensatz zu den bisher betrachteten klassischen MADM-Verfahren basiert die Aggregationslogik des AHP auf paarweisen Vergleichen von Alternativen und Kriterien (Linkov et al. 2020, S. 6). Die paarweisen Vergleiche des AHP ersetzen zugleich die intra- und inter-kriteriellen Präferenzinformationen der bisher betrachteten Verfahren. Entscheidungstragende urteilen in paarweisen Vergleichen von Kriterientupeln $g_j, g_x \in G$ über die relative Wichtigkeit von Kriterien und in paarweisen Vergleichen von Alternativentupeln $a_i, a_x \in A$ über die Vorteilhaftigkeit von Alternativen hinsichtlich eines Kriteriums. Verbale Urteile über die Präferenz, wie „In Bezug auf Kriterium g_1 ist Alternative a_1 moderat besser als Alternative a_2 .“, werden dabei über eine Punkteskala von 1 bis 9 in numerische Werte übersetzt.

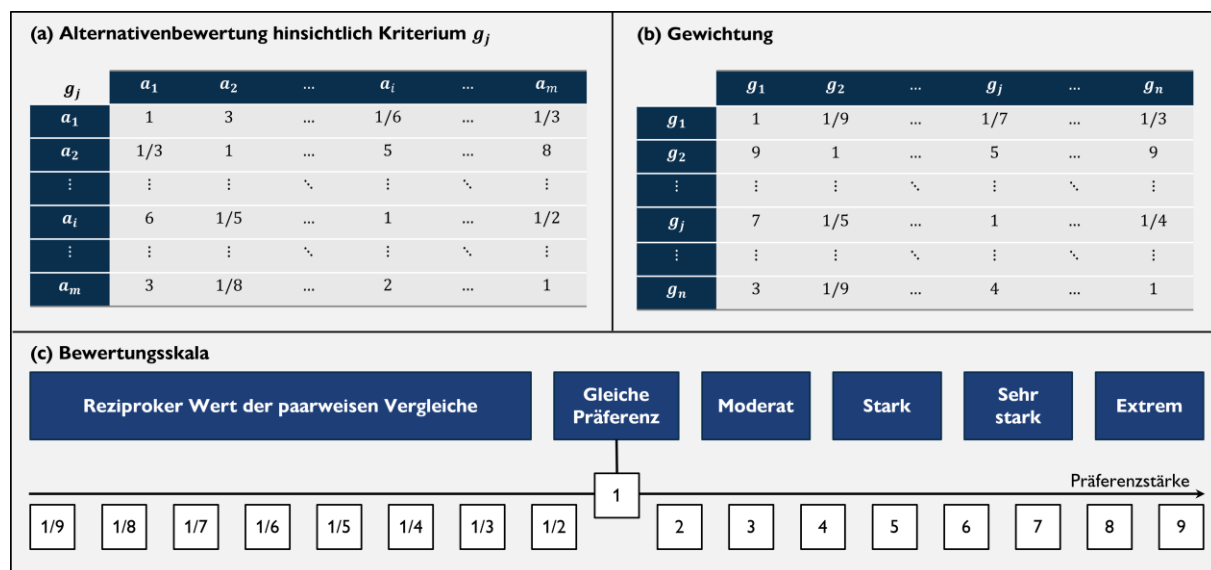


Abbildung 3.5: Beispielhafter Prozess des AHP und Visualisierung der verbal-numerischen Bewertungsskala

Quelle: Eigene Darstellung nach Linkov et al. (2020), Saaty (1980)

Die von den Entscheidungstragenden in den paarweisen Vergleichen abgegebenen Urteile werden in einer Matrix gesammelt. Für das jeweils dominierte Kriterium beziehungsweise die dominierte Alternative wird der reziproke Wert eingetragen. Abbildung 3.5 zeigt den Prozess der (a) Alternativenbewertung in Bezug auf ein ausgewähltes Kriterium, (b) der Kriteriengewichtung und (c) die zur Übersetzung der verbalen Urteile in absolute numerische Werte verwendete Punkteskala auf.

Die grundsätzliche Aggregationslogik besteht in der Berechnung des Eigenvektors mit dem höchstmöglichen Eigenwert für jede Matrix entlang der Ebenen der Kriterienhierarchie (Belton und Stewart 2002, S. 154). Die Alternativen selbst werden im AHP auf unterster Ebene der Kriterienhierarchie angeordnet, d. h. als Mittel zur Erreichung der Ziele interpretiert (vgl. z. B. Saaty 2001Kap. 6). Die Aggregation reduziert die Matrizen der Dimension $m \times m$ zu vergleichenden Vektoren der Dimension $m \times 1$, deren normalisierte Werte die relative Stärke einer Alternative ausdrücken. Zur Bestimmung der relativen Wichtigkeit von Kriterien wird analog vorgegangen. Beginnend auf unterster Stufe der Kriterienhierarchie werden alle Kriterien beziehungsweise Ziele eines Zweiges paarweisen Vergleichen mit anschließender Berechnung des Eigenvektors unterzogen (Belton und Stewart 2002, S. 156). Die Eigenvektoren spiegeln dabei jeweils die relative Wichtigkeit eines Kriteriums oder Ziels in Bezug auf das übergeordnete Ziel wider.

Gegenüber den Verfahren der MAVT und MAUT verwenden **Outranking Verfahren** einen Aggregationsansatz, bei dem nicht jede Alternative $a_i \in A$ getrennt von den weiteren Alternativen aus A betrachtet wird. Stattdessen wird jede Alternative a_i sukzessive paarweisen Vergleichen mit allen weiteren Alternativen aus A unterzogen. Im Zuge eines paarweisen Vergleichs (a_i, a_x) werden sämtliche Kriterienausprägungen beider Alternativen $g_1(a_i) \dots g_n(a_i)$ und $g_1(a_x) \dots g_n(a_x)$ sowie subjektive Informationen der Entscheidungstragenden aggregiert (Roy 2016). Das Ergebnis der Aggregationsprozedur ist somit zunächst kein synthetisierender Gesamtwert für jede Alternative $a_i \in A$, sondern ein Präferenzmodell aus binären Präferenzrelationen, den sogenannten Outranking-Relationen (Belton und Stewart 2002, S. 233).

Die Aggregationsmethoden der Outranking Verfahren weisen deshalb ein anderes Kompensationsverhalten als die klassischen Verfahren mit additiv synthetisiertem Gesamtwert auf. Outranking Verfahren sind, je nach gewählter Aggregationsmethode, nicht-kompensatorisch oder teilweise kompensatorisch (vgl. Oberschmidt et al. 2010; Munda 2008, S. 94; Polatidis et al. 2006). Das Ausmaß der Kompensation in den PROMETHEE Methoden hängt von der Wahl der Präferenzfunktion und deren Parametrisierung ab (Cinelli et al. 2014; Polatidis et al. 2006). So können PROMETHEE Methoden, durch die Wahl entsprechender Präferenzfunktionen, so gestaltet werden, dass sie zu äquivalenten Ergebnissen wie die genannten klassischen Verfahren führen und voll kompensatorisch sind (Geldermann und Schöbel 2011). Werden jedoch jedem Kriterium in PROMETHEE Präferenzfunktionen des Typs 1 oder 2 zugewiesen, so ist eine Kompensation vollständig ausgeschlossen. Werden Kriterien ebenfalls für die Präferenzfunktionen der Typen 3 bis 6 modelliert, so ergibt sich eine teilweise Kompensation in PROMETHEE. So kann, innerhalb eines paarweisen Vergleichs zweier Alternativen, eine gute Kriterienausprägung in einem Kriterium mit niedriger Gewichtung eine schlechtere Kriterienausprägung eines als wichtiger erachteten Kriteriums nur dann ausgleichen, wenn die Unterschiede in den Kriterienausprägungen der beiden Alternativen hinreichend groß sind, d. h. einen explizit definierten Schwellenwert überschreiten (Geldermann et al. 2000). ELECTRE Methoden bieten darüber hinaus Möglichkeiten, Kompensation über *Vetoschwellen* für bestimmte Kriterien explizit zu verhindern. Outranking Verfahren sind daher für Nachhaltigkeitsbewertungen zu bevorzugen und, je nach Präferenzmodellierung und Parametrisierung, kompatibel mit dem Konzept der starken Nachhaltigkeit (Geldermann und Schöbel 2011).

Durch die Beurteilung von Alternativen in paarweisen Vergleichen weichen Outranking Verfahren das Axiom vollständiger Transitivität bewusst auf, um unvollkommenes Wissen und Unbestimmtheit im Zuge der Entscheidungsunterstützung explizit zu berücksichtigen (Roy 2016, S. 32). Dabei kann es zu

Situationen kommen, in denen zu gegebenem Informationsstand keine klare Aussage über das Vorliegen von Präferenz oder Indifferenz gefällt werden kann. Outranking Verfahren lassen deshalb, zusätzlich zu den in Abschnitt 3.3.3 aufgeführten Präferenzrelationen, die Präferenzrelation der *Unvergleichbarkeit* zu (Roy 2016, S. 32; Belton und Stewart 2002, S. 107). Eine Alternative a_i wird in einer Outranking-Relationen besser bewertet als eine Alternative a_x , wenn anhand der bekannten Kriterienausprägungen und der erhobenen Präferenzinformationen a_i mindestens so gut ist wie a_x und es keine Anhaltspunkte dafür gibt, dass a_x besser ist als a_i (Belton und Stewart 2002, S. 107). Je nach verwendetem Outranking Verfahren und Typ des Entscheidungsproblems (s. Abschnitt 3.3.1) können die binären Outranking-Relationen zu einem Präferenzmodell im Sinne einer Totalordnung aller Alternativen aggregiert werden, wodurch jedoch die Möglichkeit zur Abbildung von Unvergleichbarkeiten entfällt (Brans und De Smet 2016). Die Annahme der Outranking Verfahren, dass Präferenzinformationen in der Regel ungenau sind, und das Konzept der Unvergleichbarkeit machen sie für die Unterstützung von Entscheidungen im Umweltmanagement geeignet, da sie die Charakteristika dieser Entscheidungssituationen oft gut abbilden. (Geldermann et al. 2000).

Die einzelnen Aggregationsmethoden der ELECTRE-Familie unterscheiden sich in Bezug auf den Grad der Komplexität und den Umfang der benötigten Informationen und sollten in Abhängigkeit von dem konkreten Entscheidungsproblem ausgewählt werden (Belton und Stewart 2002, S. 234). In den ELECTRE Methoden werden die Kriteriengewichte in Form kardinal skaliertes, numerischer Werte erhoben, welche die relative Bedeutung eines Kriteriums widerspiegeln (Belton und Stewart 2002, S. 234). Die Aggregationslogik der paarweisen Vergleiche in den ELECTRE Methoden basiert auf der Bestimmung zweier Indizes, dem sogenannten *Konkordanz* Index und dem *Diskordanz* Index. Die Höhe des Konkordanz Index spiegelt die Stärke der Hinweise wider, die darauf schließen lassen, dass eine Alternative a_i gegenüber einer Alternative a_x präferiert wird. Die Höhe des Diskordanz Index hingegen drückt die Stärke der Hinweise gegen diese Hypothese aus (Figueira et al. 2016).

Die Bestimmung dieser Indizes unterscheidet sich innerhalb der ELECTRE Methoden. In ELECTRE I bestimmt sich der Konkordanz Index C für das Paar der Alternativen $a_i, a_x \in A$, vor Normalisierung auf das Intervall $[0, 1]$, gemäß Gleichung (3.10) und der Diskordanz Index D nach Gleichung (3.11). Der Konkordanz Index summiert somit für einen paarweisen Vergleich (a_i, a_x) die Gewichte der Kriterien auf, in denen Alternative a_i besser abschneidet als Alternative a_x (Figueira et al. 2016).

$$C(a_i, a_x) = \sum_{\{j: g_j(a_i) \geq g_j(a_x)\}} w_j \quad (3.10)$$

$$D(a_i, a_x) = \max_{\{j: g_j(a_i) < g_j(a_x)\}} \{g_j(a_x) - g_j(a_i)\} \quad (3.11)$$

Der Diskordanz Index des Vergleichs von a_i mit a_x ist die maximale Abweichung der Kriterienausprägungen, in denen a_x besser gegenüber a_i abschneidet (Figueira et al. 2016, S. 162). Überschreitet $D(a_i, a_x)$ eine zuvor festgelegte *Vetoschwelle*, so spricht dies gegen die Hypothese „ a_i wird gegenüber a_x präferiert“, und a_i ist gegenüber a_x entweder unvergleichbar oder a_x wird präferiert. Anhand der Konkordanz und Diskordanz Matrizen werden anschließend für jedes Tupel von Alternativen die Outranking-Relationen bestimmt und in Form eines gerichteten Graphen dargestellt (vgl. Belton und Stewart 2002, S. 236 ff.). Nach Einführung der Unvergleichbarkeit unterscheiden die ELECTRE Methoden zwischen folgenden Outranking-Relationen Q („*mindestens so gut wie*“) (Figueira et al. 2016, S. 159):

- $a_i Q a_x$ und nicht $a_x Q a_i \rightarrow a_i > a_x$ (strikte Präferenz)
- $a_x Q a_i$ und nicht $a_i Q a_x \rightarrow a_x > a_i$ (strikte Präferenz)

- $a_i Q a_x$ und $a_x Q a_i \rightarrow a_i I a_x$ (Indifferenz)
- $a_i Q a_x$ und nicht $a_x Q a_i \rightarrow a_i R a_x$ (Unvergleichbarkeit)

Die Aggregationsmethode ELECTRE II baut auf ELECTRE I auf, erstellt jedoch eine Rangfolge von Alternativen mithilfe starker und schwacher Outranking-Relationen anstelle lediglich die am meisten präferierte Alternative zu identifizieren (Belton und Stewart 2002, S. 241). ELECTRE I und II basieren auf der Annahme, dass Indifferenz nur möglich ist, wenn ein Tupel von Alternativen die gleichen Kriterienausprägungen hinsichtlich eines Kriteriums aufweist. ELECTRE III führt darüber hinaus deshalb zusätzliche Indifferenz- und Präferenzschwellen ein (Roy 1991). Zudem gibt es in der Fachliteratur für jede der beschriebenen Methoden weitere Varianten sowie zusätzliche Aggregationsmethoden der gesamten Familie (vgl. z. B. Roy und Hugonnard 1982; Roy und Bouyssou 1993; Figueira et al. 2016; Almeida-Dias et al. 2010; Younes et al. 2000).

Im Vergleich zu den klassischen MADM-Methoden MAVT und MAUT sind die ELECTRE-Methoden weniger komplex in der Modellierung der Präferenzen und basieren auf weniger strengen Annahmen (Belton und Stewart 2002, S. 233). Sowohl die Aggregationslogik über Konkordanz beziehungsweise Diskordanz Indizes als auch die Darstellung der Ergebnisse in Form von gerichteten Graphen können für die Entscheidungstragenden jedoch schwierig nachvollziehbar sein (Geldermann et al. 2000). Zudem kann bereits eine geringe Variation von Schwellenwerten in den ELECTRE Methoden einen relativ starken Einfluss auf die erhaltenen Präferenzrelationen haben (Brans et al. 1986).

Ziel von PROMETHEE ist es, die Nachvollziehbarkeit der Aggregation zu verbessern, die Stabilität der erzielten Ergebnisse zu erhöhen und diese auf möglichst eingängige und verständliche Weise darzustellen (Brans et al. 1986; Vincke 1992).

Ausgangspunkt der Aggregationsprozedur in PROMETHEE sind die in Gleichung (3.4) eingeführten Präferenzindikatoren p_j , welche unter Berücksichtigung der Kriteriengewichte w_j über alle Kriterien für jeden paarweisen Vergleich eines Tupels (a_i, a_x) zu einem Präferenzindex π aufsummiert werden (Brans und De Smet 2016). Jede Alternative in A wird so mit $(m - 1)$ anderen Alternativen in A verglichen:

$$\pi(a_i, a_x) = \sum_{j=1}^n w_j \cdot p_j(a_i, a_x) \quad \forall a_i, a_x \in A \quad (3.12)$$

Der Präferenzindex π ist auf das Intervall $[0, 1]$ normiert und gibt die Präferenz der Alternative a_i gegenüber der Alternative a_x über einen dimensionslosen Wert an. Bei $\pi(a_i, a_x) = 1$ wird a_i somit strikt gegenüber a_x präferiert und bei $\pi(a_i, a_x) = 0$ ist die Präferenz von a_i gegenüber a_x ausgeschlossen (Pohl 2023). Die Präferenzindizes der paarweisen Vergleiche werden anschließend zur Berechnung sogenannter Outrankingflüsse, bezeichnet mit ϕ^+ (*Ausgangsfluss*) und ϕ^- (*Eingangsfluss*), verwendet:

$$\text{Ausgangsfluss:} \quad \phi^+(a_i) = \frac{1}{m-1} \sum_{a_x \in A} \pi(a_i, a_x) \quad \forall a_i \in A \quad (3.13)$$

$$\text{Eingangsfluss:} \quad \phi^-(a_i) = \frac{1}{m-1} \sum_{a_x \in A} \pi(a_x, a_i) \quad \forall a_i \in A \quad (3.14)$$

Outrankingflüsse aggregieren die Ergebnisse aus den paarweisen Vergleichen der Alternativen in ein Maß für die Stärke beziehungsweise Schwäche jeder Alternative (Brans und De Smet 2016). Der Ausgangsfluss der Alternative $\phi^+(a_i)$ summiert somit alle Indizes, die für eine Präferenz von a_i gegenüber

aller anderen Alternativen $a_x \in A$ sprechen. Der Eingangsfluss $\phi^-(a_i)$ bildet analog die Summe der Indizien, die dagegen sprechen (Linkov et al. 2020, S. 9).

Die schrittweise Aggregation in PROMETHEE ermöglicht so den Vergleich von Alternativen in Bezug auf ein Kriterium (über Präferenzindikatoren p_j), den Vergleich von Alternativen über alle Kriterien (über Präferenzindizes π), und schließlich den Vergleich von Alternativen untereinander (über Outrankingflüsse ϕ) (Linkov et al. 2020, S. 10). In PROMETHEE I werden Präferenzrelationen anhand folgender Regeln aus den Outrankingflüssen abgeleitet (Brans und De Smet 2016):

$$a_i Pa_x \quad \begin{array}{l} \text{Präferenz von } a_i \text{ gegenüber } a_x, \\ \text{falls} \end{array} \quad \begin{cases} \phi^+(a_i) > \phi^+(a_x) \text{ und } \phi^-(a_i) < \phi^-(a_x), \text{ oder} \\ \phi^+(a_i) = \phi^+(a_x) \text{ und } \phi^-(a_i) < \phi^-(a_x), \text{ oder} \\ \phi^+(a_i) > \phi^+(a_x) \text{ und } \phi^-(a_i) = \phi^-(a_x) \end{cases} \quad (3.15)$$

$$a_i Ia_x \quad \begin{array}{l} \text{Indifferenz zwischen } a_i \text{ und } a_x, \\ \text{falls} \end{array} \quad \phi^+(a_i) = \phi^+(a_x) \text{ und } \phi^-(a_i) = \phi^-(a_x) \quad (3.16)$$

$$a_i Ra_x \quad \begin{array}{l} \text{Unvergleichbarkeit von } a_i \text{ und } a_x, \\ \text{falls} \end{array} \quad \begin{cases} \phi^+(a_i) > \phi^+(a_x) \text{ und } \phi^-(a_i) > \phi^-(a_x), \text{ oder} \\ \phi^+(a_i) < \phi^+(a_x) \text{ und } \phi^-(a_i) < \phi^-(a_x) \end{cases} \quad (3.17)$$

Im Falle der *Präferenz* (3.15) ist eine höhere Stärke von a_i zu a_x mit einer geringeren Schwäche von a_i gegenüber a_x verbunden, so dass die Informationen beider Outrankingflüsse konsistent sind.

Indifferenz zwischen Alternativen liegt nach PROMETHEE vor, wenn sowohl deren Ausgangsflüsse, als auch deren Eingangsflüsse wertmäßig gleich sind (3.16).

Im Falle der *Unvergleichbarkeit* (3.17) ist die größere Stärke von a_i gegenüber einer beliebigen Alternative a_x mit einer geringeren Schwäche von a_x gegenüber a_i verbunden oder umgekehrt. Unvergleichbarkeit kann insbesondere dann auftreten, wenn a_i bezüglich genau der Kriterien gut ist, bei denen a_x schwach bewertet ist. In diesem Fall wird in PROMETHEE I explizit darauf hingewiesen, dass die Informationen nicht ausreichen, um ein eindeutiges Präferenzurteil zu treffen (Brans und De Smet 2016).

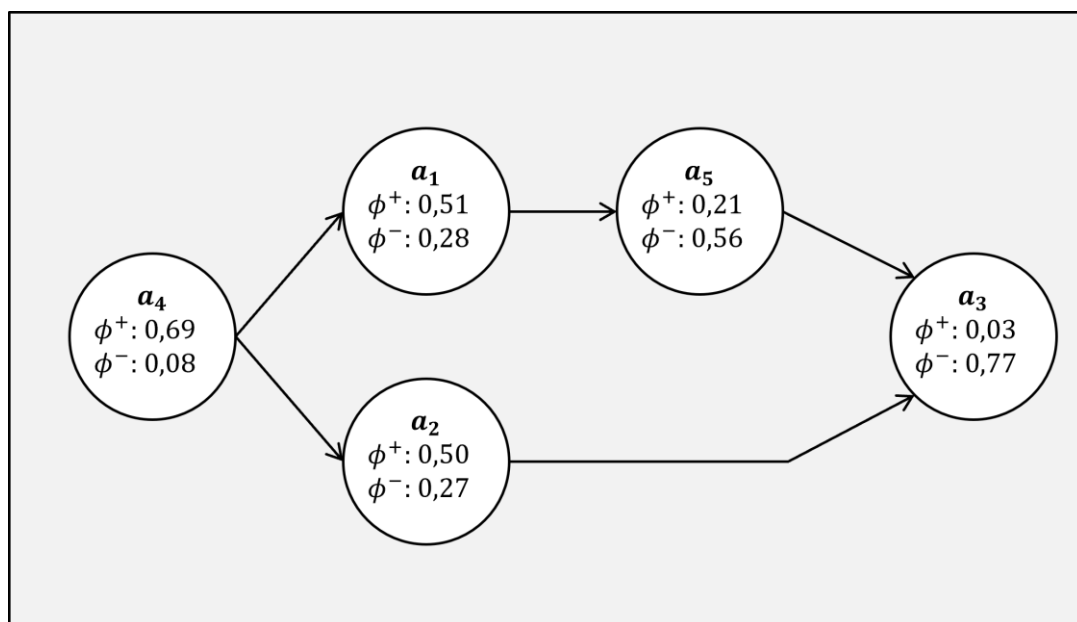


Abbildung 3.6: Beispiel einer partiellen Präordnung nach PROMETHEE I

Quelle: Quelle: Eigene Darstellung

Die Präferenzrelationen nach PROMETHEE I lassen sich graphisch als partielle Präordnung darstellen. Dabei stellen die Alternativen Knoten dar, und die Präferenzrelationen werden mittels gerichteter Kanten abgebildet (vgl. Abbildung 3.6). Unvergleichbare Alternativen werden auf gleicher Höhe abgebildet und sind nicht durch eine gerichtete Kante verbunden (Lerche 2016, S. 30).

Mittels PROMETHEE II kann anhand der Outrankingflüsse eine Totalordnung der Alternativen ermittelt werden, welche eventuelle Unvergleichbarkeiten auflöst. Die Ermittlung der Totalordnung geschieht anhand des Nettoflusses (ϕ^{net}), der sich aus der Differenz zwischen Ausgangsfluss und Eingangsfluss einer Alternative ergibt (3.18).

$$\text{Nettofluss:} \quad \phi^{net}(a_i) = \phi^+(a_i) - \phi^-(a_i), \quad \forall a_i \in A \quad (3.18)$$

wobei der Nettofluss auf das Intervall $[-1, 1]$ definiert ist und die Nettoflüsse beziehungsweise die Stärken und Schwächen der Alternativen sich gegenseitig ausgleichen:

$$-1 \leq \phi^{net}(a_i) \leq 1 \quad \forall a_i \in A \quad (3.19)$$

$$\sum_{a_i \in A} \phi^{net}(a_i) = 0 \quad (3.20)$$

Es gilt, dass ein größerer Nettofluss einer stärkeren Präferenz entspricht, wodurch die Präferenzrelation der Unvergleichbarkeit entfällt und lediglich zwischen Präferenz und Indifferenz unterschieden wird:

$$a_i Pa_x \quad \text{Präferenz von } a_i \text{ gegenüber } a_x, \text{ falls} \quad \phi^{net}(a_i) > \phi^{net}(a_x) \quad (3.21)$$

$$a_i Ia_x \quad \text{Indifferenz zwischen } a_i \text{ und } a_x, \text{ falls} \quad \phi^{net}(a_i) = \phi^{net}(a_x) \quad (3.22)$$

Die Aggregation der Eingangs- und Ausgangsflüsse führt somit sowohl zu einer eindeutigen Präferenzordnung, zugleich aber auch zu einem Informationsverlust. Für praktische Entscheidungsprobleme empfehlen Brans und De Smet (2016) daher die komplementäre Anwendung von PROMETHEE I und PROMETHEE II. Auch wenn die durch PROMETHEE II erhaltene Totalordnung intuitiv ist, hilft die gleichzeitige Analyse der Unvergleichbarkeiten, eine fundierte Entscheidung zu treffen und Informationsverlust durch übermäßige Aggregation vorzubeugen (Brans und De Smet 2016).

Neben den visualisierten Ordnungen nach PROMETHEE I und II bietet eine Analyse des Nettoflussbeitrags einzelner Kriterien Hilfestellung bei der Ergebnisanalyse (Brans und De Smet 2016). Insbesondere dann, wenn Unvergleichbarkeiten oder nahe beieinander liegende Nettoströme vorliegen. Die Nettoflussbeiträge eines Kriteriums j zum gesamten Nettofluss einer Alternative a_i wird mit $\phi_j^{net}(a_i)$ bezeichnet und ergibt sich nach (3.12)–(3.14) aus der Bestimmung des Nettoflusses bei einer vollen Gewichtung des Kriteriums j ($j = 1$), so dass:

$$\begin{aligned} \phi^{net}(a_i) &= \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^n \sum_{a_x \in A} [p_j(a_i, a_x) - p_j(a_x, a_i)] w_j \\ &= \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^n \phi_j^{net}(a_i) w_j, \end{aligned} \quad (3.23)$$

mit

$$\phi_j^{net}(a_i) = \sum_{a_x \in A} [p_j(a_i, a_x) - p_j(a_x, a_i)]. \quad (3.24)$$

Abbildung 3.7 visualisiert die aus einer Betrachtung der Nettoflussbeiträge gewonnenen Einsichten in die spezifischen Stärken und Schwächen der Alternativen anhand des exemplarischen Entscheidungsproblems aus Abbildung 3.6 mit fünf Alternativen und sechs Kriterien. Es wird ersichtlich, dass die nach PROMETHEE I als unvergleichbar eingeordneten Alternativen 1 und 2 insbesondere in Bezug auf Kriterium 4 und Kriterium 6 deutlich unterschiedlich abschneiden. Während Alternative 1 hinsichtlich des Kriteriums 4 vergleichsweise gut bewertet ist und eine schlechte Ausprägung hinsichtlich des Kriteriums 6 aufweist, liegt die Stärke von Alternative 2 hingegen in der Leistung in Bezug auf Kriterium 6.

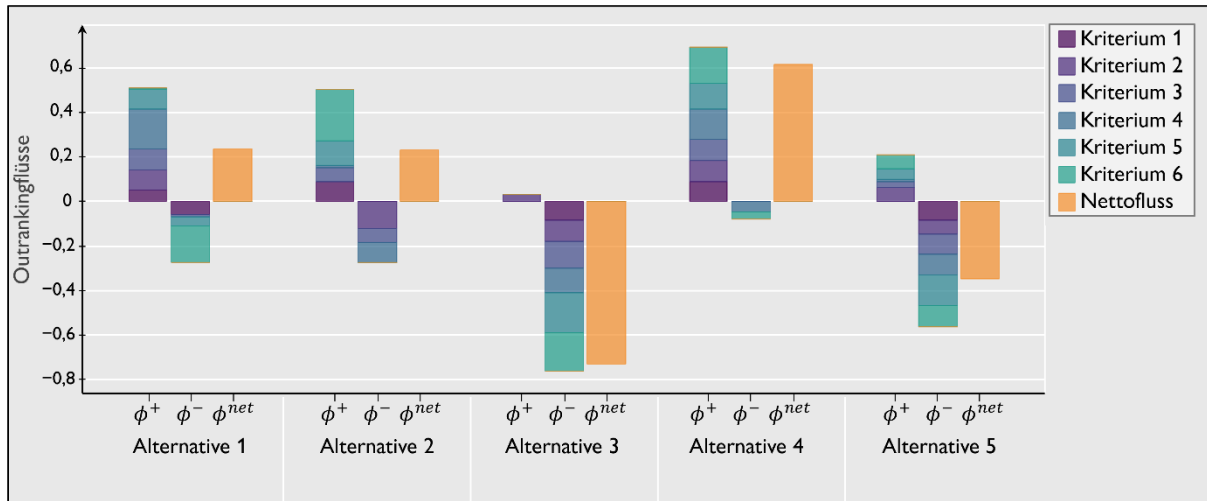


Abbildung 3.7: Visualisierung des Nettoflussbeitrags je Kriterium

Quelle: Eigene Darstellung

Zur Visualisierung der Ergebnisse wird in diesem Zusammenhang häufig ebenfalls die GAIA-Ebene (engl. Geometrical Analysis for Interactive Aid) zur Visualisierung der so erlangten zusätzlichen Informationen verwendet. In der GAIA-Ebene werden die Nettoflüsse je Kriterium (3.24) eines n -dimensionalen Entscheidungsproblems (wobei n der Anzahl entscheidungsrelevanter Kriterien entspricht) via Hauptkomponentenanalyse auf den zweidimensionalen Raum projiziert (vgl. z. B. Belton und Stewart 2002, S. 255; Mareschal und Brans 1988; Brans und Mareschal 1990). Die Alternativen werden in der reduzierten Ebene¹⁴ als Punkte dargestellt und die Kriterien als Linien mit unterschiedlicher Länge. Der durch die Projektion auf den zweidimensionalen Raum bedingte Informationsverlust wird ebenfalls erfasst. Ein Parameter (für gewöhnlich bezeichnet als δ) gibt dabei den Anteil an erhaltenen Informationen an, wobei ein Wert von 1 vollem Informationserhalt entspricht und ein Wert von 0 vollen Informationsverlust bedeutet.

Die GAIA-Ebene besitzt folgende Eigenschaften (vgl. Brans und De Smet 2016, S. 203 f.), verdeutlicht anhand des exemplarischen Beispiels in Abbildung 3.8:

- Die Länge einer Linie drückt die Relevanz eines Kriteriums aus, d. h. sie verhält sich proportional zum Einfluss eines Kriteriums auf den Nettofluss.
- Linien in ähnlicher Ausrichtung spiegeln ähnliche Präferenzen der Entscheidungstragenden hinsichtlich dieser Kriterien wider.

¹⁴ Je nach ursprünglicher Dimensionalität und Anzahl an Kriterien ist die Projektion auf den zweidimensionalen Raum mit mehr oder weniger starkem Informationsverlust verbunden (Mareschal und Brans 1988).

- Linien in entgegengesetzter Ausrichtung deuten auf konfligierende Kriterien hin, d. h. es liegt ein hoher Grad an Zielkonkurrenz vor.
- Kriterien, die in Bezug auf die Präferenzen der Entscheidungstragenden voneinander unabhängig sind, stehen orthogonal zueinander.
- Je näher Punkte beieinander liegen, desto ähnlicher sind sich die Alternativen, d. h. sie weisen ähnliche Kriterienausprägungen vergleichbarer Präferenzstärke auf.
- Je stärker eine Linie auf einen Punkt gerichtet ist, desto besser schneidet die Alternative hinsichtlich dieses Kriteriums ab.

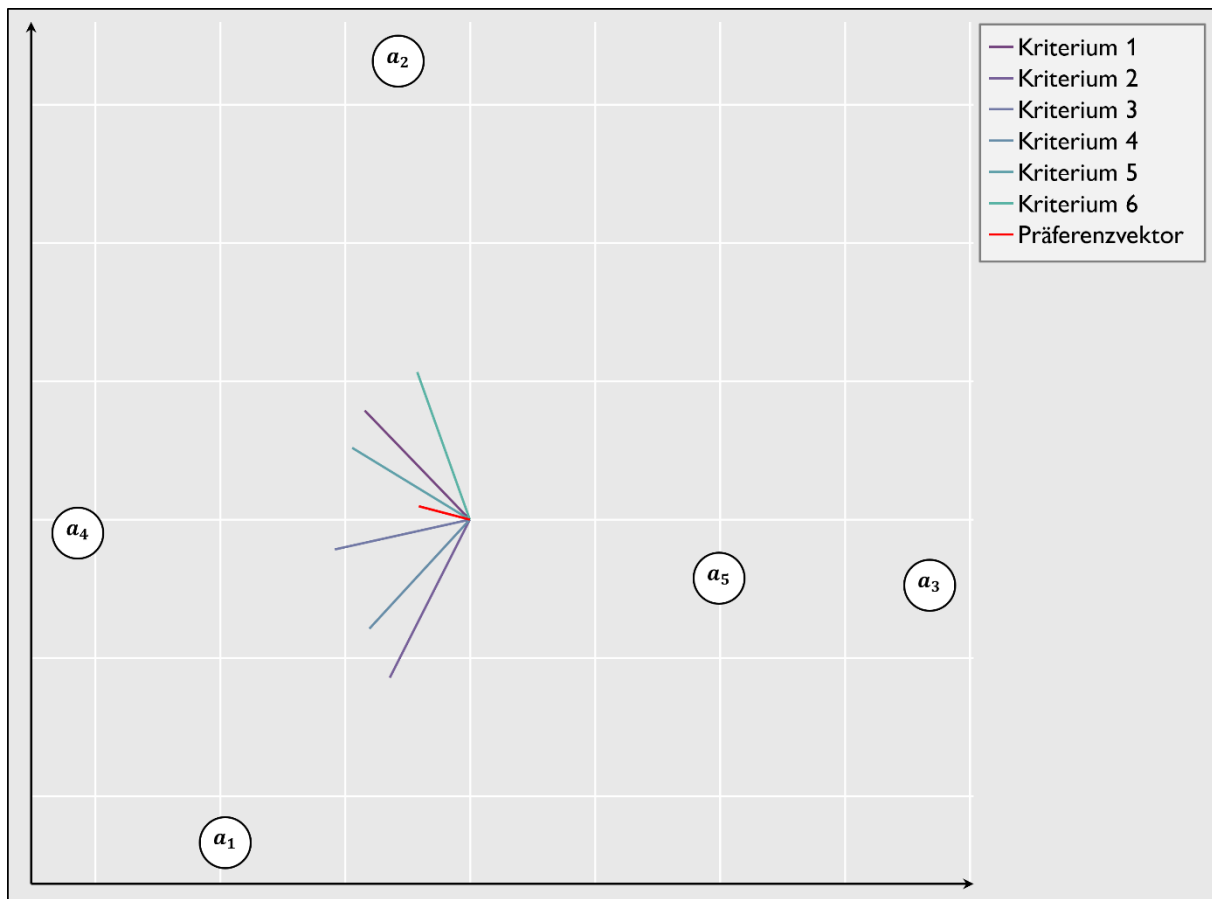


Abbildung 3.8: GAIA-Ebene in PROMETHEE

Quelle: Eigene Darstellung

Ein Präferenzvektor (engl. *decision stick*, dargestellt als rote Linie und formal bezeichnet mit π) ist die Projektion der Präferenzinformationen. Der Präferenzvektor ist vom Ursprung aus auf die stärksten präferierten Alternativen gerichtet, so dass die Ausrichtung der Alternativen am Präferenzvektor der Totalordnung entspricht (Brans und De Smet 2016, S. 205). Die Länge des Präferenzvektors drückt die Aussagekraft der Aggregation nach PROMETHEE aus. Ein lang dargestellter Präferenzvektor drückt aus, dass mindestens eine Alternative in hohem Maße den Präferenzen der Entscheidungstragenden entspricht. Ein kurzer Präferenzvektor zeigt, dass die Kriterien stark miteinander in Konflikt stehen. Bei der derzeitigen Auswahl an Alternativen wäre eine hohe Kompromissbereitschaft erforderlich. Das grafische Sensitivitätstool der PROMETHEE VI Methode (engl. „*human brain*“) bietet in einem solchen Fall zusätzliche Analysemöglichkeiten zur Differenzierung von einfachen und schwierigen Entscheidungssituationen (Brans und Mareschal 1995). Komplettiert wird die PROMETHEE Methodenfamilie durch

die Methoden PROMETHEE III, IV und V. PROMETHEE III bestimmt Präferenzordnungen mit Indifferenzintervallen, PROMETHEE IV bildet eine Totalordnung für überabzählbare Mengen von Alternativen und PROMETHEE V ermöglicht die Anwendung Outranking unter Nebenbedingungen (Brans und Mareschal 1992). Behzadian et al. (2010) geben einen umfassenden Literaturüberblick über die PROMETHEE Methoden I–VI und Anwendungsfälle.

Outranking Verfahren eignen sich, aufgrund ihrer auf paarweisen Vergleichen basierenden Aggregationslogik, besonders für Entscheidungen im Umweltbereich unter Nachhaltigkeitszielen, da Kompensation zwischen Kriterien verhindert werden kann. Die Outranking Verfahren der Familie PROMETHEE bieten dabei zusätzlich eine Reihe an Möglichkeiten, wie z. B. über die GAIA-Ebene oder der Nettoflussbeitragsanalyse, die erlangten Ergebnisse distinguert und in verständlicher Weise darzustellen. Insbesondere bei den komplexen Fragestellungen des WEN bietet sich ihre Anwendung daher an.

3.3.3.4 Ableiten von Handlungsempfehlungen und Implementierung

Die MCDA ist nicht nur eine Reihe von technischen Modellierungs- und Aggregationsmethoden, sondern auch ein Instrumentarium, das zusätzliche Einsichten zur Beurteilung der erzielten Ergebnisse liefert und Unterstützung bei der Kommunikation von Ergebnissen und deren Umsetzung bietet (Belton und Stewart 2002, S. 14 ff.). MCDA Verfahren enden daher nicht nach Aggregation der Entscheidungstabelle und dem Erstellen von Ordnungsrelationen. Vielmehr ist die analytisch gestützte Interpretation der erzielten Ergebnisse, die Beurteilung der Aussagekraft erstellter Ordnungsrelationen und die darauf aufbauende Identifikation konkreter Handlungsempfehlungen ein wesentlicher Bestandteil von MCDA Verfahren.

Eine weitere Analyse der Ergebnisse kann aufgrund von Unsicherheiten erforderlich sein. Unsicherheiten innerhalb der MCDA entspringen im Wesentlichen aus drei verschiedenen Quellen (vgl. Bouyssou 1989; Roy 1989, 2010, 2016):

1. Unsicherheit der zur Definition des Entscheidungsproblems verwendeten Daten. Dies betrifft sowohl die Vollständigkeit der Erfassung der wesentlichen Entscheidungsträger und Interessensgruppen als auch die definierten Handlungsalternativen und die Genauigkeit ihrer (quantifizierten) Konsequenzen beziehungsweise Kriterienausprägungen.
2. Unsicherheit über das externe Umfeld einer Entscheidung. Die Aussagekraft der multikriteriellen Bewertung von Handlungsalternativen hängt maßgeblich von der Richtigkeit der getroffenen Annahmen über das externe Umfeld einer Entscheidung ab, da diese sowohl die definierten Ziele und Absichten als auch die Ausgestaltung der Alternativen beeinflussen. Bei einmaligen Entscheidungen betrifft dies lediglich Annahmen über den Status quo der externen Umweltbedingungen. Bei sukzessiv (sequenziell) umzusetzenden Alternativen handelt es sich darüber hinaus um Annahmen über zukünftige Entwicklungen, die mit zusätzlichen Unsicherheiten behaftet sind.
3. Unsicherheit in den Präferenzinformationen aufgrund von Unvollständigkeit, Stochastizität oder Mehrdeutigkeit (vgl. Abschnitt 3.3.3.2).

Insbesondere Entscheidungsprobleme in komplexen Entscheidungskontexten, wie der Entwicklung langfristiger Maßnahmen im Wasser- und Energiesektor, sind oftmals mit Unsicherheit aus mehreren Quellen behaftet. Daher ist es zur Beurteilung der Ergebnisse und Ableitung von robusten Handlungsempfehlungen wichtig, diese möglichen Quellen von Unsicherheit während des gesamten MCDA-Prozesses zu kennen und in der Analyse zu berücksichtigen. So sollten nach Roy (2016) die bei der Ermittlung von Kriterienausprägungen getroffenen Annahmen kritisch hinterfragt werden. Ebenso sind die

zur Bestimmung der Kriterienausprägungen verwendeten methodischen Werkzeuge mit Bedacht zu wählen. Unsicherheiten über das externe Entscheidungsumfeld kann mittels Szenarien, welche verschiedene mögliche Entwicklungen beschreiben, begegnet werden. Zudem sollte der Einfluss unsicherer Präferenzinformationen auf die Ergebnisse vor Ableitung konkreter Handlungsempfehlungen und Übergang in die Implementierung untersucht werden.

Um die erzielten Ergebnisse zu interpretieren und die Aussagekraft der Ergebnisse zu überprüfen, wird daher üblicherweise die Auswirkung variierender Eingangsdaten auf die errechneten Werte und erlangten Ordnungsrelationen im Sinne von Sensitivitätsanalysen durchgeführt (Beutler und Lienert 2020, S. 83). Sensitivitätsanalysen in MCDA Verfahren können durch weitere Methoden des OR, wie z. B. der Monte-Carlo-Simulation (Mavrotas und Makryvelios 2021; Zheng et al. 2016) oder der mathematischen Optimierung (Doan und De Smet 2018; Siskos und Tsotsolas 2015) problemadäquat ausgestaltet werden. Ergänzende visuelle Darstellungen der Ergebnisse sind zudem ein wirksames Mittel zur Kommunikation des Ausmaßes von Unsicherheit auf die Ergebnisse gegenüber an der Entscheidung beteiligter Personen (vgl. z. B. Haag et al. 2022; Taha und Rostam 2012; Vetschera 1994). Für einige Methodenfamilien, wie z. B. PROMETHEE wurden bereits eigene Sensitivitätsanalysen mit visueller Komponente entwickelt (Brans und Mareschal 1995; Geldermann et al. 2000). Ein Überblick über derzeit verfügbare Sensitivitätsanalysen für PROMETHEE gibt Pohl (2023).

Abbildung 3.9 zeigt zwei Beispiele für Sensitivitätsanalysen anhand des zuvor eingeführten generischen Beispiels auf. Diese Art der Sensitivitätsanalyse kann innerhalb verschiedener MCDA Methoden angewendet werden, wie z. B. den klassischen MADM Verfahren der MAVT beziehungsweise MAUT oder den PROMETHEE Methoden. In Teil (a) ist der Effekt einer variierenden Gewichtung hinsichtlich eines ausgewählten Kriteriums g_j in Bezug auf die Gesamtbewertung der insgesamt fünf Handlungsalternativen verdeutlicht. Bei ursprünglicher Gewichtung w_j sind Alternativen 1 und 2 gleich bewertet und stehen auf dem zweiten Rangplatz. Mit zunehmender Gewichtung von g_j nimmt die Gesamtbewertung von Alternative 1 zu und die von Alternative 2 ab, so dass sich ab einer Gewichtung von w_j' eine Rangvertauschung zwischen den Alternativen 2 und 5 ergibt. Teil (b) zeigt neben den Kriteriengewichten aller 6 Kriterien (Balken) die Bewertung von Alternativen hinsichtlich eines jeden Kriteriums sowie die Gesamtbewertung über alle Kriterien (Linien) auf. Mittels MCDA Software können Entscheidungstragende in dieser Art der Darstellung zudem interaktiv den Effekt einer veränderten Kriteriengewichtung untersuchen (vgl. z. B. Mareschal und De Smet 2009).

Bleiben die Ergebnisse, d. h. die erlangten Ordnungsrelationen, auch unter einer Vielzahl von Berechnungsläufen mit veränderten Eingangswerten gleich, so spricht man in diesem Zusammenhang von robusteren Ergebnissen (Roy 1998).¹⁵ Eine Form der Robustheitsanalyse ist dabei die *Extremranganalyse* (engl. extreme ranking analysis) nach Kadziński et al. (2012). Die Extremranganalyse zeigt alle möglichen Ränge, die eine Alternative in der Totalordnung aller Alternativen unter Berücksichtigung unsicherer Eingangsdaten einnehmen kann (Siskos und Siskos 2022).

¹⁵ Im OR wird das Konzept der Robustheit mit unterschiedlicher Bedeutung verwendet. In dieser Arbeit wird das Konzept der Robustheit nach Roy (2010) definiert. Robustheit bezeichnet dabei die Resistenz analytisch erlangter Erkenntnisse gegenüber unsicheren Annahmen oder Datengrundlagen.

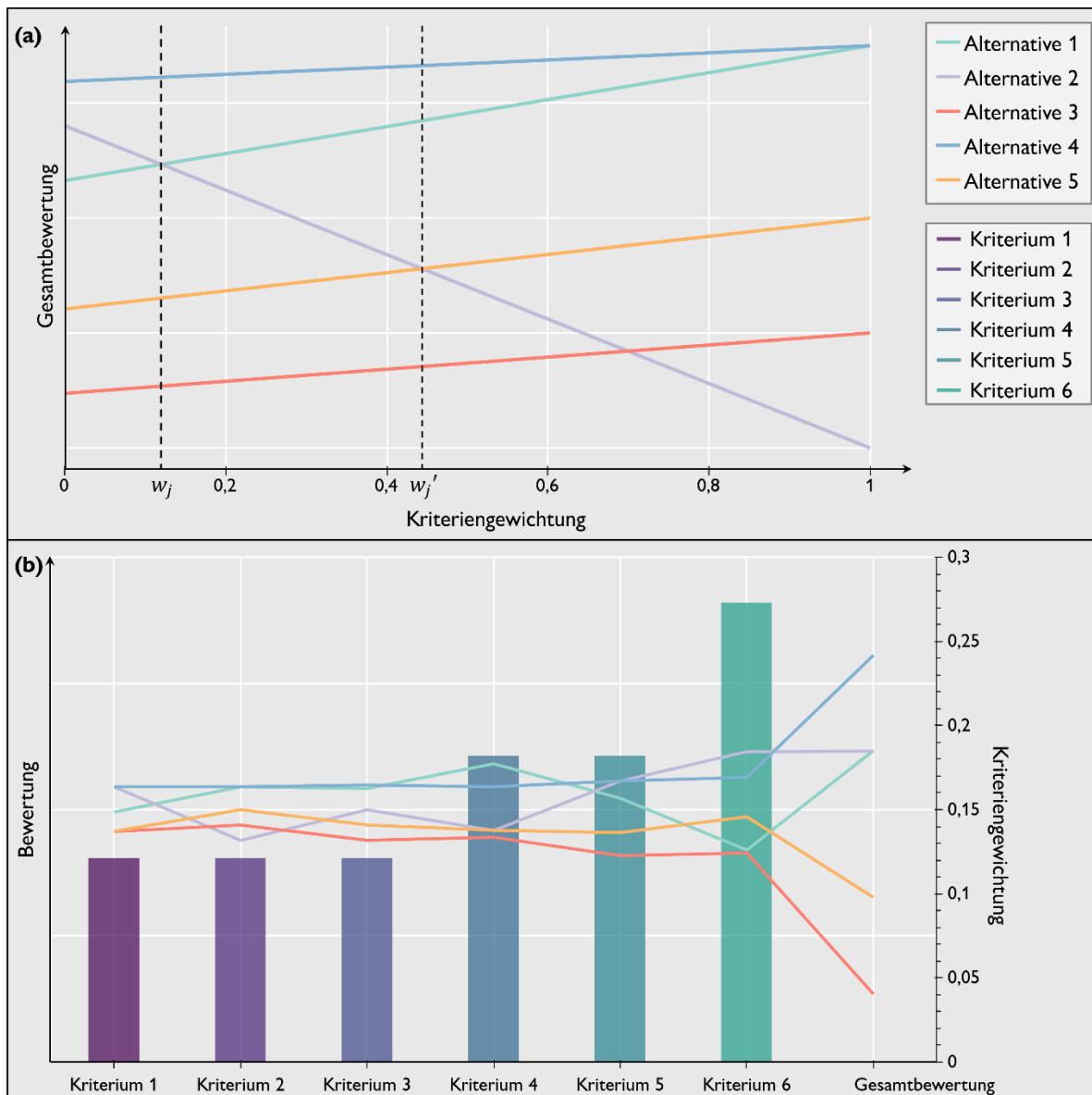


Abbildung 3.9: Beispiele für Sensitivitätsanalysen von Kriteriengewichten in MCDA Verfahren

Quelle: Eigene Darstellung

Ebenso können die nach den Outranking Verfahren PROMETHEE und ELECTRE erhaltenen Präferenzrelationen durch das Phänomen der Rangumkehr in ihrer Stabilität beeinträchtigt sein. Ein gegebenes Entscheidungsmodell in PROMETHEE kann mittels der von Verly und De Smet (2013) vorgestellten Schranke auf die Möglichkeit für Rangumkehr überprüft werden.

$$|\phi^{net}(a_i) - \phi^{net}(a_x)| > \frac{2}{m-1} \cdot \sum_{j: g_j(a_i) \geq g_j(a_x)} w_j \tag{3.25}$$

Solang die Ungleichung (3.25) erfüllt ist, existiert keine potenziell hinzufügbare Alternative, welche die Totalordnung der Alternativen $a_i, a_x \in A$ umkehren kann.

3.4 Kombination von MCDA Verfahren und PSM

In der früheren MCDA-Literatur wurde der Phase der Problemstrukturierung im Allgemeinen weniger Bedeutung beigemessen als der eigentlichen Anwendung eines MCDA-Algorithmus' (Marttunen et al. 2017). Seit den 1980er Jahren wurden jedoch Ansätze wie das *Value-Focused Thinking* von Keeney (1992), das *Structured Decision Making* von Gregory et al. (2012a) oder die *Social Multi-Criteria Evaluation* Verfahren von Munda (2008) als Instrumente entwickelt, um die multikriterielle Entscheidungsanalyse mit Erkenntnissen aus der Verhaltensforschung, der Soziologie und der angewandten Ökologie zur Bearbeitung komplexer Entscheidungsprobleme im Umweltbereich zu verbinden (vgl. z. B. Belton und Stewart 2010; Marttunen et al. 2017). Insbesondere in der Phase der Problemstrukturierung bietet es sich bei komplexen Entscheidungsproblemen an, weitere Instrumente zur Offenlegung des Entscheidungskontextes, zur Generierung von Alternativen oder zur Förderung eines kohärenten Problemverständnisses zwischen allen beteiligten Akteuren einzusetzen, da MCDA zunächst keine formellen Verfahren zur Adressierung dieser Aufgaben beinhalten (vgl. Abschnitt 3.2). Die Ergänzung der MCDA durch Methoden, die diese Aufgaben gezielt und systematisch unterstützen, ermöglicht eine tiefere Untersuchung komplexer Fragestellungen, die Einbeziehung unterschiedlicher Perspektiven und schafft letztendlich eine höhere Ergebnisqualität (Marttunen et al. 2017). Insbesondere für das in dieser Arbeit behandelte Entscheidungsproblem, das dem komplexen Problemkontext des WEN zuordenbar ist und zudem eine Vielzahl von Entscheidungstragenden, Institutionen und weiteren Interessensgruppen involviert, ist daher eine ausführliche Problemstrukturierungsphase, ergänzt durch weitere methodische Instrumente, notwendig.

3.4.1 Problemstrukturierende Methoden

Instrumente, welche die Problemstrukturierung in der MCDA systematisch unterstützen, indem sie Klarheit über die aktuelle Situation, die gewünschte Situation oder Maßnahmen zur Erreichung der gewünschten Situation schaffen, werden allgemein als problemstrukturierende Methoden (engl. problem structuring methods, PSM) bezeichnet (Franco und Rouwette 2022). PSM folgen dabei einem interpretativen Paradigma, das der Ergründung individueller Überlegungen und Motivationen den Vorrang vor quantitativen Daten einräumt. Sie eignen sie sich daher besonders für "unübersichtliche" oder unklar definierte Fragestellungen, wie sie bei umweltbezogenen Entscheidungsproblemen häufig anzutreffen sind (Franco und Rouwette 2022; Belton und Stewart 2010, S. 210). Dies geschieht durch die gezielte Stimulierung des rationalen Denksystems der beteiligten Akteure anstelle des intuitiven und von vereinfachenden Heuristiken geprägten Denksystems (Engin und Vetschera 2017; Kahneman et al. 1982). PSM zielen auf die methodisch geleitete Aufarbeitung von Situationen mit einem hohen Grad an Komplexität und Unsicherheit ab, an denen eine Vielzahl von Akteuren mit unterschiedlichen und divergierenden Interessen beteiligt sind. Dazu sind PSM partizipativ, interaktiv und iterativ angelegt¹⁶ und werden häufig von externen Fachleuten oder Moderatoren unterstützt (vgl. z. B. Papamichail et al. 2007).

Einerseits können PSM den Entscheidungstragenden so helfen, komplexe Zusammenhänge systematisch zu bewältigen, indem das Gesamtproblem in kleinere, besser handhabbare Teile zerlegt und jeder

¹⁶ Der iterative Charakter von PSM ist im Sinne eines wechselseitigen Zusammenspiels zwischen Informationsbeitrag der Akteure und modellgestützter Analyse zu verstehen. Der Prozess wird so lange wiederholt, bis das zugrundeliegende Problem für alle Beteiligten zufriedenstellend strukturiert ist und eine Bewertung der erarbeiteten Alternativen über ein MCDA Verfahren möglich ist (Franco und Rouwette 2022).

Teil für sich betrachtet wird, um iterativ zu einem gemeinsamen Verständnis des Gesamtproblems zu gelangen (Eden 1987). Auf der anderen Seite bieten PSM Kreativitätstechniken, um einzelne Verfahrensschritte im Rahmen einer MCDA zu erleichtern oder beschleunigen, z. B. um eine facettenreiche und einvernehmlich akzeptierte Menge von Handlungsalternativen zu entwickeln (Rosenhead und Mingers 2001). Obwohl PSM in erster Linie zur Strukturierung des Problems eingesetzt werden, können sie auch die spätere Umsetzung einer ausgewählten Handlungsalternative erleichtern, indem sie bereits in einem frühen Stadium des Entscheidungsprozesses eine Plattform für die Diskussion gegensätzlicher Standpunkte bieten (Eden und Ackermann 2004, 2006). So impliziert die Verständigung von verschiedenen Akteuren auf eine einheitliche Menge von Alternativen zwar zunächst keinen Konsens hinsichtlich einer gemeinsam präferierten Alternative. Dennoch wird so der Entscheidungsprozess in unsicheren und konfliktbehafteten Situationen ermöglicht und die Tragfähigkeit der getroffenen Entscheidungen durch die aktive Einbindung von Akteuren erhöht (Franco 2013; Friend 2010; Eden und Ackermann 1998).

3.4.2 Kombinationsmöglichkeiten


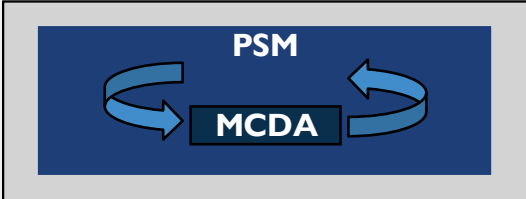
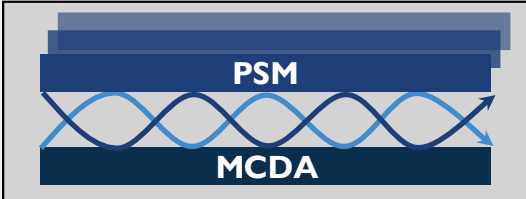
Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher PSM, die im Rahmen einer MCDA eingesetzt werden können. Unter dem Oberbegriff der PSM finden sich in der Fachliteratur zunächst zahlreiche Konzepte und Verfahren, die jedoch nicht alle zwangsläufig mit MCDA Verfahren kombinierbar sind. Einen Gesamtüberblick über gängige PSM mit anschaulichen Fallbeispielen präsentieren Rosenhead und Mingers (2001). Für weitere Übersichten praktischer Anwendungsfälle von PSM sei auf Ranyard et al. (2015), Abuabara und Paucar-Caceres (2021) und Gomes Júnior und Schramm (2022) verwiesen. Belton und Stewart (2010) geben eine umfassende Einführung in die Problemstrukturierung speziell im Kontext der MCDA und beleuchten die Hauptmerkmale wichtiger PSM und deren mögliche Verbindungen zu MCDA Verfahren. Darüber hinaus werden anhand von Fallstudien aus verschiedenen Anwendungsbereichen Hinweise für die Ausgestaltung der kombinierten Anwendung von MCDA und PSM aufgezeigt. Weitere Fallbeispiele für den kombinierten Einsatz von MCDA und PSM mit besonderem Fokus auf verhaltenswissenschaftliche Fragestellungen finden sich in French et al. (2009, S. 266 ff.). Eine aktuelle Übersicht über die Fachliteratur zu PSM, die speziell Komplexität, Unsicherheiten und Konflikte in der Entscheidungsunterstützung adressiert, geben Franco und Rouwette (2022).

Marttunen et al. (2017) untersuchten die Fachliteratur der Jahre 2000-2015 zur kombinierten Anwendung von PSM und MCDA Verfahren. Eine Erläuterung ausgewählter PSM und deren Nutzen für MCDA Verfahren wird im folgenden Abschnitt 3.4.3 gegeben. Die häufigsten Anwendungsgebiete für die Kombination von MCDA und PSM sind Entscheidungsprobleme im Umweltbereich, gefolgt von den Bereichen Energie, Hydrologie und Wasserwirtschaft (Marttunen et al. 2017). In den meisten Anwendungsfällen wird nach Marttunen et al. (2017) dabei jeweils eine PSM mit einem ausgewählten MCDA Verfahren kombiniert (vgl. z. B. Brown et al. 2001; Turcksin et al. 2011). Sofern es die Gegebenheiten des Entscheidungsproblems erfordern, werden jedoch auch mehrere PSM in Kombination mit einer MCDA angewendet. Cuozzo (2014) kombiniert Stakeholderanalyse und Szenarioplanung mit MCDA Verfahren, um nachhaltige Strategien zur regionalen Entwicklung in Italien zu erstellen und bewerten. Lienert et al. (2015) kombinieren die PSM der Stakeholderanalyse, Strategietabellen, kognitiven Abbildungen und Szenarioplanung mit sozialer Netzwerkanalyse zur Bewertung von Wasserversorgungs- und Abwasserinfrastrukturmaßnahmen in der Schweiz via MCDA. Die entwickelten Handlungsalternativen werden mit MAVT Verfahren multikriteriell bewertet. In Madlener et al. (2007) findet

sich ein Beispiel der kombinierten Anwendung von PSM und MCDA im Energiebereich. Zur multikriteriellen Bewertung von Energieszenarien in Österreich werden Szenarioplanung und Stakeholderanalyse in der Problemstrukturierung kombiniert.

Die Auswahl und Ausgestaltung einer konkreten PSM richtet sich stark nach den Merkmalen des vorliegenden Entscheidungsproblems und dem erwünschten Anwendungszweck (Franco und Rouwette 2022, S. 744 ff.). Bei komplexen Entscheidungsproblemen werden PSM und MCDA häufig auch kombiniert eingesetzt, wie die oben dargestellten repräsentativen Arbeiten zeigen. Um den analytischen Herausforderungen und der kontextbedingten Komplexität des vorliegenden Entscheidungsproblems aus dem WEN zu begegnen, bietet sich die Kombination von PSM mit der MCDA bzw. den PROMETHEE Methoden an. Generell sind bislang drei verschiedene Möglichkeiten der Kombination von PSM und MCDA Verfahren bekannt, welche in Tabelle 3.4 aufgeführt sind.

Tabelle 3.4: Möglichkeiten zur Kombination von PSM und MCDA

Kombinationsmöglichkeit	Beschreibung
<p>Sequenzielle Kombination</p> 	<p>Zusätzliche Informationsgewinnung durch eine oder mehrere ausgewählte PSM und Einbindung der gewonnenen Informationen in ein nachfolgendes MCDA Verfahren (vgl. z. B. Bana e Costa et al. 2014; Petkov et al. 2007).</p>
<p>Eingebettete Integration</p> 	<p>Verwendung von MCDA Verfahren als Teil einer generischen oder informellen Methode zur Problemstrukturierung und Entscheidungsfindung. Nutzung der MCDA für dezidierte Aspekte eines Entscheidungsprozesses, z. B. um eine Auswahl generierter Alternativen zu beurteilen und die weitere Ausrichtung einer PSM festzulegen.</p>
<p>Verzahnte Integration</p> 	<p>MCDA Verfahren und eine oder mehrere PSM werden zu einer integrierten Methodik weiterentwickelt. Die Problemstrukturierungsphase eines MCDA Verfahrens wird durch PSM unterstützt, während PSM zugleich den Rahmen für den Aggregations- und Bewertungsprozess der MCDA Methode, z. B. durch Bildung von Szenarien, vorgeben.</p>

Quellen: Eigene Darstellung nach Marttunen et al. (2017), Belton und Stewart (2010, S. 216 ff.) und Mingers und Brocklesby (1997)

3.4.3 Nutzen ausgewählter PSM für MCDA Verfahren

Die verschiedenen PSM haben unterschiedliche Zwecke, so dass zur Unterstützung aller Phasen der Problemstrukturierung innerhalb einer MCDA möglicherweise mehrere PSM erforderlich sind. Einige PSM haben zudem einen sehr engen Anwendungsbereich, während andere PSM in mehreren Phasen einer MCDA ein hohes Maß an Unterstützung bieten können (Marttunen et al. 2017). Tabelle 3.5 fasst

den potentiellen Nutzen ausgewählter PSM in verschiedenen Ablaufschritten der Problemstrukturierung einer MCDA zusammen. Die in der Tabelle ausgewählten PSM sind in der Fachliteratur des OR und der präskriptiven Entscheidungstheorie allgemein anerkannt und verhältnismäßig weit verbreitet.

Die *Stakeholderanalyse* (engl. stakeholder analysis) bezeichnet den Prozess der Identifikation von Einzelpersonen oder Gruppen, die von einer Entscheidung betroffen sein könnten, und die Entwicklung von Strategien für die Einbindung einer jeden Gruppe (Marttunen et al. 2017). Die Methoden der Stakeholder-Analyse zeigen systematische Wege auf, um wichtige Interessensgruppen zu identifizieren und ihre Rollen zu definieren, aber auch um den Entscheidungskontext vollständig offenzulegen und die relevanten Ziele aller beteiligten Akteure zu ermitteln (vgl. z. B. Grimble und Wellard 1997).

Tabelle 3.5: Ausgewählte PSM und Kombinationsmöglichkeiten innerhalb einer MCDA

	Stakeholder analyse	CM / SD	DPSIR	Szenario-planung	SAST	SODA	SGT
Ermittlung d. Entscheidungskontexts	Light Blue	Dark Blue	Medium Blue	Light Blue	Medium Blue	Dark Blue	Medium Blue
Ermittlung von Interessensgruppen	Dark Blue	Light Blue	Lightest Blue	Lightest Blue	Lightest Blue	Lightest Blue	Light Blue
Ermittlung d. Zielsystems	Light Blue	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Lightest Blue	Dark Blue	Lightest Blue
Definition von Kriterien	Lightest Blue	Light Blue	Light Blue	Lightest Blue	Lightest Blue	Lightest Blue	Lightest Blue
Generierung von Alternativen	Lightest Blue	Medium Blue	Light Blue	Medium Blue	Medium Blue	Dark Blue	Dark Blue
Identifikation von Unsicherheiten	Lightest Blue	Lightest Blue	Lightest Blue	Dark Blue	Dark Blue	Lightest Blue	Light Blue

Geringe Unterstützung

 Starke Unterstützung

CM / SD: Cognitive maps / system dynamics
 DPSIR: Driving forces, Pressures, States, Impacts, Responses
 SAST: Strategic Assumptions Surfacing and Testing method
 SODA: Strategic Options Development and Analysis
 SGT: Strategy Generation Table

Quelle: Eigene Darstellung nach Marttunen et al. (2017)

Kognitive Abbildungen (engl. cognitive maps, CM) sind grafische Darstellungen, um individuelle Wahrnehmungen zu einem Thema in Bezug auf wichtige Elemente des Systems und die wahrgenommenen kausalen Beziehungen zwischen diesen Elementen zu erfassen (vgl. z. B. Eden 1992; Bryson et al. 2004). CM können mit Konzepten der Systemdynamik (engl. system dynamics, SD) verknüpft werden, um Ursache-Wirkungsmodelle mit vergleichsweise geringem Bedarf an quantitativem Datenmaterial zu entwickeln (vgl. z. B. Reagan-Cirincione et al. 1991; Vennix 1996). Die Analyse von Ursache-Wirkungs-Beziehungen unterstützt schließlich die Identifikation einzelner Elemente eines Entscheidungsproblems in unklaren Entscheidungskontexten (Eden und Ackermann 2004).

Einen ähnlichen Zweck verfolgt das unter seinem Akronym geläufige Rahmenkonzept *DPSIR* (engl. Driving forces, Pressures, States, Impacts, Responses) zur Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Gesellschaft und Umwelt. Das Rahmenkonzept *DPSIR* wurde in den 1990er Jahren von der OECD entwickelt, um Umweltindikatoren und die Wechselwirkungen zwischen Umwelt und Gesellschaft für politische Entscheidungsfindungen in knapper und übersichtlicher Form zu strukturieren und darzustellen (OECD 1993; Smeets und Weterings 1999). Allerdings steht der *DPSIR*-Rahmen in der wissenschaftlichen Fachliteratur mitunter stark in der Kritik, da komplexe Umweltbeziehungen stark vereinfacht dargestellt werden (Gari et al. 2015; Tscherning et al. 2012).

Szenarioplanung (engl. scenario planning) Bei der Szenarioplanung wird eine überschaubare Anzahl möglicher Entwicklungsverläufe des externen Umfelds entworfen und verwendet, um die Betrachtung auf mehr als eine plausible Zukunft auszudehnen (Gausemeier et al. 1998; Wack 1985). Die Szenarioplanung wird in von Unsicherheiten geprägten Kontexten eingesetzt und bezweckt das Verständnis für Wirkungszusammenhänge zu verbessern und intuitive und eingefahrene Denkmuster in Frage zu stellen (Marttunen et al. 2017; Ram und Montibeller 2013). Die unterstützende und strukturierende Wirkung der Szenarioplanung für eine MCDA liegt sowohl im erzielten Ergebnis, d. h. in ausgearbeiteten und intern kohärenten Szenarien, als auch im Prozess selbst. Die Erarbeitung intern kohärenter Szenarien hilft im Rahmen einer MCDA bei der Entwicklung von Alternativen und der Beurteilung ihrer möglichen Konsequenzen, da hierfür im allgemein etablierten Ablaufschema der MCDA keine speziellen Techniken vorgesehen sind (Lühn et al. 2018; Witt et al. 2020). Darüber hinaus deckt das gemeinsame Durchlaufen des Prozesses der Szenarioerstellung konfliktäre Ansichten unter heterogenen Interessensgruppen auf und bietet einen stimulierenden Rahmen zur Förderung aktiver Partizipation (Wright et al. 2013; Bizikova und Krcmar 2015). Der kombinierte Einsatz von Szenarioplanung und MCDA erfährt in der MCDA-Gemeinschaft wachsende Aufmerksamkeit (vgl. z. B. Durbach und Stewart 2003; Belton und Stewart 2010; Goodwin und Wright 2014; Stewart et al. 2013) und wird zunehmend in MCDA-Anwendungen für umweltbezogene Entscheidungsprobleme eingesetzt (vgl. z. B. Karvetski et al. 2010; Karvetski et al. 2011; Scholten et al. 2015; Santoyo-Castelazo und Azapagic 2014).

Die *Strategic Assumptions Surfacing and Testing* Methode (SAST) ist ein dialektisches Verfahren, welches den Diskurs zwischen unterschiedlichen Standpunkten fördert (Mitroff und Emshoff 1979). Die SAST Methode zielt darauf ab, die bewussten und unbewussten Annahmen von Akteuren in Bezug auf eine Entscheidungssituation zu identifizieren und zu diskutieren. Ziel ist es, die Beziehung zwischen diesen Annahmen und den bestehenden Handlungsalternativen zu untersuchen, um robustere und möglicherweise neuartige Maßnahmen zu konzipieren (Marttunen et al. 2017). Da die SAST Methode ebenfalls die Diskussion über mögliche Entwicklungen anregt, bietet es einen ähnlichen Nutzen wie die Szenarioplanung, eignet sich aber aufgrund der ausgeprägten dialektischen Komponente besser für politische Fragestellungen (vgl. z. B. Mason und Mitroff 1981).

Das Verfahren der *Strategic Options Development and Analysis* (SODA) bearbeitet komplexe Entscheidungsprobleme durch die Erstellung kognitiver Abbildung über Gruppendiskussionen oder Interviews (Eden und Ackermann 2001; Ackermann und Eden 2020). Das Ziel der SODA ist die Identifikation eines Portfolios priorisierter Handlungsalternativen und der zugrundeliegenden Ziele. Die Erstellung kognitiver Abbildungen involviert möglichst alle beteiligten Akteure und wird anschließend in eine gemeinsame kognitive Abbildung für die gesamte Gruppe überführt und als Grundlage zur Erstellung der Alternativen herangezogen (Franco und Rouwette 2022; Marttunen et al. 2017). SODA wird häufig mit

weiteren PSM und MCDA Verfahren kombiniert und auf strategische Fragestellungen im organisatorischen Bereich, in der Entwicklungspolitik oder des Bildungssektors angewendet (Abuabara und Paucar-Caceres 2021).

Eine *Strategietabelle* (engl. strategy generation table, SGT) ist ein Verfahren zur strukturierten Ermittlung von Handlungsalternativen (Howard 1988). Das Grundprinzip einer SGT besteht in der Kategorisierung und Auflistung der wesentlichen Komponenten einer Handlungsalternative. Um eine Alternative zu erstellen, werden anschließend entweder keine, eine oder mehrere Komponenten aus jeder Kategorie ausgewählt. Dieser Prozess wird wiederholt, indem weitere Kombinationen und Permutationen von Komponenten der SGT gebildet und diskutiert werden, um schließlich eine Menge von Alternativen zu erhalten (Gregory et al. 2012a). Eine SGT eignet sich gut, um eine Vielzahl möglicher Varianten von Handlungsalternativen zu untersuchen und vielversprechende Alternativen aufzudecken (Lienert et al. 2015). Wird eine SGT im Rahmen einer MCDA eingesetzt, hilft sie, den Entscheidungskontext zu klären und gezielt Alternativen mit einem gewünschten Profil auf strukturierte und transparente Weise zu generieren (Gregory et al. 2012a). So kann am Ende des Generierungsprozesses jede Alternative mit einer Argumentationsgrundlage untermauert werden (welche anschließend durch Ermittlung der Kriterienausprägungen und multikriterieller Aggregation zu überprüfen ist). SGT sind besonders geeignet für umweltbezogene Entscheidungsprobleme und in vielen Anwendungsfällen in Kombination mit einer MCDA angewendet (vgl. z. B. Clemen und Reilly 2013, S. 261 ff.; Lienert et al. 2015; Gregory et al. 2012b; Parnell et al. 2013). Darüber hinaus sind SGT ein nützliches Werkzeug zur Definition sequenzieller Alternativen, d. h. zur Definition potentieller Lösungen für Entscheidungsprobleme, die eine zeitliche Komponente und Pfadabhängigkeiten beinhalten (Gregory et al. 2012a).

Das Konzept der Pfadabhängigkeit ist in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen wie z. B. der Ökonomie (Arthur 1989), der Soziologie (Mahoney 2000), der Ökologie (Clark 1990) weit verbreitet (Hämäläinen und Lahtinen 2016). Das Bewusstsein für Pfadabhängigkeiten und ihrer möglichen Folgen ist jedoch von besonderer Relevanz für politische Entscheidungen in Kontexten mit hoher Unsicherheit, wie z. B. denen im Umweltmanagement (vgl. z. B. Hämäläinen 2015; Berkhout 2002; Kirk et al. 2007). Generell bezeichnet Pfadabhängigkeit die Mehrdeutigkeit bezüglich abhängiger und unabhängiger Variablen in nichtdeterministischen Systemen (Van den Bergh 2007, S. 18). In nichtdeterministischen Systemen mit Pfadabhängigkeiten bestimmen sich abhängige Variablen aus der Entscheidung über unabhängige Variablen in einem früheren Prozessschritt, so dass sich mit steigender Anzahl gesetzter unabhängiger Variablen zunehmend beschränkte Entscheidungsfreiheit ergibt (Vergne und Durand 2010). Giampietro und Bukkens (2015) beschreibt das Phänomen der Pfadabhängigkeit analog zu einem Sudoku-Rätsel ohne Vorgaben.¹⁷ Auf Entscheidungsprobleme übertragen bedeutet dies: Gegenwärtige Entscheidungssituationen werden durch vergangene Entscheidungen beeinflusst, und gegenwärtig zu treffende Entscheidungen können zukünftige Entscheidungen beeinflussen oder einschränken, d. h. der Status quo hängt vom gewählten Weg zur Erreichung des Status quo ab (Hämäläinen und Lahtinen 2016).

Grundsätzlich sollten die mittels PSM erlangten Informationen kritisch analysiert werden, bevor sie zur Bildung eines Präferenzmodells genutzt werden (Marttunen et al. 2017). Mithilfe einer PSM, wie z. B.

¹⁷ Das Ziel eines Sudoku-Rätsels ist es, eine 9×9-Matrix so mit den Ziffern 1 bis 9 zu befüllen, so dass jede Ziffer in jeder Zeile, Reihe und 3×3-Submatrix jeweils genau einmal vorkommt. Je nach Variante können bereits Ziffern in der zu füllenden Matrix vorgegeben sein (Giampietro und Bukkens 2015).

DPSIR oder CM, erlangte Zielsysteme sollten sowohl auf Vollständigkeit, Redundanzfreiheit und Präferenzunabhängigkeit, als auch hinsichtlich ihrer Anfälligkeit für kognitive Verzerrungen geprüft werden (vgl. Abschnitt 3.3.2.2). Wenn PSM, in welcher Form auch immer, zur Gewichtung von Zielen oder Kriterien verwendet werden, sollte dies unter Beachtung der anschließend gewählten MCDA Aggregationsmethode stattfinden. So fungieren die Kriteriengewichte bei den nutzwertbasierten Verfahren (MAVT) mit additiven Aggregationsmodellen als Skalierungsfaktoren der Kriterienausprägungen. D. h., erhält ein Kriterium g_1 eine doppelt so hohe Gewichtung wie ein Kriterium g_2 , so kann eine doppelt so gute Kriterienausprägung hinsichtlich g_2 diese Gewichtung direkt kompensieren, während diese Möglichkeit bei anderen Aggregationsmethoden, wie z. B. den Outranking Verfahren nicht unmittelbar besteht (Belton und Stewart 2002, S. 134 f.). Letztere interpretieren Kriteriengewichte als relative Wichtigkeit von Kriterien, welche im spezifizierten Maße in die Beurteilung von Alternativen einfließen, d. h. nicht ohne weiteres kompensiert werden können. Bei Anwendung der PSM sollte daher sowohl dem Anwender als auch den befragten Personen bewusst sein, wie die Kriteriengewichte zu verstehen sind (Morton und Fasolo 2009). Ähnliches gilt für die von PSM unterstützte Definition von Handlungsalternativen. Vor Aufstellung der Entscheidungstabelle sollte insbesondere sichergestellt sein, dass alle Alternativen angemessen differenzierbar sind, einheitlichen Annahmen unterliegen und die Ziele des Entscheidungsproblems adressieren (vgl. Abschnitt 3.3.2.3).

3.5 Methodische Einbindung verschiedener Interessensgruppen in Entscheidungsprozesse

In Entscheidungsprozessen ist es aus verschiedenen Gründen oft notwendig weitere Beteiligte einzubeziehen, z. B. zur Einholung von Expertenwissen (Bonner et al. 2002) oder zur Einbindung von Personen und Gruppen, die von einer Entscheidung betroffen sind (Brugha und Varvasovszky 2000; Thabrew et al. 2009). Insbesondere bei umweltbezogenen Entscheidungsproblemen (vgl. z. B. Geldermann et al. 2005; Hämäläinen et al. 2010) wird neben der Gruppe der Entscheider vermehrt ein breiteres Spektrum von Interessensgruppen aktiv in den gesamten Prozess der Entscheidungsfindung einbezogen (Marttunen et al. 2017). In vielen Fällen kann es dabei zu Entscheidungssituationen kommen, in denen unterschiedliche Ziele und Sichtweisen zu unterschiedlichen Handlungsvorschlägen führen und die Ermittlung einer von allen Beteiligten akzeptierten Lösung erforderlich ist (Bertsch und Fichtner 2016). Für solche Situationen wurde eine Reihe von Konzepten entwickelt, die allgemein als Verfahren für Gruppenentscheidungsprobleme (engl. group decision making) bezeichnet werden (Hwang und Lin 2012). Zur Bearbeitung des dieser Arbeit vorliegenden Entscheidungsproblems wurde, gemeinsam mit den beteiligten Akteuren, einvernehmlich ein MCDA Verfahren nach den PROMETHEE Methoden zur Identifikation präferierter Alternativen ausgewählt. Spezielle Techniken zur Gestaltung von Verhandlungsprozessen zur Konsensfindung in Gruppenentscheidungsproblemen (vgl. z. B. Coch und French 1948; Saaty und Peniwati 2013; Zhang et al. 2019) werden in dieser Arbeit daher nicht tiefergehend betrachtet.

Das Erreichen eines Konsens, d. h. die Einigung aller Beteiligten auf eine einstimmige Lösung (Hartmann et al. 2009), ist ein wichtiger Endpunkt solcher partizipativer Entscheidungsfindungsprozesse. Aber selbst nach ausgedehnten Prozessen der Diskussion, des Austauschs und der Verhandlung ist eine einstimmige Einigung auf eine einzige Handlungsalternative nicht zwangsläufig gegeben (Eden und Ackermann 2021; Choudhury et al. 2006; Pérez et al. 2013). Das Streben nach Konsens kann jedoch auch problematisch sein, wenn es das einzige Ziel von Gruppenentscheidungsprozessen ist. Drängt die Gruppe zu früh im Entscheidungsprozess auf Konvergenz, kann dies auf Kosten einer tiefgreifenden Auseinandersetzung mit dem Entscheidungsproblem gehen und wertvolle Minderheitsmeinungen und

innovative Lösungsansätze vernachlässigen (Gregory et al. 2012a, S. 31 f.; Fisher et al. 2011). In einem solchen Fall verleitet die Fokussierung auf Konsens zur Vernachlässigung schwieriger Kompromisse und zur Bevorzugung vage definierter, aber letztlich nicht durchsetzbarer Lösungen, wenn nur alle Beteiligten sich einig sind (Gregory et al. 2001) oder lediglich zustimmen, um den Konsens nicht zu gefährden (Gregory et al. 2012a, S. 30.).

Ein systematischer Prozess zur Unterstützung von Entscheidungsproblemen mit mehreren beteiligten Akteuren sollte daher darauf abzielen, eine gründliche Analyse des Entscheidungsproblems mit der Etablierung gemeinsamer Abwägungsprozesse zu integrieren und sich nicht auf die bloße Erstellung einer Kommunikationsplattform zur Durchführung von Verhandlungsprozessen beschränken (Gregory et al. 2012a, S. 36). Innerhalb eines solchen systematischen Prozesses werden die zugrundeliegenden Zielstellungen von Beteiligten ergründet und hinterfragt, in den Kontext des Entscheidungsproblems eingeordnet und zur Identifikation einer gemeinschaftlich getragenen Lösung verwendet (Hammond et al. 1998). Konfligierende Positionen sollten dabei ausdrücklich nicht als Probleme betrachtet werden, die es zu verdrängen oder zu entschärfen gilt. Vielmehr sollten diese als Ansatzpunkte betrachtet werden, um dahinterliegende Motivationen und Wertevorstellungen zu ergründen und angemessen in den Prozess der Konsensfindung einzubeziehen (Gregory et al. 2012a, S. 5). Dies kann zu Entscheidungen führen, die zwar das Ergebnis eines gewissen Maßes an Verhandlungen sind, aber letztendlich von allen Beteiligten getragen werden, einem breiteren Publikum standhalten und sich als robust gegenüber wechselnden äußeren Umständen und sich verändernden Präferenzen erweisen, da jegliche Art von Kompromiss oder Zugeständnis auf einer kollaborativen Ergründung und Analyse basiert (Raiffa 1982; Bana e Costa 2001).

Ein Prozess zur Unterstützung von Gruppenentscheidungen verlangt somit ein klares und einheitliches Problemverständnis bei allen beteiligten Interessensgruppen und Klarheit über gewünschte Ziele (Gregory et al. 2012a, S. 4; Elsayah et al. 2023). Bei komplexen Problemen im Umweltbereich ist dies jedoch selten der Fall (vgl. z. B. Renn 2006; Ascough et al. 2008; Michaels 2009). Bei komplexen Entscheidungen, die durch mehrere und widersprüchliche Ziele sowie ein breites Spektrum von Alternativen mit unsicheren Folgen gekennzeichnet sind, tendieren Menschen zu einer emotional aufgeladenen Entscheidungsfindung, ohne dabei die Zusammenhänge zwischen Alternativen und deren Konsequenzen vollständig zu verstehen (Korhonen et al. 2018; Scheibehenne et al. 2010). Um diese Schwächen individueller Entscheidungsprozesse in komplexen Umweltfragen zu überwinden, sind Ansätze erforderlich, die über das bloße Zusammenbringen von Menschen in Gruppen und die Konsensfindung im Sinne des bloßen Strebens nach Einstimmigkeit hinausgehen (Gregory et al. 2012a, S. 4; Burgman 2005).

Die MCDA wird zunehmend als hilfreicher Ansatz zur Unterstützung von Gruppenentscheidungen angesehen (vgl. z. B. Keefer et al. 2004; Stewart 1992; Marttunen et al. 2015). Tabelle 3.6 zeigt die wesentlichen Motive zur Anwendung von MCDA Verfahren und den spezifischen Nutzen der MCDA bei Gruppenentscheidungen auf. Im Zeitverlauf wurde eine Reihe von MCDA Verfahren entwickelt, welche eine aktive Partizipation verschiedener Interessensgruppen in Entscheidungsprozesse mit mehreren Zielen methodisch stützen. Beispiele solcher MCDA Verfahren sind etwa das *Decision Analysis Interview* Verfahren von Marttunen und Hämäläinen (2008), die *Stakeholder Multiple Criteria Decision Analysis* (SMCDA) von Banville et al. (1998), das *Social Multi-Criteria Evaluation* Verfahren von Munda (2008) oder die von Macharis et al. (2009) entwickelte *Multi-Actor Multi-Criteria Analysis* (MAMCA). Einen umfassenden Literaturüberblick über MCDA Verfahren für Gruppenentscheidungen geben u. a. Salo et al. (2021). Insbesondere MADM Ansätze gelten allgemein als geeignete MCDA Verfahren zur Konsensfindung in komplexe Gruppenentscheidungsproblemen mit weitreichenden Auswirkungen und

konfligierenden Zielen (Kabak und Ervural 2017; Kilgour et al. 2010). Für das dieser Arbeit vorliegende Entscheidungsproblem, der Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Lösung des Wasserdéfizitproblems im Nahen Osten, ist das Rahmenkonzept der MAMCA besonders geeignet, um die Vorteile von Outranking Verfahren in Gruppenentscheidungsproblemen zu nutzen.

Tabelle 3.6: Motive zur Anwendung von MCDA Verfahren in Gruppenentscheidungen

Motiv	Erläuterung	Nutzen in Gruppenentscheidungen
Bewältigung von Komplexität	Die Anwendung von MCDA Methoden ermöglicht eine strukturierte Bewältigung von Komplexität bei Entscheidungsproblemen.	Hilft bei der systematischen Analyse von Entscheidungsproblemen unter Einbeziehung verschiedener Perspektiven und der Kombination von subjektiven und objektiven Informationen aus unterschiedlichen Quellen.
Transparenz	Entscheidungen basieren auf einer eindeutigen Datengrundlage, explizit formulierten Annahmen und Werten sowie einer nachvollziehbaren Berechnungslogik.	Reduziert das Risiko, dass Entscheidungen durch kognitive Verzerrungen, unbegründete Annahmen oder verborgenen Motiven einzelner Beteiligter beeinflusst werden.
Legitimation	Einbettung von MCDA Verfahren in bestehende institutionelle und organisatorische Strukturen.	MCDA verleiht Gruppenentscheidungen durch methodische Werkzeuge zur aktiven Partizipation Tragfähigkeit.
Nachvollziehbarkeit	Mit dem Durchlaufen des strukturierten Ablaufs einer MCDA entsteht zugleich eine Dokumentation über den Prozess der Entscheidungsfindung.	Die Durchführung einer MCDA ermöglicht eine nachträgliche Analyse des Entscheidungsprozesses innerhalb der Gruppe und kann zu Lerneffekten (z. B. durch gemeinsame Änderung von Eingangswerten) führen.
Problemverständnis	Verbessertes Verständnis des Entscheidungsproblems durch strukturiertes Aufbrechen der Komplexität und gegenseitigen Austausch.	Hilft bei der Identifikation von Übereinstimmungen und Konfliktpotenzialen und bringt analytische Tiefe in den Prozess der Konsensfindung.

Quelle: Eigene Darstellung nach Salo et al. (2021)

3.5.1 Die Multi-Actor Multi-Criteria Analysis

Das Verfahren der MAMCA ermöglicht die Erweiterung etablierter MADM und Outranking Aggregationsmethoden auf Gruppenentscheidungen (Macharis et al. 1998). In diesen MCDA Verfahren wird üblicherweise für alle am Entscheidungsprozess beteiligten Personen ein gemeinsames Zielsystem ermittelt beziehungsweise eine einheitliche Kriterienhierarchie aufgestellt (vgl. z. B. Belton und Stewart 2002; Greco et al. 2016). Voraussetzung dafür ist, dass die Gruppe homogen ist oder sich auf eine gemeinsame Kriterienhierarchie einigen kann. Eine solche Annahme kann auf Gruppenentscheidungen im organisatorischen Kontext zutreffen, in dem verschiedene Abteilungen oder Personen gegensätzliche Ansichten haben können, aber schlussendlich ein gemeinsames übergeordnetes Ziel verfolgen, welches in der Schaffung von Mehrwert für das Unternehmen besteht (Macharis et al. 2015). In einem breiteren sozialen und umweltbezogenen Kontext, wie auch dem WEN im Nahen Osten, ist eine Gruppe jedoch selten homogen, sondern vertritt eine Vielzahl übergeordneter Ziele, die oft im Widerspruch zueinander stehen (vgl. z. B. Munda 2004; Kilgour et al. 2010, S. 334 f.).

MAMCA ermöglicht die Erstellung unterschiedliche Zielsysteme und Kriterienhierarchien, wodurch sich widersprüchliche Ziele verschiedener Interessensgruppen besser in Gruppenentscheidungsproblemen modellieren lassen (Huang 2023; Te Boveldt et al. 2021). Kriterien und Präferenzinformationen werden für jede Interessensgruppe somit spezifisch erhoben und im Aggregationsprozess der MCDA berücksichtigt, wodurch sich in den MCDA Methoden eine zusätzliche Ebene der Analyse ergibt (Macharis et al. 2012). Einerseits können, wie bei Anwendung der ausgewählten MCDA Methode außerhalb des MAMCA Verfahrens, Präferenzrelationen der Alternativen über alle Akteure aufgestellt werden. Andererseits können durch die Einbeziehung spezifischer Kriterienhierarchien und Präferenzinformationen innerhalb des MAMCA Verfahrens jedoch auf Ebene einzelner Akteure zusätzliche Informationen gewonnen werden. So können sowohl Akteure mit stark abweichender Präferenz für bestimmte Alternativen identifiziert werden, als auch die Kriterien, welche verantwortlich für diese abweichende Bewertung sind (Macharis und Bernardini 2015). Diese Informationen eröffnen wichtige Startpunkte für eine strukturierte Konsensfindung, wie z. B. durch die gezielte Veränderung bestimmter Alternativen oder die Entwicklung gänzlich neuer Alternativen auf Basis der erlangten Erkenntnisse über die Präferenzen einzelner Akteure.

Die Erhebung von spezifischen Kriterien und Präferenzinformationen pro Interessensgruppe innerhalb von MAMCA lockert zudem die Anforderungen an Präferenzunabhängigkeit von Kriterien (Macharis et al. 2009). Sind zwei Kriterien präferenzabhängig voneinander, so führt dies bei additiven Aggregationsmethoden zu ungewünschter Doppelbewertung von Alternativen (Keeney und Raiffa 1993, S. 111; Goodwin und Wright 2014, S. 53 ff.). Folglich spiegeln die Kriteriengewichte nichtmehr die tatsächliche Wichtigkeit eines Kriteriums für die Gesamtbewertung einer Alternative wider und verlieren ihre Funktion als Skalierungsfaktor (Belton und Stewart 2002, S. 134). Im Rahmen von MAMCA repräsentieren die Kriterien spezifische Ziele einzelner Akteure und die Kriteriengewichte die relative Wichtigkeit eines Kriteriums für einen Akteur. Redundanzen oder Abhängigkeiten über Akteure hinweg sind daher zugelassen und haben keinen ungewünschten Effekt auf die Aggregationsprozedur, sollten jedoch innerhalb von Kriterienhierarchien eines einzelnen Akteurs weiterhin vermieden werden (Macharis et al. 2012).

Als Aggregationsprozedur sind in MAMCA eine Reihe gängiger MCDA Verfahren, wie z. B. die bereits vorgestellten Verfahren MAVT/MAUT, AHP, ELECTRE oder PROMETHEE anwendbar (Macharis et al. 2012). Bislang werden vor allem AHP und PROMETHEE in MAMCA verwendet (Macharis et al.

2012; Macharis und Bernardini 2015). Anwendungskontexte charakterisieren sich durch eine hohe Anzahl beteiligter Akteure, wie z. B. im Transport- und Logistiksektor (Huang et al. 2021b; Macharis et al. 2010; Hadavi et al. 2018; Verlinde und Macharis 2016), bei der Erstellung von Bewertung von nachhaltigen Mobilitätskonzepten (Huang et al. 2021a; Macharis et al. 2010), der Planung von städtischen Wassereinzugsgebieten (Martin et al. 1999) oder der Energiesystemplanung (Haralambopoulos und Polatidis 2007; Kourouma und Waaub 2004).

3.5.2 Die Multi-Actor Multi-Criteria Analysis mit PROMETHEE

Das MCDA Verfahren der MAMCA läuft in sieben iterativen Schritten ab. Die Inhalte der Verfahrensschritte und das Ablaufschema sind in Abbildung 3.10 aufgezeigt und orientieren sich eng am allgemeinen etablierten Ablauf einer MCDA (vgl. z. B. Belton und Stewart 2002, S. 6; Lerche 2016, S. 14).

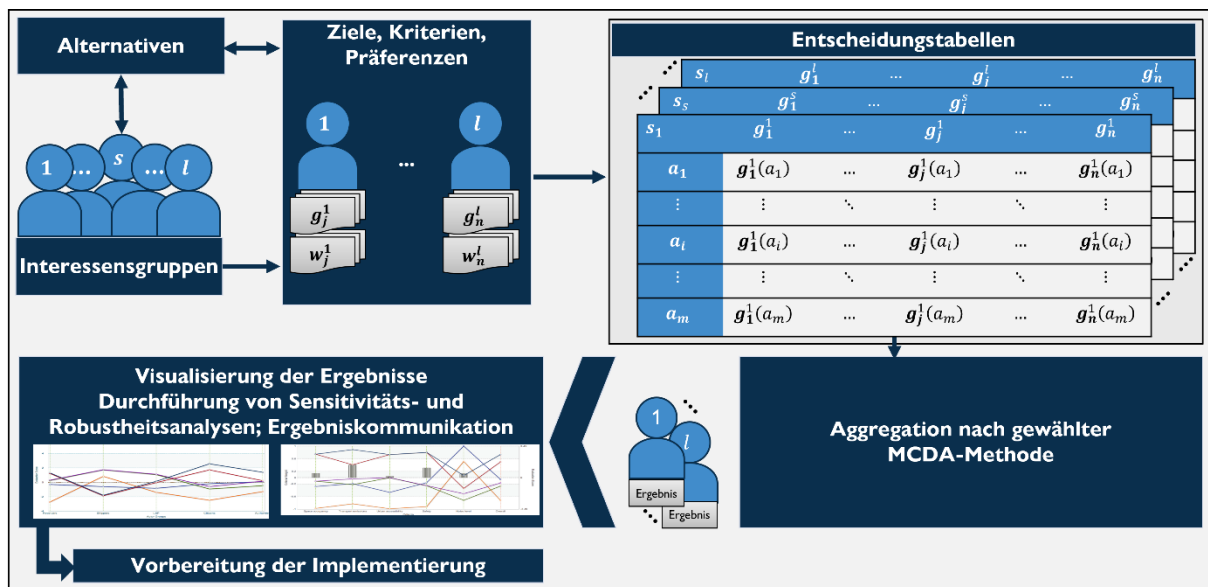


Abbildung 3.10: Ablaufschema der Multi-Actor Multi-Criteria Analysis

Quelle: Eigene Darstellung nach Macharis et al. (2009) und Schär und Geldermann (2021)

Die ersten Schritte der MAMCA bestehen somit ebenfalls in der Identifikation des Entscheidungsproblems und der Problemstrukturierung. Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten MCDA Verfahren werden bei der MAMCA sowohl die Ziele von Entscheidungstragenden als auch von weiteren Interessensgruppen explizit und während des gesamten MCDA Verfahrens einbezogen (vgl. z. B. Banville et al. 1998). Sowohl Entscheidungstragende, als auch Interessensgruppen stellen aktiv teilhabende Akteure dar, deren Ziele und Präferenzen in der Erstellung eines Präferenzmodells und Aggregation berücksichtigt werden (Macharis et al. 2009). Macharis et al. (2009) betonen, dass die Identifikation von Interessensgruppen deshalb vorangestellt werden sollte, um Zielsysteme zu ermitteln und vollständige Kriterienhierarchien aufstellen zu können. Die Menge der eingebundenen Akteure, bezeichnet mit

$$S = \{s_1, \dots, s_s, \dots, s_l\},$$

umfasst somit alle Entscheidungstragenden und Interessensgruppen. Gemeinsam mit jedem Akteur $s_s \in S$ wird ein eigenes Zielsystem erstellt, so dass mit jedem Akteur eine Menge entscheidungsrelevanter Kriterien erhoben werden, wobei

$$g_j^s \in G^s = \{g_1^s, \dots, g_n^s\},$$

ermittelt wird. Darüber hinaus wird den Stakeholdern die Möglichkeit gegeben Alternativen zu diskutieren, so dass neue Alternativen berücksichtigt werden können, wenn die Identifikation aller Interessensgruppen und die Erarbeitung von Kriterienhierarchien der Erstellung von Alternativen vorangestellt wird. Die Menge der Alternativen

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_m\}$$

ist über alle Akteure konstant, d. h. der Bewertungsgegenstand ist eine einheitliche und gemeinsam festgelegte Auswahl von Handlungsmöglichkeiten (Macharis et al. 2009; Macharis et al. 2012).

Dabei kann es vorkommen, dass die Zielsysteme einzelner Akteure nur Partikularinteressen widerspiegeln und nicht, wie von einigen MCDA Verfahren gefordert, sämtliche Konsequenzen der Alternativen abdecken (vgl. z. B. Keeney 1992, S. 82 ff.). Werden alle relevanten Akteure einbezogen, spiegelt sich das gesamte Spektrum möglicher Konsequenzen jedoch in der Summe aller Ziele wider. Die Überprüfung der Vereinigung aller Zielsysteme, $\bigcup_{s=1}^l G^s$, wird daher vor der Präferenzenerhebung empfohlen und kann zusätzlich Aufschluss über eventuell unentdeckte Interessensgruppen liefern (Macharis et al. 2009). Die für eine Aggregation nach den PROMETHEE Methoden benötigten Präferenzinformationen in Form von Kriteriengewichten und Präferenzschwellenwerten werden ebenfalls für jeden Akteur separat erhoben. Die Kriteriengewichte eines Akteurs

$$w_j^s \in W^s = \{w_1^s, \dots, w_n^s\}$$

werden jeweils auf das Intervall $[0, 1]$ normiert, so dass die Kriteriengewichte sich je Akteur zu 1 aufsummieren:

$$\sum_{j=1}^n w_j^s = 1, \quad w_j^s \geq 0, \quad \forall s = 1, \dots, l \quad (3.26)$$

Anschließend werden die Kriterienausprägungen $g_j^s(a_i)$ ermittelt und für jeden Akteur wird eine separate Entscheidungstabelle erstellt.

Die Entscheidungstabellen und Präferenzinformationen werden zur Erstellung eines Präferenzmodells zunächst für jeden Akteur nach PROMETHEE aggregiert. Hierzu werden die in Abschnitt 3.3.3 vorgestellten Aggregationsschritte auf die Entscheidungstabelle eines jeden Akteurs angewendet, um Präferenzindikatoren gemäß Gleichung (3.27), Präferenzindizes nach Gleichung (3.28) und Outrankingflüsse wie in den Gleichungen (3.29)–(3.32) auf der Ebene eines Akteurs zu ermitteln:

$$p_j^s(a_i, a_x) = P_j^s \left(d_j^s(a_i, a_x) \right) = P_j^s \left(g_j^s(a_i) - g_j^s(a_x) \right), \quad \begin{array}{l} \forall a_i, a_x \in A, \\ \forall j = 1, \dots, n \\ \forall s = 1, \dots, l \end{array} \quad (3.27)$$

$$\pi^s(a_i, a_x) = \sum_{j=1}^n p_j^s(a_i, a_x), \quad \begin{array}{l} \forall a_i, a_x \in A \\ \forall s = 1, \dots, l \end{array} \quad (3.28)$$

$$\phi_j^{net,s}(a_i) = \frac{1}{m-1} \sum_{a_x \in A} [p_j^s(a_i, a_x) - p_j^s(a_x, a_i)], \quad \begin{array}{l} \forall j = 1, \dots, n \\ \forall s = 1, \dots, l \end{array} \quad (3.29)$$

$$\phi^{net,s}(a_i) = \sum_{j=1}^n \phi_j^{net,s}(a_i) \cdot w_j^s, \quad \begin{array}{l} \forall a_i \in A \\ \forall s = 1, \dots, l \end{array} \quad (3.30)$$

$$\phi^{+,s}(a_i) = \frac{1}{m-1} \sum_{a_x \in A} \pi^s(a_i, a_x), \quad \begin{array}{l} \forall a_i \in A \\ \forall s = 1, \dots, l \end{array} \quad (3.31)$$

$$\phi^{-s}(a_i) = \frac{1}{m-1} \sum_{a_x \in A} \pi^s(a_x, a_i), \quad \begin{array}{l} \forall a_i \in A \\ \forall s = 1, \dots, l. \end{array} \quad (3.32)$$

Anschließend wird eine Aggregation über alle Akteure unter Berücksichtigung eines Gewichtungsfaktors ω^s für jeden Akteur vorgenommen und der Nettofluss für jede Alternative über alle Akteure ermittelt:

$$\phi^{net}(a_i) = \sum_{s=1}^l \omega^s \cdot \phi^{net,s}(a_i), \quad \forall a_i \in A, \quad (3.33)$$

wobei

$$\sum_{s=1}^l \omega^s = 1. \quad (3.34)$$

Üblicherweise wird jedem Akteur der gleiche Gewichtungsfaktor, d. h. ein identisches Stimmgewicht zugewiesen (vgl. z. B. Macharis et al. 2009; Macharis et al. 2010; Verlinde und Macharis 2016). In der entscheidungstheoretischen Fachliteratur wird der angemessene Umgang mit zu aggregierenden Präferenzinformationen verschiedener Akteure jedoch intensiv diskutiert (vgl. z. B. Keeney 1976; Munda 2004). So werden mitunter auch technische Verfahren zur Ermittlung individueller Gewichtungsfaktoren für jeden Akteur vorgeschlagen (vgl. z. B. Ramanathan und Ganesh 1994).

Die zweistufige Aggregationsprozedur der MAMCA in Verbindung mit PROMETHEE bietet in den komplexen Entscheidungsproblemen des WEN die Möglichkeit, zusätzliche Informationen zur Entscheidungsunterstützung und möglichen Kompromissfindung zu gewinnen. Auf übergeordneter Ebene, d. h. über alle Akteure, können so diejenigen Akteure identifiziert werden, die eine deutlich andere Rangfolge der Alternativen haben als andere Entscheidungsträger und daher einen erheblichen Einfluss auf die Stabilität der Gesamtbewertung haben. Auf Ebene einzelner Akteure können durch eine Analyse der Nettoflussbeiträge $\phi_j^{net,s}$ die Kriterien, die hauptverantwortlich für eine von den anderen Akteuren abweichende Rangfolge sind, identifiziert werden (vgl. z. B. Macharis und Bernardini 2015). Insbesondere bei der Entwicklung von grenzübergreifenden Wasser- und Energieinfrastrukturmaßnahmen mit Akteuren aus Israel, Jordanien und Palästina ist diese Fähigkeit von MAMCA mit PROMETHEE als Aggregationsverfahren nützlich. Eine gezielte Sensitivitätsanalyse der Kriteriengewichte kann an dieser Stelle ein vielversprechender Ansatz sein, um den Prozess der Konsensfindung anzustoßen oder Modifikationen der betrachteten Maßnahmen zu diskutieren (Schär und Geldermann 2021).

3.6 Zusammenfassung

Die Verfahren der multikriteriellen Entscheidungsanalyse sind dem Bereich der präskriptiven Entscheidungstheorie zuzuordnen und unterstützen durch eine strukturierte Ermittlung und Bewertung alternativer Handlungsoptionen bei Vorliegen von Zielkonflikten in schwierigen Entscheidungssituationen. Sowohl die Vorgabe einer gewissen Prozessstruktur als auch die systematische Erfassung der wesentlichen Elemente von Entscheidungsprozessen fördern letztlich die Rationalität des Entscheidungsverhaltens und helfen, unbewussten Verzerrungen entgegenzuwirken. Damit sind die Methoden der MCDA grundsätzlich geeignet, das dieser Arbeit vorliegende Entscheidungsproblem methodisch zu adressieren.

MCDA Verfahren kategorisieren oder ordnen eine Menge von Handlungsalternativen, indem sie die entscheidungsrelevanten Ziele und Präferenzen der involvierten Interessensgruppen modellgestützt identifizieren. Die Anwendung eines ausgewählten MCDA Verfahrens kann Entscheidungstragenden helfen, die aus dem Entscheidungskontext resultierende Komplexität zu bewältigen, das Problemverständnis zu fördern und den Entscheidungsprozess transparent und nachvollziehbar zu gestalten.

MCDA Verfahren werden in drei wesentliche Verfahrensklassen eingeteilt. Klassische MADM und Outranking Verfahren eignen sich besonders für Problemkontexte, in denen zunächst weder Rahmenbedingungen und Ziele noch Anforderungen an mögliche Handlungsoptionen bekannt sind. Sie sind daher deutlich besser geeignet als MODM Verfahren für den vorliegenden Problemkontext des WEN. Klassische MADM und Outranking Verfahren unterscheiden sich in ihren Prämissen und ihrer Aggregationslogik, um Alternativen zu kategorisieren und zu ordnen. Klassische MADM Verfahren wie MAVT oder MAUT basieren auf der Annahme, die Präferenzen von Entscheidungsträgern hinsichtlich gegebener Ziele hinreichend genau erheben und funktional abbilden zu können. Outranking Verfahren gewähren im Prozess der Präferenzmodellierung gegenüber den klassischen MADM-Verfahren mehr Freiheitsgrade, da in unsicheren und komplexen Entscheidungskontexten eine exakte und widerspruchsfreie Präferenzmodellierung nicht immer gegeben ist. Während klassische MADM-Verfahren Präferenzrelationen über einen synthetisierenden Gesamtwert ermitteln, basieren Outranking Verfahren auf paarweisen Vergleichen von Alternativen und einer distinguierten Präferenzdarstellung. Dadurch können zusätzliche Präferenzrelationen abgeleitet und Kompensationen vermieden werden. Für Entscheidungen im Umweltbereich unter Nachhaltigkeitszielen, bei denen eine Kompensation zwischen den Nachhaltigkeitsdimensionen oder zwischen einzelnen Teilzielen meist unerwünscht ist, sind Outranking Verfahren daher besonders geeignet.

Eine Methodenklasse an Outranking Verfahren, die häufig im Zusammenhang mit Umweltentscheidungsproblemen eingesetzt werden, sind die PROMETHEE Methoden. PROMETHEE Methoden erlauben, in der Entscheidungstabelle Kriterienausprägungen in unterschiedlichen Maßeinheiten anzugeben, da erst in der Aggregationsprozedur die Überführung in dimensionslose Präferenzindikatoren stattfindet. So können die Alternativen hinsichtlich ökonomischer Kriterien in monetären Einheiten bewertet werden, umweltbezogene Wirkungen (z. B. CO₂-Äquivalente) können direkt aus ökobilanziellen Bewertungen übernommen werden und Kriterien aus technischen oder gesellschaftlichen Zielstellungen können ebenfalls in der ursprünglichen Maßeinheit eingebracht werden, sofern ein kardinales Skalenniveau vorliegt. Zudem erfordert die Aggregationsprozedur der PROMETHEE Methoden vergleichsweise wenig Eingangsdaten seitens der Entscheidungstragenden und bietet gegenüber weiteren Outranking Verfahren wie ELECTRE eine bessere Nachvollziehbarkeit der erlangten Präferenzrelationen und eingängige und intuitiv verständliche Visualisierungen.

Während die Anwendung von MCDA Verfahren wie PROMETHEE grundsätzlich der Strukturierung eines Entscheidungsproblems dient, kann bei komplexen Problemzusammenhängen der Einsatz ergänzender methodischer Werkzeuge zur Aufbereitung der Entscheidungssituation im gewünschten Detaillierungsgrad und zur Erhöhung der Ergebnisqualität der MCDA erforderlich sein. Bei Anwendung der MCDA auf komplexe Entscheidungsprobleme wie dem WEN bietet sich daher der kombinierte Einsatz von PSM und MCDA Verfahren an. PSM bieten Kreativitätstechniken und Werkzeuge zur strukturierten Aufbereitung komplexer Entscheidungszusammenhänge und Überführung in ein bewertbares Modell, auf welches anschließend ein MCDA Verfahren angewendet werden kann.

Darüber hinaus bieten MCDA Verfahren die Möglichkeit weitere Personengruppen aktiv in den Entscheidungsprozess einzubinden. Das Verfahren der MAMCA ermöglicht die Erweiterung von Outranking Aggregationsmethoden auf Entscheidungen mit einer Vielzahl beteiligter Interessensgruppen mit einem weiten Spektrum an Perspektiven und Zielen. Da Kriterien und Präferenzinformationen für jede Interessensgruppe separat erhoben und explizit im Aggregationsprozess berücksichtigt werden, ergeben sich zusätzliche Einsichten die genutzt werden können, um den Prozess der Konsensfindung anzustoßen und die Akzeptanz zu implementierender Maßnahme zu erhöhen.

Im folgenden Kapitel wird deshalb ein neues MCDA Verfahren zur für die Erstellung und Bewertung von Maßnahmen zur Lösung des Wasserdefizitproblems im Nahen Osten entwickelt, welches auf MAMCA-PROMETHEE basiert und ausgewählte PSM kombiniert. Das Verfahren ermöglicht es somit, das vielschichtige Entscheidungsproblem mit Fragestellungen aus dem Energie-, Wasser- und Umweltsektor aus einer Nexus-Perspektive zu betrachten und den damit verbundenen zusätzlichen Anforderungen gerecht zu werden.

4 MCDA Verfahren im Wasser-Energie Nexus

In den vorangehenden Kapiteln wurde, auf Basis der in Abschnitt 1.2 aufgestellten Forschungsfragen, der Entscheidungskontext des WEN und verschiedene Verfahren zur Entwicklung und multikriteriellen Bewertung von Handlungsmaßnahmen vorgestellt. Das in dieser Arbeit behandelte Entscheidungsproblem der Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Behebung des Wasserdefizitproblems im Nahen Osten ist ebenfalls dem komplexen Problemkontext des WEN zuordenbar. Im Konzept des WEN treffen eine Vielzahl von Perspektiven auf einen gemeinsamen Betrachtungsgegenstand aufeinander (van Gevelt 2020). Wissenschaftler aus den Bereichen der Ökologie, Ökonomie, Hydrologie, Agrarwissenschaft und Soziologie treffen auf technische Experten, Ingenieure und Entscheidungstragende aus politischen Institutionen und zivilgesellschaftliche Interessen (Soleimani et al. 2022). Zusätzlich umfasst der Betrachtungsgegenstand des WEN intersektorale und häufig grenzüberschreitende Entscheidungsprobleme des Umweltmanagements (Grigg 2019; Gain et al. 2013). Bereits bei sektoralen Ansätzen, wie z. B. dem Konzept des IWRM zur Planung und Allokation von Wasserressourcen, treffen eine Vielzahl verschiedener Ansichten aufeinander. Bei Entscheidungsproblemen im WEN sind darüber hinaus viele weitere Akteure mit unterschiedlichem Hintergrundwissen und heterogenen Ansprüchen an der Entscheidungsfindung beteiligt. Mehrdimensionale Nachhaltigkeitsziele, wie die SDGs (vgl. Abschnitt 2.1), können ebenfalls mittels MCDA Verfahren in der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden (vgl. Saltelli und Giampietro 2017; Giampietro et al. 2013). Die Aufgabe der MCDA im WEN besteht daher darin, die einzelnen Interessensgruppen mit ihren unterschiedlichen Perspektiven und Ansprüchen in einen Dialog zu führen und die aus den verschiedenen fachspezifischen Modellen gewonnenen Ergebnisse unter Berücksichtigung der zugrundeliegenden Zielstellungen integrativ zu bewerten (Ghodsvali et al. 2019).

Ein Überblick über den Ablauf der MCDA als etabliertes Konzept zur Bearbeitung von Entscheidungsproblemen im Umweltbereich wurde in Kapitel 3 gegeben. Zudem wurden die zugrundeliegenden Prämissen und Funktionsweisen etablierter MCDA Verfahren untersucht. Zur Bearbeitung des Entscheidungsproblems dieser Arbeit wurde ein MAMCA Verfahren mit PROMETHEE als Aggregationsverfahren gewählt, um die kontextbedingte Heterogenität der Akteure in der Präferenzmodellierung zu berücksichtigen und die, aufgrund der nachhaltigkeitsbezogenen Zielstellungen, unerwünschte Kompensation in der Aggregation zu vermeiden.

Die Ergänzung der MCDA durch gezielt gewählte und ausgestaltete problemstrukturierende Methoden und weitere analytische Instrumente ist eine Möglichkeit zur Bewältigung der kontextabhängigen Komplexität des WEN. In diesem Kapitel wird daher, auf Grundlage der bislang erarbeiteten Erkenntnisse, ein neues MCDA Verfahren zur Bearbeitung der Problemstellung dieser Arbeit entwickelt. Das MCDA Verfahren für die Erstellung und Bewertung von Maßnahmen zur Lösung des Wasserdefizitproblems im Nahen Osten berücksichtigt dabei insbesondere die Implikationen, aus einer gemeinsamen Betrachtung des Wasser- und Energiesektors nach dem Konzept des WEN.

In Abschnitt 4.1 werden dafür zunächst die Anforderungen an die Entscheidungsunterstützung und an MCDA Verfahren im Kontext des WEN erarbeitet. In Abschnitt 4.2 werden bestehende Verfahren und methodische Instrumente für die Entscheidungsunterstützung im Kontext des WEN identifiziert, vorgestellt und analysiert. Das entwickelte MCDA Verfahren, um Maßnahmen zur Lösung des Wasserdefizitproblems im Nahen Osten nach dem Konzept des WEN zu entwickeln und zu bewerten, wird in Abschnitt 4.3 vorgestellt.

4.1 Anforderungen an MCDA Verfahren im WEN

Der mehrdimensionale Ansatz des WEN zielt darauf ab, bestehende Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen den Sektoren Wasser und Energie zu erfassen, analysieren und in die Entscheidungsfindung einzubeziehen (s. Abschnitt 2.3). Durch Einnahme einer Nexus-Perspektive können somit, neben sektorübergreifenden Auswirkungen von Entscheidungen, ebenfalls deren Folgen für Gesellschaft und Ökosysteme umfassender und genauer berücksichtigt werden (Smajgl et al. 2016). Verglichen mit einer sektorspezifischen Perspektive auf Entscheidungsprobleme im Wasser-, Energie- und Umweltbereich werden Entscheidungstragende im WEN dabei jedoch vor zusätzliche analytische und institutionell-prozedurale Herausforderungen gestellt (vgl. z. B. Stein et al. 2014; Howarth und Monasterolo 2016; Scott et al. 2011; Stirling 2015).

Zusätzliche analytische Herausforderungen ergeben sich aus der integrierten Betrachtung von Wasser- und Energieressourcenströmen (vgl. z. B. Howells et al. 2013; Endo et al. 2017). Die Einnahme einer Nexus-Perspektive erfordert geeignete Werkzeuge zur Erfassung und geeigneten Darstellung dieser Ressourcenströme über hierarchische, zeitliche und räumliche Ebenen. Darüber hinaus werden geeignete Wege zur Erfassung der intersektoralen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen dem Wasser- und Energiesektor benötigt. Dies erfordert die Identifikation und Modellierung komplexer, oftmals nicht deterministischer Ursache-Wirkungs-Beziehungen und die Harmonisierung von Daten in verschiedenen Maßeinheiten (vgl. z. B. Garcia und You 2016; Santoyo-Castelazo und Azapagic 2014).

Institutionell-prozedurale Herausforderungen bestehen im WEN bei der Steuerung, d. h. der koordinierten Planung und Allokation, von Wasser- und Energieressourcen auf multilateraler Ebene. Der multilaterale Charakter kann sich über Institutionen, administrative Ebenen und Zuständigkeiten erstrecken, in einigen Fällen aber auch transnationaler Art sein. Eine Nexus-Perspektive kann politischen Entscheidungstragenden dazu verhelfen, Synergien bei der Erreichung von Nachhaltigkeitszielen zu realisieren. Die Umsetzung erfordert jedoch Entscheidungsprozesse, welche sowohl Akteure unterschiedlicher politischer Institutionen als auch Interessenseigner aus der Zivilgesellschaft einbinden, um tragfähige Maßnahmen zu entwickeln und mögliche Interessenkonflikte zu diskutieren (vgl. z. B. Pittock et al. 2015; Biggs et al. 2015). Hierzu werden insbesondere geeignete Partizipationsmechanismen benötigt (Larkin et al. 2020).

MCDA Verfahren unterstützen Entscheidungstragende in schwierigen und nicht routinemäßigen Entscheidungssituationen, wie denen im Kontext des WEN, durch ihr strukturiertes Vorgehen (s. Abschnitt 3.2). Die Kombination der MCDA mit problemstrukturierenden Methoden und weiteren Analysewerkzeugen bietet Möglichkeiten zur Bewältigung der kontextbedingten Komplexität des WEN. Zur problemgerechten Ausgestaltung von PSM und weiteren Analysewerkzeugen für die Anforderungen im Kontext des WEN finden sich in der Literatur einige Ansatzpunkte. So sollten MCDA Verfahren speziell um weitere methodische Werkzeuge für (i) die Offenlegung intersektoraler Beziehungen, (ii) die Berücksichtigung von Unsicherheiten aus mehreren Quellen, (iii) die Berücksichtigung von Pfadabhängigkeiten, (iv) die Aufdeckung von Handlungsalternativen, sowie (v) die explizite Einbindung heterogener Interessensgruppen ergänzt werden.

(i) Offenlegung intersektoraler Beziehungen

Die Offenlegung intersektoraler Beziehungen zwischen dem Wasser- und Energiesektor ist der Kerngedanke des WEN (Abschnitt 2.3). Die Identifikation daraus resultierender Wirkungszusammenhänge befähigt Entscheidungstragende zur Gestaltung effizienzsteigernder Handlungsmaßnahmen und Nut-

zung intersektoraler Synergiepotenziale. Die strukturierte und fallspezifische Offenlegung intersektoraler Wirkungszusammenhänge, welche einseitig wirkende Abhängigkeiten aber auch gegenseitig verstärkende und ausgleichende Wechselwirkungen umfassen, mittels geeigneter Methoden ist daher ein wesentliches Element entscheidungsunterstützender Methoden im WEN. Dies fördert das Problemverständnis aller Beteiligten und hilft darüber hinaus bei der Identifikation kritischer Ursache-Wirkungs-Beziehungen. Anschließend können Wirkungszusammenhänge über Kriterien operationalisiert und so in die Ermittlung präferierter Handlungsmaßnahmen einbezogen werden. Eine kontinuierliche Evaluation der tatsächlichen Auswirkungen umgesetzter Handlungsmaßnahmen ist darüber hinaus zur Erarbeitung nachträglicher Adaptationen nützlich für Entscheidungstragende und sollte durch die MCDA ermöglicht werden. Die gezielte ex-post Beobachtung zentraler Abhängigkeiten und Wechselwirkungen des WEN stellt zudem eine Möglichkeit dar, Unsicherheiten im komplexen Entscheidungskontext des WEN methodisch zu begegnen (Smajgl et al. 2016).

(ii) Berücksichtigung von Unsicherheiten aus mehreren Quellen

Die strategische Entscheidungsfindung im Wasser- und Energiesektor ist bereits bei alleiniger Betrachtung aufgrund der Mehrdimensionalität des jeweiligen Entscheidungskontextes hinreichend komplex. Sowohl sozioökonomische als auch biophysikalische Systemzusammenhänge führen zu einer Vielzahl entscheidungsrelevanter Ziele und aufgrund der Menge vorliegender Informationen zu verschiedenartigen Unsicherheiten (Wang et al. 2009; Van Asselt und Rotmans 2002). Ebenso können die vorliegenden Informationen selbst mit Unsicherheiten verschiedener Art behaftet sein (Funtowicz und Ravetz 1990). Durch eine Nexus-Betrachtung des Wasser- und Energiesektors ergeben sich zusätzliche Quellen für Unsicherheiten. Intersektorale Wirkungszusammenhänge sind zudem oftmals nicht-deterministisch, so dass die Beurteilung von Konsequenzen getroffener Entscheidungen erschwert wird (Walker et al. 2003). Im Kontext des WEN eingesetzte MCDA Verfahren sollten daher an verschiedenen Stellen auftretende Unsicherheiten aus verschiedenen Quellen, d. h. sowohl bedingt durch den Entscheidungskontext als auch durch das verwendete MCDA Verfahren (French 1995), mittels geeigneter methodischer Werkzeuge berücksichtigen (vgl. z. B. Belton und Stewart 2010).

(iii) Berücksichtigung von Pfadabhängigkeiten

Im Kontext des WEN getroffene Entscheidungen mit strategischem Planungshorizont unterliegen Pfadabhängigkeiten (s. Abschnitt 3.4.3), wobei Pfadabhängigkeit in der modellgestützten Entscheidungsfindung verschiedene Ursachen und Treiber haben kann (vgl. Hämäläinen und Lahtinen 2016). So hängen aus Modellen hergeleitete Entscheidungen, z. B. für bestimmte Infrastrukturmaßnahmen oder Versorgungskonzepte, stets von Art und Qualität des zugrundeliegenden Modells und der verwendeten Methoden ab. Die Konsequenzen getroffener Entscheidungen können, durch selbstverstärkende Mechanismen oder externe Einflüsse, jedoch von dem im Modell antizipierten Ausmaß abweichen und nachträgliche Adaption erfordern. Gleichzeitig bestehen Lock-in Effekte¹⁸, da kostenintensive Infrastrukturprojekte mit langem Planungshorizont nur bedingt reversibel oder anpassbar sind. Im Kontext strategischer Entscheidungen im WEN eingesetzte Entscheidungsunterstützungsmodelle identifizieren daher gezielt Pfadabhängigkeiten sowie selbstverstärkende Mechanismen und sensibilisieren Entscheidungstragende für diese. Darüber hinaus sind Pfadabhängigkeiten und Lock-in Effekte prospektiv in die multikriterielle Bewertung von Handlungsmaßnahmen einzubeziehen und Adaptationsmöglichkeiten möglichst frühzeitig aufzuzeigen.

¹⁸ Lock-in Effekte bezeichnen das Festhalten von Entscheidungstragenden an einer bestimmten Handlungsalternative, bei gleichzeitigem Vorhandensein einer stärker präferierten Handlungsalternative (Staw 1981).

(iv) Aufdeckung von Handlungsalternativen

Im Kontext des WEN sind Handlungsmaßnahmen zu identifizieren oder entwickeln, welche in Anbetracht intersektoraler Zielkonflikte eine akzeptable Lösung ermitteln und Synergiepotentiale erschließen. Aufgrund der kontextualen Komplexität sind mögliche Handlungsalternativen nicht unmittelbar offensichtlich. Ferner besteht bei der Erarbeitung von Handlungsmaßnahmen die Gefahr des Verharrens innerhalb sektoraler Betrachtungsgrenzen durch eine enge Orientierung am Status quo (Nutt 2004). Innovative Ressourcennutzungs- und Versorgungskonzepte bleiben, entgegen der Idee des WEN, so möglicherweise verschlossen und Synergieeffekte ungenutzt. Der Einsatz problemstrukturierender Methoden und Kreativitätstechniken im Rahmen der Entscheidungsunterstützung hilft im WEN bei der Überwindung sektorspezifischen Denkens und fördert die intersektorale Wissensintegration (vgl. z. B. Gregory et al. 2012a). Ein strukturiertes und theoriegestütztes Vorgehen trägt so zur Aufdeckung neuartiger Handlungsmaßnahmen bei und schafft Transparenz für alle Entscheidungstragenden. MCDA Verfahren sollten zudem die methodische Flexibilität bieten, um das breite Spektrum an unterschiedlichen Handlungsmöglichkeiten in klar ausgestaltete und anhand der Ziele von Entscheidungstragenden Personen bewertbare Handlungsmaßnahmen zu überführen.

(v) Explizite Einbindung heterogener Interessensgruppen

Eine Vielzahl von heterogenen Interessensgruppen ist an strategischen Entscheidungen im WEN mit hoher Tragweite direkt oder indirekt beteiligt. Häufig sind politische, privatwirtschaftliche und zivilgesellschaftliche Akteure involviert, die jeweils unterschiedliche Perspektiven, Ziele und Interessen haben und deren Einbeziehung in den Entscheidungsprozess die Implementierung wesentlich erleichtern kann (Purwanto et al. 2021). Aktive Partizipation fördert die Schaffung eines gegenseitigen Problemverständnisses, sensibilisiert Akteure für intersektorale Wirkungszusammenhänge und erhöht zugleich die Akzeptanz getroffener Entscheidungen. Der Einsatz transdisziplinärer Methoden unterstützt die Integration von Perspektiven und Erkenntnissen aus Wissenschaft, Privatwirtschaft und lokalen Interessensgruppen in Entscheidungsprozessen (Mauser et al. 2013).

In Anbetracht der Problemkomplexität des WEN und der Vielzahl beteiligter Akteure sollten MCDA Verfahren zudem den zeitlichen Aufwand für Entscheidungstragende limitieren und kognitiven Aufwand entlang des Verfahrensablaufs reduzieren (Purwanto et al. 2021).

4.2 Stand der Forschung zu MCDA Verfahren im WEN

Die Verbreitung der MCDA hat im Laufe der Jahre stetig zugenommen, da sie die Möglichkeit bietet, sowohl unterschiedliche Sichtweisen und Interessen als auch potentielle Zielkonflikte bei der Bewertung von Entscheidungsalternativen zu berücksichtigen (vgl. z. B. Cegan et al. 2017; Greco et al. 2019; Katsikopoulos et al. 2018). Besonders ausgeprägt ist dieser Trend in komplexen Entscheidungskontexten, wie der Bewertung von Energietechnologien und Energiesystemtransformationspfaden, der Bewertung von Ökosystemleistungen, der Nachhaltigkeitsbewertung, bei der Gestaltung wasserwirtschaftlicher Maßnahmen oder der Auswahl und Bewertung von Maßnahmen zur Renaturierung (Cinelli et al. 2020). Jeder Entscheidungskontext weist spezifische Anforderungen auf, und, je nach konkret vorliegender Entscheidungsproblematik, sind die verschiedenen MCDA Verfahren unterschiedlich gut zu deren Beantwortung geeignet. Oft sind auch methodische Integrationen oder Erweiterungen innerhalb der MCDA Verfahrensschritte erforderlich.

Im vorangegangenen Abschnitt wurden Ansatzpunkte für die Gestaltung von MCDA Verfahren für Entscheidungsprobleme im WEN aufgezeigt. Im Folgenden werden nun, durch eine strukturierte Literaturstudie, bestehende MCDA Verfahren und methodische Instrumente für die Entscheidungsunterstützung im Kontext des WEN identifiziert, vorgestellt und analysiert. Die Analyse bildet die Grundlage der Methodik dieser Arbeit, um Maßnahmen zur Lösung des Wasserdefizitproblems im Nahen Osten nach dem Konzept des WEN zu entwickeln und zu bewerten.

4.2.1 Vorgehen der Literaturstudie

Das Vorgehen der Literaturstudie zur Identifikation und Analyse relevanter wissenschaftlicher Dokumente zur MCDA im Entscheidungskontext des WEN bis zum Jahr 2023 (Stichtag 19.05.2023) wurde zweistufig gestaltet und ist in Abbildung 4.1 aufgezeigt.

Als Grundlage für die Identifikation wissenschaftlicher Literatur wurde die Datenbank *Scopus* des Wissenschaftsverlags *Elsevier* genutzt (Scopus 2023). *Scopus* umfasst mehr als 87 Millionen wissenschaftliche Dokumente, inklusive Artikel aus Fachzeitschriften mit Peer Review-Prozess, Bücher und Konferenzbände. *Scopus* unterstützt eine boolesche Syntax, d. h. eine Art der Suche, bei der Benutzer Schlüsselwörter mit logischen Operatoren kombinieren können, um relevantere Ergebnisse zu erhalten.

Auf der ersten Stufe wurde in Titeln, Abstracts und Schlüsselwörtern nach Dokumenten gesucht, welche sich im weiteren Sinne, d. h. nicht zwingend unter Anwendung von MCDA Verfahren, mit der Entscheidungsfindung und -unterstützung im thematischen Kontext des WEN befassen. Diese Suche lieferte insgesamt 128 Dokumente, darunter 89 Fachartikel, 17 Konferenzbeiträge, 12 Buchbeiträge und 6 Literaturüberblicke. Anschließend wurde die Auswahl auf Artikel beschränkt, die in Fachzeitschriften mit Peer-Review veröffentlicht wurden und einer bibliographischen Analyse unterzogen. Die Ergebnisse der bibliographischen Analyse in Stufe 1 sind in Abbildung 4.2 aufgezeigt. Teil (a) zeigt dabei die absolute Anzahl identifizierter Publikationen, aufgeschlüsselt nach Jahr der Veröffentlichung auf. In Teil (b) ist die absolute Anzahl identifizierter Artikel pro Fachzeitschrift mit mindestens zwei relevanten Veröffentlichungen dargestellt. Auffallend ist insbesondere, dass die ersten Artikel im Jahr 2011 in zeitlicher Nähe zu den Ereignissen um die Bonner Nexuskonferenz publiziert wurden. Zugleich weist die Anzahl jährlicher Veröffentlichungen dieses relativ jungen Forschungsgebietes bis in das Jahr 2022 einen steigenden Trend auf.

In einer anschließenden Detailanalyse wurden die 89 Fachartikel einer Detailanalyse unterzogen, um Verfahren und methodische Instrumente für die Entscheidungsunterstützung im Kontext des WEN zu identifizieren und charakterisieren. Die Literaturverweise dieser 89 Fachartikel wurden ebenfalls überprüft.

Auf der zweiten Stufe wurde eine stärker eingegrenzte Datenbanksuche durchgeführt. Hierzu wurde die Suchabfrage der ersten Stufe ergänzt. Ziel der auf diese Weise enger beschränkten Suche war es, Erkenntnisse über die spezifische Ausgestaltung von MCDA Verfahren im Entscheidungskontext des WEN zu erlangen. In dieser Stufe wurden insgesamt 17 Dokumente identifiziert, darunter 13 Fachartikel, 3 Konferenzbeiträge und 1 Literaturüberblick. Alle 17 Dokumente wurden auf Basis der Kurzfassung zunächst auf Relevanz überprüft und 11 als relevant erachtete Dokumente einer weiteren methodischen Analyse unterzogen um den Stand der Forschung, bestehende Limitationen und Forschungslücken zu erfassen.

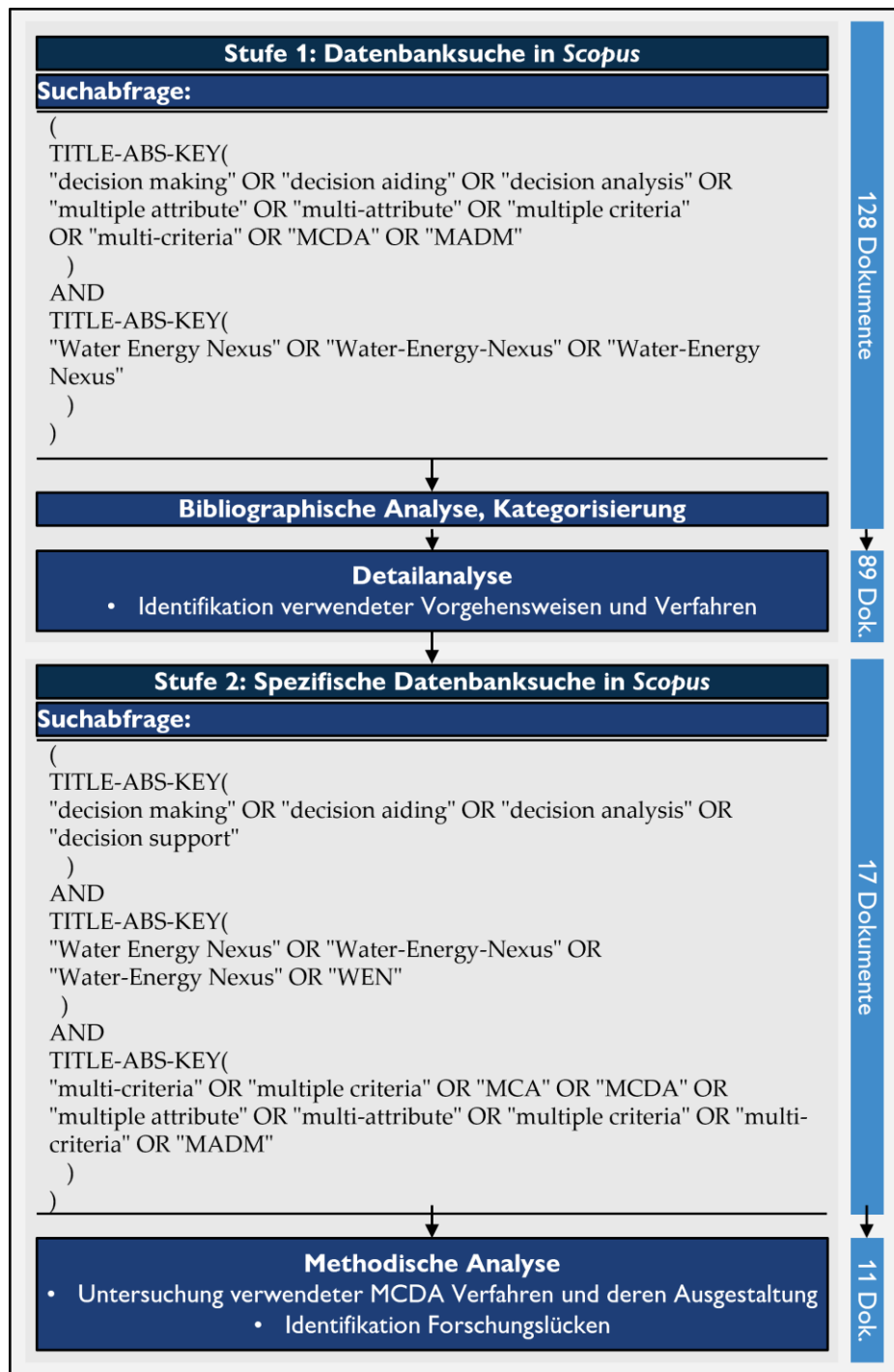


Abbildung 4.1: Vorgehen der Literatursuche

Quelle: Eigene Darstellung

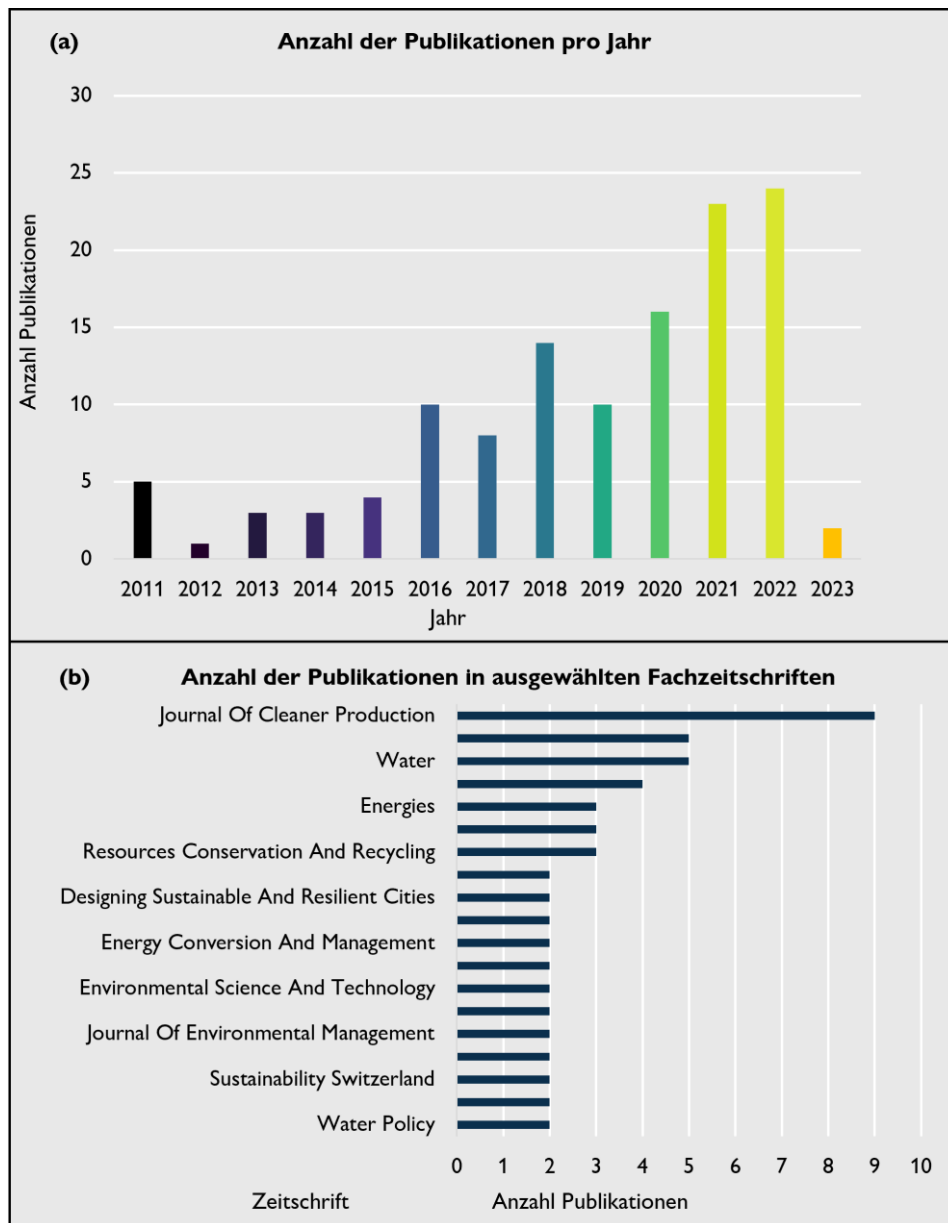


Abbildung 4.2: Ergebnisse der Suchabfrage (Stufe 1)

Quelle: Eigene Darstellung

4.2.2 Stand der Forschung und bestehende Limitationen

Die Literaturstudie offenbarte eine Reihe von Konzepten, Verfahren und methodischen Instrumenten, um Entscheidungstragende im vergleichsweise neuen Kontext des WEN zu unterstützen. Darüber hinaus wurden einige der ermittelten Ansätze in softwarebasierte Lösungen eingebettet, um Plattformen für die Zusammenarbeit zu schaffen und den Entscheidungstragenden die Planung zu erleichtern.

4.2.2.1 Identifikation verwendeter Vorgehensweisen und Verfahren (Stufe 1)

Die bibliographischen Informationen (Titel, Jahr der Publikation, Titel der Zeitschrift) und eine grobe Charakterisierung der 89 auf Stufe 1 identifizierten und analysierten Publikationen sind der Tabelle A.1 des Anhangs zu entnehmen. Für jede Publikation wurden zudem die wesentlichen, zur Beantwortung der Forschungsfrage angewandten, Methoden herausgestellt. Tabelle 4.1 fasst die in diesen Publikationen verwendeten Methoden, aufgeschlüsselt nach Veröffentlichungsjahr der Publikation, zusammen.

Tabelle 4.1: Aufschlüsselung der in den Publikationen verwendeten Methoden

Methode	Jahr													Σ	Gesamt- anteil [%]
	2011	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22	'23		
CO ₂ -Bilanzierung								1		1			2	1,3	
Fuzzylogik										1	2	1	1	5	3,2
GIS							1				1	1		3	1,9
Hydrologische Modelle	1							1			1	1		4	2,6
Empirische Methoden						3	1	1			2	1		8	5,2
Künstliche neuronale Netze												1	1	2	1,3
LCA									1	1		1		3	1,9
Literaturüberblick und -analyse	2	1			1		2		1		3			10	6,5
Maschinelles Lernen												1		1	0,6
Material- und Energieflussanalyse	1								4	1	1	1		8	5,2
Mathematische Programmierung						2	1	1	2	3	6	8	4	27	17,5
MCDA							1	2		3	1		1	8	5,2
Metaheuristische Algorithmen								1	1	1	1	1	1	6	3,9
Ökonometrische Modellierung											2			2	1,3
Robuste Optimierung						1					1			2	1,3
SCLA										1				1	0,6
Simulation	1			1				3		1	1	3	1	11	7,1
Spieltheorie												1	1	2	1,3
Statistische Analysemethoden							1	1		2	3	2		10	6,5
Szenarioplanung							1	2	2		3		1	9	5,8
Techno-ökonomische Analyse							1		2	1	4			8	5,2
Workshops								1			1			2	1,3
weitere*	1	1	3			4	1		2			6	2	20	13,0
Gesamt	6	2	3	1	1	10	11	13	15	15	34	29	13	154	100

*Feldstudie, Perspektivartikel, weitere Algorithmen und sonstige Methoden

Quelle: Eigene Darstellung, Publikationen nach Tabelle A.1

Es zeigt sich insgesamt eine große Heterogenität in den verwendeten Methoden. Zudem ist in den identifizierten Publikationen ein methodischer Pluralismus zu beobachten, um dem komplexen Entscheidungskontext des WEN zu begegnen. Dabei kommen sowohl quantitative als auch qualitative Methoden zum Einsatz. Häufig verwendete quantitative Methoden sind die mathematische Modellierung, statistische Analysemethoden und Methoden der Simulationsmodellierung, wobei sich innerhalb der Artikel zur mathematischen Modellierung keine dominierende Problemformulierung und Lösungsstrategie erkennen lässt. Je nach Struktur des vorliegenden Entscheidungsproblems finden sich sowohl lineare Problemformulierungen (engl. linear programming, LP), gemischt-ganzzahlige (engl. mixed integer linear programming, MILP), bis hin zu rechnerisch komplexeren nicht-linearen Problemformulierungen (engl. nonlinear programming, NLP) und ein breites Spektrum verschiedener Lösungsverfahren für die aufgestellten Optimierungsmodelle in der Literatur. Neben der mathematischen Optimierung wird zudem die techno-ökonomische Analyse häufig als quantitative Methode verwendet, um Entscheidungsalternativen hinsichtlich ihrer technischen Auslegung und ökonomischen Folgen zu bewerten. Vermehrt angewandte qualitative Verfahren aus der empirischen Forschung sind Interviewme-

thoden wie Leitfadeninterviews, Fragebogenstudien, teils auch im Rahmen von Workshops durchgeführt, sowie spieltheoretische Methoden. Letztere werden insbesondere angewandt, um Interessensgruppen in Entscheidungsprozesse einzubeziehen, Interaktionen zwischen beteiligten Akteuren zu erfassen oder deren Zielstellungen im Rahmen von Entscheidungsprozessen zu identifizieren.

Die spezifischen Fähigkeiten der im WEN verwendeten analytischen Methoden sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst. Eine grüne Markierung bedeutet, dass eine Methode in Bezug auf ein bestehendes Entscheidungsproblem im Vergleich zu einer gelb oder rot markierten Methode eine höhere Eignung zur Erfüllung der entsprechenden Anforderung aufweist.

Tabelle 4.2: Spezifische Fähigkeiten der im WEN verwendeter Methoden

Fähigkeit		Räumliche Darstellung	Zeitliche Darstellung	Pfad-abhängigkeit	Partizipation	Transparenz/ Nachvollziehbarkeit	Intersektorale Wechselwirkungen	Umgang mit Unsicherheit
Methode								
Qualitativ	Lernspiele	Orange	Orange	Orange	Grün	Grün	Orange	Orange
	Workshops	Orange	Orange	Orange	Grün	Grün	Orange	Orange
	Empirische Methoden	Orange	Orange	Orange	Grün	Orange	Orange	Orange
Qualitativ/ Quantitativ	Szenarioplanung	Orange	Grün	Orange	Orange	Orange	Orange	Grün
	Fuzzylogik	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
	Systemdynamik	Orange	Grün	Grün	Orange	Orange	Grün	Grün
	Material- und Energieflussanalyse	Orange	Orange	Orange	Orange	Grün	Grün	Orange
	Spieltheorie	Orange	Orange	Orange	Grün	Grün	Grün	Orange
Quantitativ	Geographische Informationssysteme (GIS)	Grün	Orange	Orange	Orange	Grün	Orange	Orange
	Mathematische Optimierung	Grün	Grün	Orange	Orange	Orange	Orange	Grün
	Techno-ökonomische Analyse	Orange	Orange	Orange	Orange	Grün	Orange	Orange
	Simulation	Grün	Grün	Grün	Orange	Orange	Grün	Grün
	Ökobilanzierung (LCA)	Orange	Orange	Orange	Orange	Grün	Grün	Orange
	Hydrologische Modelle	Orange	Orange	Orange	Orange	Grün	Grün	Orange

Quellen: Ghodsvali et al. (2019), Ghodsvali et al. (2023), Albrecht et al. (2018), Endo et al. (2015)

4.2.2.2 Weitere methodische Instrumente zur Entscheidungsunterstützung im WEN

Mittels einer Analyse der Literaturverweise der bisher aufgeführten Publikationen wurden weitere methodische Instrumente sowie Softwaretools zur Entscheidungsunterstützung identifiziert, die speziell für den Problemkontext des WEN entwickelt wurden (Tabelle 4.3). Sie beinhalten planerische Hilfsmittel und schaffen Plattformen für die Zusammenarbeit der verschiedenen WEN-Akteure (d. h. Regierung, Wissenschaft und Gesellschaft). Einige dieser Instrumente enthalten zudem Möglichkeiten zur Erfassung der Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen den Komponenten des WEN sowie zusätzliche Mittel zur Kommunikation der Ergebnisse.

Die verschiedenen methodischen Instrumente und Softwaretools verfolgen unterschiedliche Ansätze zur Bewältigung der systemischen Komplexität des WEN. Das CLEW (engl. Climate, Land-use, Energy and Water systems) Rahmenkonzept der Hauptabteilung Wirtschaftliche und Soziale Angelegenheiten der Vereinten Nationen (engl. United Nations Department of Economic and Social Affairs, UN DESA) integriert aus bestehenden, sektorspezifischen Planungswerkzeugen gewonnene Informationen und ermöglicht so die Analyse von intersektoralen Beziehungen anhand von Klima- und weiteren Entwicklungsszenarien (Howells et al. 2013). Eine detaillierte Beschreibung und Bewertung der derzeit verfügbaren CLEW-Modelle, die jeweils unterschiedliche Anwendungsbereiche und geophysikalische und sektorale Schwerpunkte haben, geben Vinca et al. (2021). Demoversionen der CLEW Modelle auf nationaler und globaler Aggregationsebene sind online verfügbar (UN DESA 2023).

Das von der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (engl. Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) entwickelte DTI nexus tool (engl. Diagnostic, Financial, and Institutional Tool for Investment in water for agriculture and energy) kombiniert verschiedene Werkzeuge modular auf einer Weboberfläche, um Planungen auf nationaler Ebene zu unterstützen (Salman 2013). Das DTI nexus tool ist ebenfalls online abrufbar und mit bestehenden Datenbanken der FAO, UN und Weltbank verknüpft (FAO 2023). Die Weboberflächen dieser beiden Softwaretools sind exemplarisch in Abbildung 4.3 aufgezeigt.

Die Bewältigung der Komplexität des WEN in einem integrierten Planungswerkzeug ist dabei mit großen Datenmengen verbunden und erfordert sowohl einheitliche Datenformate als auch geeignete Datenschnittstellen. Daher beschränken sich die meisten der vorgestellten Werkzeuge auf vereinfacht dargestellte Wirkungszusammenhänge und ausgewählte, häufig technische und ökonomische Kenngrößen. Sobald sozioökonomische Strukturen und Wirkungszusammenhänge ökologischer Systeme erfasst werden sollen, nimmt die Komplexität erheblich zu (Ghodsvai et al. 2023). Darüber hinaus ist die visuelle Darstellung von raumbezogenen Daten, z. B. über Geographische Informationssysteme (engl. Geographic information system, GIS), bisher nur vereinzelt und in begrenztem Umfang durch die identifizierten Werkzeuge möglich.

Das Nexus-Tool des Weltwirtschaftsrats für Nachhaltige Entwicklung (engl. World Business Council for Sustainable Development, WBCSD) ist ein Spreadsheet-basierter Ansatz zur Modellierung der wechselseitigen Beziehungen im WEN auf verschiedenen Planungsebenen (von der lokalen bis zur globalen Ebene), um politische und technologische Maßnahmen auf der Grundlage mathematischer Optimierungsmethoden zu entwickeln (WBCSD 2014).

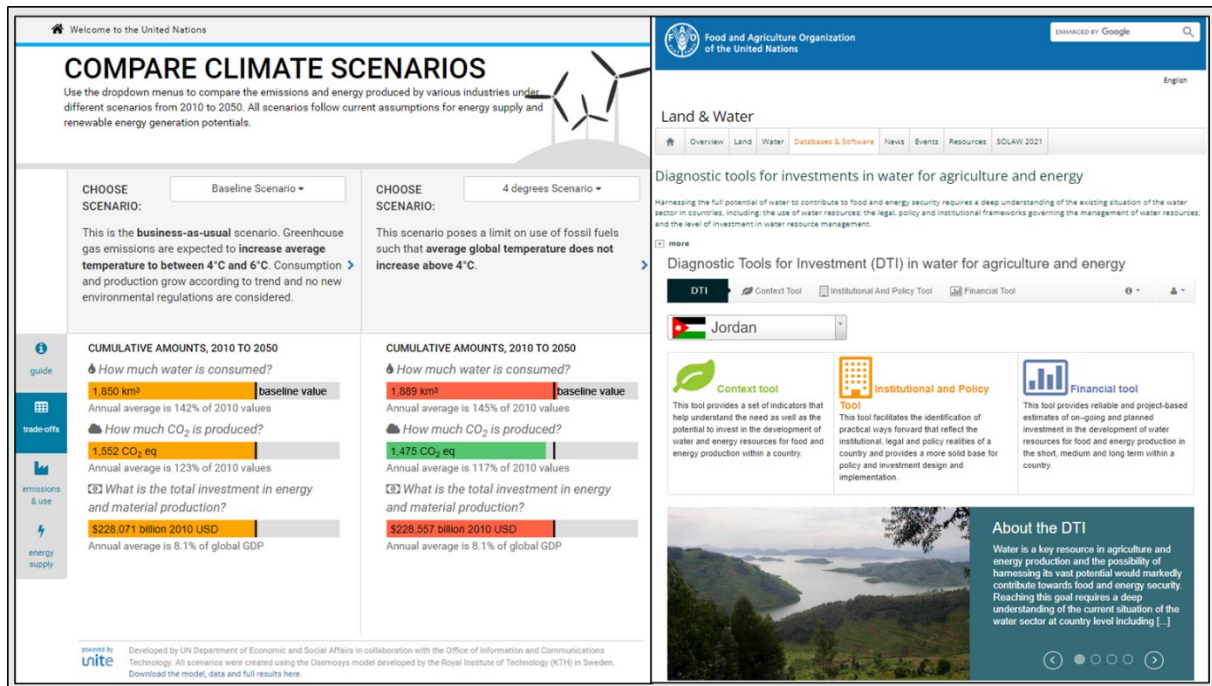


Abbildung 4.3: Weboberflächen des CLEW Modells und DTI nexus tools

Quelle: UN DESA (2023), FAO (2023)

Die von Giampietro et al. (2009) entwickelte Methode MuSIASEM (engl. Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism) ermöglicht eine quantitative Analyse des WEN auf der Basis von Ressourcen- und Energieflüssen in verschiedenen Sektoren und über mehrere Planungsebenen (Haushalte, Unternehmen, Wirtschaftssektoren sowie Volkswirtschaften). Durch die detaillierte Modellierung verschiedener Flussdaten ist es möglich, eine quantitative Nachhaltigkeitsbewertung durchzuführen und ökologische Rahmenbedingungen sowie sozioökonomische Auswirkungen zu modellieren, die sich aus den Interaktionen zwischen dem Wasser- und dem Energiesektor ergeben. Räumliche Informationen sind ebenfalls in den Daten enthalten und werden über GIS aufbereitet.

Das WEF Nexus Tool 2.0 bietet Funktionalitäten für die Bewertung von Szenarien auf Basis von Gewichtungsfaktoren und synthetisierender Indikatoren (Daher und Mohtar 2018, 2015). Eine quantitative Methode zur Entwicklung von Maßnahmen im WEN mit ausgeprägter partizipatorischer Komponente ist das von Ghodsvali et al. (2023) entwickelte S.N.O.G. Modell (engl. Spatial Nexus Optimization Game). Hierbei werden mittels Methoden der Mehrzieloptimierung Maßnahmen determiniert und anschließend durch Entscheidungstragende verschiedener Sektoren über spieltheoretische Ansätze bewertet und in eine Konsenslösung überführt. Zielgrößen der Optimierung umfassen technische, ökonomische umweltbezogene Zielstellungen.

Ein Vergleich der in Tabelle 4.3 aufgeführten Methoden und Softwaretools zur Entscheidungsunterstützung im WEN verdeutlicht ihren unterschiedlichen Funktionsumfang sowie die unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Bezugsrahmen. Sie wurden entweder als konzeptionelle Rahmenkonzepte mit Funktionalitäten für die systematische Bewertung von Nexus-Interaktionen mit detaillierten quantitativen Analysen oder als anwenderfreundliche Modelle für breit angelegte und explorative Untersuchungen und Machbarkeitsstudien entwickelt. MCDA Verfahren werden in diesen Methoden und Softwaretools für den Kontext des WEN bisher jedoch nicht eingesetzt. Vielmehr verdeutlichen diese Instrumente den Bedarf an geeigneten methodischen Erweiterungen zur Integration der aus den quantitativen und qualitativen Methoden gewonnenen Daten in multikriterielle Bewertungsmodelle. Die

MCDA ist hierbei durch ihren strukturierten Ablauf besonders geeignet, da sie Entscheidungstragenden im WEN bei der Erschließung des Problemkontextes hilft und die Entwicklung aufeinander abgestimmter Handlungsalternativen ermöglicht. Ebenso können die modellbasiert ermittelten Daten zu den ökonomischen, sozio-politischen und umweltbezogenen Konsequenzen der Alternativen in Form von Kriterienausprägungen eingebunden werden. Zudem können subjektive Informationen, wie die Präferenzen der Entscheidungstragenden und weiterer beteiligter Akteure, systematisch erhoben und berücksichtigt werden.

Tabelle 4.3: Methodische Instrumente zur Entscheidungsunterstützung im WEN

Methoden	Charakterisierung	Entscheidungsunterstützung	Limitationen
Climate, Land-use, Energy and Water systems (CLEW)	<p>Rahmenkonzept zur Integration bestehender sektorspezifischer Methoden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Long-range Energy Alternatives Planning tool (LEAP) des SEI • Water Evaluation and Planning tool (WEAP) des SEI • Agro-Ecological Zoning tool (AEZ) der FAO 	<p>Modellierung von der Auswirkungen von Klimaszenarien und Maßnahmen auf:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ressourcenverfügbarkeit • Energetische Implikationen • Treibhausgasemissionen • Flächenbedarfe • Wasserhaushalt 	<ul style="list-style-type: none"> • Kein eigenständiges Modellierungswerkzeug • Hoher Datenbedarf • Fehlende Möglichkeiten zur Einbindung von Entscheidungstragenden und Interessensgruppen • Keine visuelle Präsentation räumlicher Daten (z. B. über GIS)
WEF Nexus tool 2.0	<ul style="list-style-type: none"> • Web-basierte Software zur Modellierung von Ressourcenströmen unter Einnahme einer Nexus-Perspektive. • Berücksichtigung verschiedener Entwicklungsszenarien. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gestaltung und Bewertung von Handlungsszenarien • Zugriffsmöglichkeit für externe Akteure und Interessensgruppen • Ausgabe von Wasser-, Energie, und landwirtschaftlichem Flächenbedarf; Quantifizierung von Treibhausgasemissionen und monetären Kosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Eingeschränkte Berücksichtigung von intersektoralen Beziehungen des WEN • Keine visuelle Präsentation räumlicher Daten (z. B. über GIS)

Methoden	Charakterisierung	Entscheidungsunterstützung	Limitationen
World Business Council for Sustainable Development (WBSCD) Nexus tool	<ul style="list-style-type: none"> • Mathematische Optimierung und GIS-basierte Darstellung von land- und energie-wirtschaftlichem Wasserbedarf • Abbildung unterschiedlicher räumlicher und institutioneller Planungsebenen 	<ul style="list-style-type: none"> • Quantifizierung von intersektoralen Beziehungen im WEN • Erarbeitung von Allokationsstrategien • Grundlage zur Planung von land- und energiewirtschaftlicher Maßnahmen 	<ul style="list-style-type: none"> • Komplexität der Datenausgabe erfordert hohen Aufwand bei nachträglicher Aufbereitung • Expertenplattform: Fehlende Integration weiterer Akteure • Entscheidungsunterstützung beschränkt sich auf Modellierung und Analyse; keine Präferenzermittlung und multikriterielle Bewertung möglich
Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism (MuSIASEM)	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse des WEN auf Basis von Ressourcen- und Energieströmen sowie gesellschaftlicher Implikationen • Modellierung intersektoralen Beziehungen des WEN und Analyse von Bedarfsszenarien 	<p>Modellierung der Abhängigkeiten und Wechselwirkungen im WEN und Auswirkungen von Maßnahmen hinsichtlich:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ressourcenverfügbarkeit • Energetischer Implikationen • Treibhausgasemissionen • Flächenbedarfe • Monetärer Kosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Datenbedarf und Anspruch bei der Modellierung • Entscheidungsunterstützung beschränkt sich auf Modellierung und Analyse; keine Präferenzermittlung und multikriterielle Bewertung möglich • Expertenplattform: Fehlende Integration weiterer Akteure
Diagnostic, Financial, and Institutional Tool for Investment in water for agriculture and energy (DTI Tool)	<p>Dreiteilige Softwaresammlung mit Webplattform:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Erfassung wesentlicher Indikatoren des WEN • Integration von Institutionen und Akteuren; Zuordnung zu Planungsebenen und Verantwortungsbereichen; Sammlung gesetzlicher Regelungen und politischer Vorhaben • Funktionalitäten zur dynamischen Investitionsplanung 	<ul style="list-style-type: none"> • Informationsplattform für politische Entscheidungsstrategie • Investitions- und Finanzpläne über Institutionen und Planungsebenen • Räumliche Planung landwirtschaftlich genutzter Flächen 	<ul style="list-style-type: none"> • Fehlende Möglichkeit zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Planung • Teils veraltete Datengrundlage • Keine visuelle Präsentation räumlicher Daten (z. B. über GIS) • Keine Modellierung der intersektoralen Beziehungen des WEN

Methoden	Charakterisierung	Entscheidungsunterstützung	Limitationen
Spatial Nexus Optimization Game (S.N.O.G.)	Modellierung und mathematische Optimierung von Ressourcenströmen im WEN über Algorithmen zur Mehrzieloptimierung.	<ul style="list-style-type: none">• Einbindung von Entscheidungstragenden über Gamifizierung• Matrixdarstellung räumlicher Daten• Möglichkeit zur Modellierung von Szenarien	<ul style="list-style-type: none">• Eingeschränkte visuelle Repräsentation räumlicher Daten• Fehlende Möglichkeit zur Berücksichtigung von Unsicherheiten

Quellen: Howells et al. (2013), Daher und Mohtar (2018, 2015), WBCSD (2014), Salman (2013), Ghodsvali et al. (2023), Giampietro et al. (2009)

4.2.2.3 MCDA Verfahren im Kontext des WEN und deren Ausgestaltung (Stufe 2)

Die Anwendung der MCDA im Entscheidungskontext des WEN wurde in Publikationen der Jahre 2018 bis 2023 verortet. Die MCDA wird dabei häufig mit weiteren qualitativen und quantitativen Methoden kombiniert, um Maßnahmen im WEN hinsichtlich technischer, ökonomischer, umweltbezogener und sozio-politischer Zielstellungen zu bewerten. Die insgesamt 11 im Rahmen der stärker eingeschränkten Literatursuche identifizierten Dokumente sind in Tabelle A.2 im Anhangs aufgeführt und charakterisiert. Zusätzlich verwenden einige der in Stufe 1 identifizierten Publikationen bereits MCDA Verfahren.

So kombinieren Aberilla et al. (2020) Methoden der techno-ökonomischen Analyse, Ökobilanzierung, sozialer Wirkungsanalyse (engl. social life cycle assessment, SLCA) mit der MCDA zur integrierten Nachhaltigkeitsbewertung von Wasser- und Energieversorgungszenarien auf kommunaler Ebene. Sie nutzen dabei ein MCDA Verfahren nach der VIKOR¹⁹ Methode (Opricovic und Tzeng 2007), da es die Verarbeitung sowohl quantitativer als auch qualitativer Daten erlaubt, eine Rangfolge der Alternativen erstellt, eine Sensitivitätsanalyse der Präferenzinformationen ermöglicht und Analysemöglichkeiten auf intra-kriterieller Ebene bereitstellt.

Ein vergleichsweise geringerer Anteil der Publikationen nutzt MCDA Verfahren aus der Klasse des MODM. Parkinson et al. (2018) kombinieren dabei MODM Verfahren mit interaktiven GUI und mathematischer Solversoftware zur Bewertung von systemischen Transitionspfaden im WEN. Die von Saucedo-Ramírez et al. (2022) erstellten Wasserallokationsstrategien werden in ähnlicher Weise über Verfahren der Mehrzielprogrammierung multikriteriell bewertet und anschließend mittels Pareto-Fronten visualisiert.

De und Majumder (2020) kombinieren metaheuristische Algorithmen und ein modifiziertes AHP Verfahren, mit 10-stufigem Scoring System anstelle der von Saaty vorgeschlagenen verbal-numerischen 9-stufigen Skala, zur Ermittlung von Energieallokationsstrategien für Oberflächenwasser-Aufbereitungsanlagen. Sivakumar und Ramezaniapour (2015) bewerten in ihrer Publikation verschiedene technische Konzepte zur membranbasierten Wasseraufbereitung unter Einbindung von Energie aus regenerativen Quellen ebenfalls mittels AHP multikriteriell.

Nakhaei et al. (2023) hingegen entwickeln ein Entscheidungsunterstützungssystem zur Allokation von Kühlwasser in fossilen Kraftwerken auf Basis von Entscheidungsbaumalgorithmen und einer multikriteriellen Bewertung verschiedener technischer Prognosedaten über AHP, dem Verfahren TOPSIS (engl. Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) und der auf einfachen gewichteten Summenfunktionen basierenden Nutzwertanalyse (engl. simple additive weighting, SAW).

Shmelev und Shmeleva (2018) sowie Wu et al. (2017) verwenden ebenfalls SAW Verfahren beziehungsweise den AHP zur Erstellung von Nachhaltigkeitsbewertungen von Städten unter Zielstellungen des WEN. Als Bewertungskriterien werden SDG Indikatoren herangezogen beziehungsweise über Kostenrechnungsverfahren ermittelt. Mittels Regressionsanalyse zeigen Shmelev und Shmeleva (2018) statistische Abhängigkeiten zwischen verschiedenen SDG Indikatoren auf. Der von Lee et al. (2018) präsentierte Anwendungsfall einer MCDA für den WEN nutzt ebenfalls ein einfaches additives Modell, um

¹⁹ Das Akronym VIKOR entstammt dem Serbischen (Vise Kriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje) und lässt sich sinngemäß zu „Multikriteriell optimierte Kompromisslösung“ übersetzen (Opricovic 1990; Specht 2023).

präferierte Wasserbewirtschaftungsmaßnahmen auf Basis technischer, ökonomischer und umweltbezogener Kriterien zu ermitteln.

Ein Anwendungsbeispiel im WEN für die in Abschnitt 3.4.3 aufgezeigte Kombination der Szenarioplanung mit der MCDA findet sich hingegen bei Terrapon-Pfaff et al. (2020). Das auf der MAVT basierende MCDA Verfahren wird dabei explizit partizipativ ausgestaltet. Partizipative Elemente wurden in Form mehrerer Workshops integriert, so dass Entscheidungstragende und beteiligte Interessensgruppen (insgesamt 30 Akteure) neben der Zielermittlung ebenfalls an der Entwicklung von Handlungsalternativen beteiligt waren. Navarro und Van Nooijen (2022) nutzen ebenfalls eine Kombination aus Szenarioplanung und MCDA zur Entwicklung und Bewertung integrierter Wasser-Energie-Infrastrukturkonzepte für eine Karibikinsel. Zur Entwicklung der Handlungsalternativen und Ermittlung der Kriterienausprägungen wird eine techno-ökonomische Analyse mit Hilfe eines Simulationsmodells der Infrastrukturkonzepte durchgeführt. Für die multikriterielle Bewertung wird das Verfahren nach der MAVT verwendet.

Der von Marcella et al. (2020) vorgeschlagene Ansatz zur Entwicklung und Bewertung von langfristigen Energiemanagementkonzepten städtischer Wasserversorgungsinfrastruktur kombiniert ein multikriterielles Bewertungsverfahren mit der Szenarioplanung und greift darüber hinaus die Berücksichtigung von Pfadabhängigkeiten (s. Abschnitt 4.1) methodisch auf. Ziel der Studie war die Erstellung eines prospektiven Handlungsplans, d. h. Strategien, die an externe Entwicklungen angepasst werden können, um die operationale Zuverlässigkeit und Flexibilität zu erhöhen und der untersuchten Stadt bei der Erreichung ihrer Treibhausgasemissionszielen unter einer Vielzahl von prognostizierten Marktszenarien zu unterstützen.

Komendantova et al. (2020) nutzen das DecideIT-Softwaretool von Danielson et al. (2003) für eine Multi-Stakeholder-MCDA-Bewertung alternativer Systementwicklungspfade für das WEN in Jordanien. Der zugrunde liegende MCDA-Ansatz des interaktiven Softwaretools ist die CAR-Methode (engl. Cardinal Ranking method, CAR). CAR kann als klassischer MADM-Ansatz eingestuft werden und basiert auf einer einfachen additiven Wertfunktion und unsicheren kardinalen Präferenzinformationen (Danielson und Ekenberg 2016).

4.2.2.4 Limitationen bestehender MCDA Verfahren

Aufgrund ihrer unterschiedlichen Charakteristika weisen die im vorherigen Abschnitt vorgestellten MCDA Verfahren, die bisher im Rahmen des WEN eingesetzt wurden, spezifische Vorteile und Limitationen auf (vgl. Abschnitt 3.2). Darüber hinaus werden die verwendeten MCDA Verfahren mit unterschiedlichen methodischen Werkzeugen zur Problemstrukturierung kombiniert (vgl. Abschnitt 3.4.3). Hierdurch lässt sich die kontextbedingte Komplexität von Entscheidungsproblemen des WEN problemspezifisch adressieren. Im Folgenden werden daher die bislang für Fragestellungen des WEN angewandten MCDA Verfahren (s. Abschnitt 4.2.2.3 beziehungsweise Tabelle A.2) unter dem Gesichtspunkt ihrer Vorteile und Limitationen diskutiert. Tabelle 4.4 fasst diese Erkenntnisse zusammen.

Es fällt zunächst der Überhang klassischer MADM Verfahren auf. MODM Verfahren werden in zwei Fällen verwendet. Innerhalb der MADM Verfahren ist ebenfalls eine Tendenz erkennbar. In knapp einem Drittel der Publikationen wird der AHP angewandt und ein weiteres Drittel der Publikationen verwendet SAW Verfahren, d. h. multikriterielle Bewertungsverfahren mit einfachem additiven Modell. Die von Komendantova et al. (2020) verwendete CAR Methode kann ebenfalls als klassisches

MADM Verfahren mit einfacher additiven Wertfunktion charakterisiert werden. Zwei der elf Publikationen nutzen klassische MADM Verfahren nach der MAVT und in einer Publikation wird das verwendete multikriterielle Bewertungsverfahren nicht näher spezifiziert.

Die problemspezifische Ausgestaltung der MCDA und methodischer Werkzeuge zur Problemstrukturierung, um die in Abschnitt 4.1 aufgezeigten Anforderungen an MCDA Verfahren zu adressieren, variiert innerhalb der identifizierten Publikationen.

Für Entscheidungsprobleme mit operativem Charakter beschränkt sich die **Offenlegung intersektoraler Beziehungen**, d. h. einseitiger Abhängigkeiten und gegenseitige Wechselwirkungen des Wasser und Energiesektors, auf ausgewählte Zusammenhänge und wird literaturbasiert oder ohne den Einsatz dedizierter methodischer Werkzeuge durchgeführt (vgl. Lee et al. 2018; De und Majumder 2020; Sivakumar und Ramezaniapour 2015). Bei strategischen Entscheidungsproblemen des WEN kommen PSM, wie kognitive Abbildungen und Ursache-Wirkungs-Diagramme, im Rahmen von Workshops zum Einsatz (vgl. Komendantova et al. 2020; Navarro und Van Nooijen 2022; Terrapon-Pfaff et al. 2020).

Bei der methodischen **Berücksichtigung von Unsicherheit** ist eine breite Etablierung der Szenarioplanung zu beobachten, wenngleich sich deren Ausgestaltung innerhalb der Publikationen unterscheidet. So werden weitestgehend stereotypische und lediglich qualitativ charakterisierte Szenarien definiert. Einzig Komendantova et al. (2020) und Terrapon-Pfaff et al. (2020) entwickeln in Zusammenarbeit mit Entscheidungstragenden langfristige Wasserbedarfsszenarien. Die Wasserbedarfsszenarien, mit zeitlich aufgelösten und quantifizierten Bedarfsprofilen, basieren dabei auf externen Datenquellen wie Regierungsberichten und modellbasierten Berechnungen.

Weitgehend unberücksichtigt bleiben in den identifizierten Publikationen **Pfadabhängigkeiten** bei der Identifikation und Bewertung von Handlungsmaßnahmen im WEN. Lediglich zwei der Publikationen adressieren diese Anforderung. So schlagen Marcella et al. (2020) vor, neben der Präferenzermittlung und Alternativenbewertung zusätzlich einen konkreten Handlungsplan aufzustellen. Der Handlungsplan umfasst kurz- und mittelfristige (1–3 beziehungsweise 4–7 Jahre) Implementierungsschritte sowie begleitende Maßnahmen und sieht zudem eine zukünftige Neubewertung der Alternativen vor, um auf veränderte Markt- und Umweltbedingungen reagieren zu können. Parkinson et al. (2018) gestalten ihr MCDA Verfahren für einen Planungshorizont bis zum Jahr 2050 in 5-Jahres-Segmenten, um Pfadabhängigkeiten bei der Kapazitätserweiterungsplanung von Wasser- und Energieinfrastruktur zu berücksichtigen. Innerhalb jedes Zeitsegmentes werden zudem räumliche und zeitliche Bedarfsdeckungen sichergestellt.

Spezielle Kreativitätstechniken zur **Generierung von Alternativen** werden bislang nur selten in den Ablauf von MCDA Verfahren integriert. Häufig werden die Alternativen als gegeben betrachtet, literaturgestützt ermittelt beziehungsweise aus veröffentlichten Regierungsplänen hergeleitet oder über MODM Verfahren mathematisch ermittelt. Die Publikationen, welche innerhalb von MADM Verfahren PSM zur strukturierten Entwicklung sektorübergreifender Alternativen anwenden, nutzen hierfür Strategietabellen (vgl. Navarro und Van Nooijen 2022; Terrapon-Pfaff et al. 2020). Die Strategietabellen enthalten jeweils eine Reihe möglicher Maßnahmen aus verschiedenen Entscheidungsfeldern des WEN und wurden darüber hinaus in Terrapon-Pfaff et al. (2020) gemeinsam mit den beteiligten Akteuren diskutiert und hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit untersucht, um eine Vorauswahl im Prozess der Erstellung von Alternativen zu treffen.

Darüber hinaus wird nur in einer der identifizierten Publikationen die aktive **Partizipation heterogener Interessensgruppen** in der gesamten Problemstrukturierungsphase, von der Zieldefinition bis zur Ermittlung und Definition von Alternativen, ermöglicht. In Terrapon-Pfaff et al. (2020) wird dies über eine Reihe interaktiver Workshops umgesetzt. Zudem wurden mehrere Kriteriengewichtungen erhoben, um unterschiedliche Präferenzen der beteiligten Akteure zu erfassen. Es werden jedoch keine Verfahren zur methodischen Verarbeitung spezifisch für jeden Akteur erhobenen Kriteriengewichte innerhalb der Aggregationsprozedur der MCDA angewendet.

Tabelle 4.4: Für den WEN angewandten MCDA Verfahren und Limitationen

MCDA Verfahren			Kombination mit Methoden zur kontextspezifischen Ausgestaltung				
Nr.	Verfahren	Limitation/ Anmerkungen	Intersektorale Beziehungen	Unsicherheit	Pfad- abhängigkeiten	Aufdeckung v. Alternativen	Partizipation
1	AHP	Kompensation; kein strategisches Entscheidungsproblem	Energieallokation in Wasserinfrastruktur	-	-	-	-
2	CAR	Kompensation	Inter-institutionelle Workshops	Szenarioplanung	-	Interaktive Generierung mit Entscheidungstragenden	Partizipative Workshops
3	SAW	Transformation in Nutzwerte mit Informationsverlusten; Kompensation	Literaturbasiert	-	-	Literaturbasiert, Regierungsberichte	- (Expertenurteile)
4	SAW	Kompensation zwischen ökonomischen, technischen und umweltbezogenen Kriterien	-	Szenarioplanung	Handlungsplan mit Neubewertung (kurz-, langfristig)	Literaturbasiert, Regierungsberichte	Partizipative Workshops
5	TOPSIS, AHP, SAW	Ausschließlich Aggregationslogik der MCDA Verfahren verwendet; Kompensation	Energiewirtschaftlicher Wasserbedarf	Quantitative Prognosemodelle	-	Softwarebasiertes Informationssystem	-
6	MAVT	Additive Gesamtwertfunktion, daher volle Kompensation zwischen umweltbezogenen und ökonomischen Kriterien	Kognitive Abbildungen	Szenarioplanung	-	Grafische Strategietabelle	-
7	Zielprogrammierung	Keine explizite Unterstützung zur Erschließung des Entscheidungskontextes und Problemstrukturierung	Intersektorale Kapazitätserweiterungsplanung	Szenarioplanung	Planungshorizont 2050; (räumlich, zeitlich)	Mathematische Optimierung	-
8	Zielprogrammierung	Multikriterielle Bewertung beschränkt auf techno-ökonomische Analyse	Intersektorale Planung des Wassereinzugsgebiets	Szenarioplanung	-	Softwarebasiertes Informationssystem	-
9	AHP	Kompensation zwischen ökonomischen, sozialen und umweltbezogenen Kriterien	Wasserwirtschaftlicher Energiebedarf	-	-	Literaturbasiert	-
10	MAVT	Additive Gesamtwertfunktion; Kompensation	Ursache-Wirkungs-Diagramme	Szenarioplanung	-	Strategietabelle	Partizipative Workshops
11	AHP	Approximierte Kriteriengewichte und Präferenzen; Kompensation	-	-	-	Regierungsberichte	-

Quellen: siehe Tabelle A.2

4.3 Vorgehen für die Entwicklung und prospektive Bewertung von Handlungsalternativen im WEN mittels PROMETHEE

Zuvor wurden in diesem Kapitel die Anforderungen an Verfahren zur Entscheidungsunterstützung im neuartigen Problemkontext des WEN aufgezeigt (Abschnitt 4.1). Zudem wurden, durch eine strukturierte Literaturstudie, bestehende methodische Instrumente und Softwaretools für die Entscheidungsunterstützung im Kontext des WEN sowie angewandte MCDA Verfahren identifiziert, vorgestellt und analysiert (Abschnitt 4.2). Der Komplexität des WEN wird bislang mit einer Reihe an PSM und weiteren qualitativen und quantitativen Methoden begegnet, die zumeist mit klassischen MADM und teilweise mit MODM Verfahren kombiniert werden. Zugleich offenbarte die Literaturstudie weiteren Forschungsbedarf hinsichtlich der technischen Charakteristika der gewählten MCDA Verfahren sowie den ergänzend eingesetzten methodischen Instrumenten, um die Anforderungen des WEN zu adressieren.

So gibt es bislang noch kein MCDA Verfahren, welches die Vorteile von Outranking Verfahren für Entscheidungsprobleme mit heterogenen Akteuren im Kontext des WEN nutzt, d. h. deren intuitives Vorgehen, die differenzierten und flexiblen Möglichkeiten zur Präferenzmodellierung und Ergebnisdarstellung sowie die Vermeidung von Kompensationen zwischen Nachhaltigkeitsdimensionen. Darüber hinaus werden die verwendeten MCDA Verfahren bislang nur bedingt mit PSM verzahnt, um intersektorale Beziehungen und Unsicherheiten in der Ermittlung von intersektoralen Handlungsalternativen mit langfristigen Planungshorizont zu berücksichtigen und diese prospektiv zu bewerten. Daher wird im Folgenden ein strukturiertes Vorgehen für die Entwicklung und prospektive Bewertung von Handlungsalternativen im WEN mittels PROMETHEE vorgestellt. Eine prospektive Bewertung erkennt kritische Entwicklungen in den Umweltbedingungen komplexer Entscheidungskontexte und ermöglicht frühzeitig eine Bewertung möglicher Adaptationsmöglichkeiten. Das Vorgehen wird anschließend auf die vorliegende Problemstellung dieser Arbeit, die Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Behebung des Wasserdefizitproblems in Israel, Jordanien und Palästina, angewendet.

Abbildung 4.4 illustriert den strukturierten Ablauf dieses Vorgehens, welches sich am generellen Ablaufschema einer MCDA orientiert und ebenfalls iterativ angelegt ist (vgl. Abbildung 3.2). Um den partizipativen Charakter zu verstärken, wird das MCDA Verfahren der MAMCA mit PROMETHEE als Aggregationsmethode verwendet. So beginnt das Verfahren zur prospektiven Bewertungen von Alternativen im WEN, analog zum allgemeinen Ablauf der MCDA, mit der Identifikation und groben Eingrenzung des Entscheidungsproblems (Schritt 1). In der anschließenden Phase der Problemstrukturierung wird der Entscheidungskontext konkretisiert (Schritte 2–5). Dazu gehört die Ermittlung der Akteure, d. h. der entscheidungstragenden Personen bzw. Institutionen, sowie aller weiteren Interessensgruppen und die Definition vorläufiger Zielsysteme. Gemäß der MAMCA kann jeder Akteur explizit ein eigenes Zielsystem aufstellen. Ausgehend von den Kriterienhierarchien aller Akteure werden Alternativen definiert und deren Kriterienausprägungen ermittelt. Nach Aufstellung der Entscheidungstabelle wird das Präferenzmodell gebildet und die Alternativen gemäß den Gleichungen (3.27)–(3.34) für jeden Akteur und über alle Akteure nach MAMCA-PROMETHEE bewertet (Schritte 6 und 7). Dabei werden zur Bildung des Präferenzmodells von allen Akteuren intra-kriterielle Präferenzfunktionen und Schwellenparameter sowie inter-kriterielle Gewichtungen erhoben.

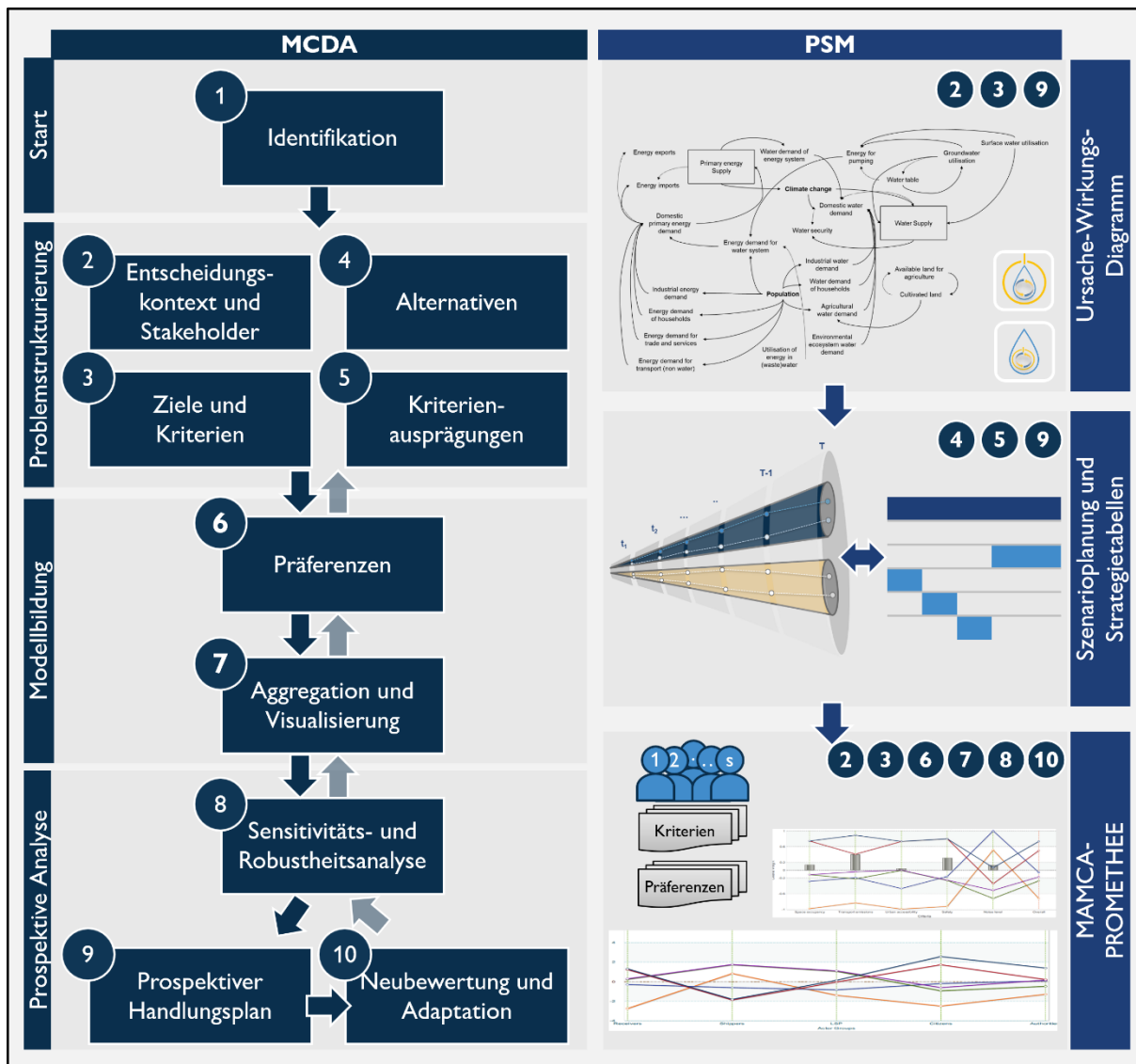


Abbildung 4.4: Ablaufschema des MCDA Verfahrens für die Entwicklung und prospektive Bewertung von Handlungsalternativen im WEN mittels PROMETHEE

Quelle: Eigene Darstellung

Ein wesentlicher Unterschied gegenüber dem bislang vorgestellten Ablauf der MCDA besteht in der Phase, die sich an die Ergebnisanalyse und Ergebnisdarstellung anschließt. Im konventionellen Ablauf der MCDA werden die erlangten Ergebnisse mit den Akteuren besprochen, um eine Implementierung vorzubereiten. Im hier vorgestellten Verfahren wird diese Phase jedoch um eine prospektive Analyse erweitert. Diese zeigt den Entscheidungstragenden bereits ex-ante mögliche Anpassungsoptionen im dynamischen Entscheidungskontext des WEN auf und stellt Werkzeuge für eine multikriterielle ex-post Bewertung zur Verfügung (Schritte 9 und 10). Zudem werden ausgewählte PSM mit der MCDA verzahnt (vgl. Abschnitt 3.4.2), um das Entscheidungsproblem und dessen Elemente nach den Anforderungen des Nexus-Konzeptes zu definieren und den Rahmen für die Modellbildung und prospektive Analyse festzulegen. Die Ausgestaltung dieser verzahnten Integration von MCDA und PSM sowie der Ablauf der prospektiven Analyse werden im Folgenden erläutert.

4.3.1 Ermittlung des Entscheidungskontextes und intersektoraler Beziehungen des WEN

Um den komplexen Entscheidungskontext des WEN zu erfassen, werden Ursache-Wirkungs-Diagramme (engl. causal-loop diagrams, CLD) als analytische Werkzeuge der qualitativen Systemdynamik in die Problemstrukturierung integriert. Die Integration von CLD ermöglicht es, intersektorale Wirkungszusammenhänge des WEN in der multikriteriellen Bewertung zu berücksichtigen und Entscheidungstragende für diese zu sensibilisieren. Insbesondere unterstützen CLD bei der Konkretisierung des Entscheidungskontextes (Schritt 2) und der Ermittlung entscheidungsrelevanter Kriterien (Schritt 3). Darüber hinaus werden die aus dem CLD erlangten Erkenntnisse bei der ex-post Analyse in Schritt 9 verwendet.

CLD werden in Form gerichteter Graphen erstellt. Die Knoten der Graphen stellen dabei wesentliche Variablen des Wasser- bzw. Energiesektors dar²⁰, während Kanten die Kausalzusammenhänge zwischen diesen Variablen beschreiben. CLD beschreiben somit sowohl Zusammenhänge innerhalb des Wasser- und Energiesektors als auch intersektorale Beziehungen im WEN. Jeder Kausalbeziehung wird zusätzlich eine positive oder negative Polarität zugewiesen, um die Wirkung der unabhängigen auf die abhängige Variable aufzuzeigen. Auf diese Weise können die Rückkopplungsstrukturen zwischen dem Wasser- und Energiesektor interaktiv und iterativ erfasst werden. Rückkopplungseffekte zwischen Variablen können in CLD in zwei verschiedenen Formen auftreten. Sich verstärkende Rückkopplungsschleifen beschreiben ein System, welches sich aufgrund gleichwertiger Einflüsse (Polaritäten) aller unabhängiger Variablen auf eine abhängige Variable in stetigem Wachstum bzw. Rückgang befindet. In einer balancierten Rückkopplungsschleife wiederum gibt es eine Variable, die das Wachstum oder den Rückgang der Schleife behindert, so dass sich das System im Zeitverlauf auf einen ausgeglichenen Zustand zubewegen kann.

Durch die Erstellung des CLD werden somit die intersektoralen Zusammenhänge im WEN sichtbar. Darüber hinaus werden unerwünschte Wechselwirkungen, in Form von verstärkenden Rückkopplungsschleifen, aufgedeckt und nachvollziehbar dargestellt. Damit werden der Entscheidungskontext konkretisiert und mögliche, bisher unberücksichtigte Kriterien identifiziert. Die als kritisch erachteten Rückkopplungsschleifen bilden die Grundlage für die nachfolgende Szenarioplanung und sind ein Signal zur Auslösung von Neubewertungen im Rahmen der später folgenden prospektiven Analyse. Die Einzelheiten der prospektiven Analyse werden in Abschnitt 4.3.4 erläutert.

4.3.2 Berücksichtigung von Unsicherheiten und Pfadabhängigkeiten

Innerhalb der Problemstrukturierung werden im MCDA Verfahren dieser Arbeit, neben Ursache-Wirkungs-Diagrammen, die Szenarioplanung und Strategietabellen als PSM verwendet. Die Ergebnisse eines CLD stellen hierbei die Grundlage der Szenarioplanung dar, wie das schematische Vorgehen in Abbildung 4.4 aufzeigt. Durch die Kombination von CLD und der Szenarioplanung werden die Unsicherheiten, die aus dem komplexen Kontext und dem langfristigen Planungshorizont strategischer Entscheidungen im WEN resultieren, im Rahmen der MCDA berücksichtigt. Darüber hinaus ist die Generierung von Szenarien eng mit der Gestaltung von Alternativen verknüpft, wofür Strategietabellen verwendet werden (vgl. z. B. Durbach und Stewart 2003; Gregory et al. 2012a).

²⁰ In Ursache-Wirkungs-Diagrammen wird üblicherweise nicht zwischen Fluss- und Bestandsvariablen unterschieden (Stermann 2000; Haraldsson 2004).

Die gemeinsame Anwendung von Szenarioplanung und MCDA Verfahren bietet dabei gegenseitige Vorteile bei der Bearbeitung des vorliegenden Entscheidungsproblems. So haben die PROMETHEE Methoden zunächst keine ausreichenden Funktionalitäten, um mit den Unsicherheiten, die sich aus dem Entscheidungskontext des WEN und seinem langfristigen Planungshorizont ergeben, adäquat umzugehen, worin wiederum die Stärke der Szenarioplanung liegt (Montibeller et al. 2006; Stewart et al. 2013).

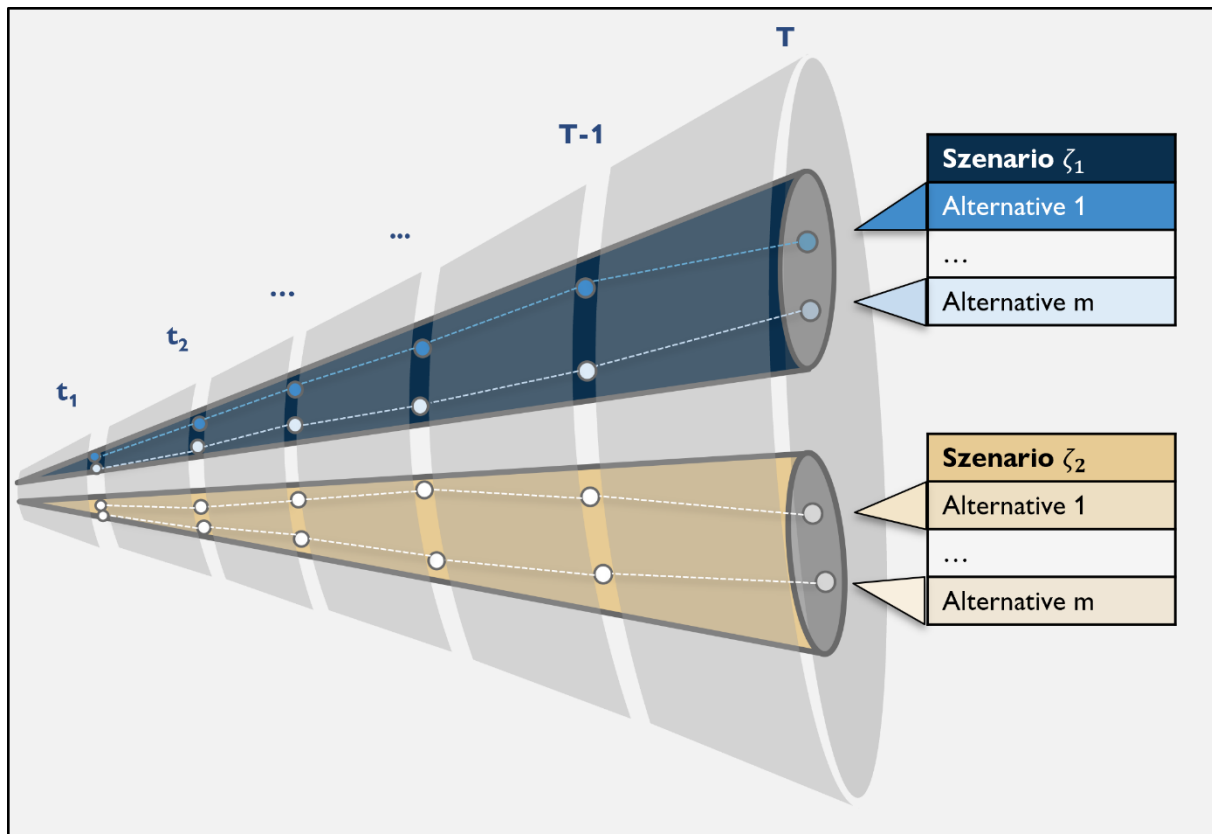


Abbildung 4.5: Vorgehen der Szenarioplanung

Quelle: Eigene Darstellung

Hierzu werden in dieser Arbeit sowohl externe als auch interne Szenarien definiert (Abbildung 4.5). Die Definition der externen Szenarien basiert auf den Variablen, welche zuvor im CLD als Bestandteile von verstärkenden Rückkopplungsschleifen identifiziert wurden (sog. *kritische Variablen*) (Brans et al. 1998). Die externen Szenarien decken somit eine Bandbreite möglicher Entwicklungen dieser *kritischen Variablen* über den betrachteten Planungshorizont ab. Sie sind in Abbildung 4.5 dunkelblau bzw. dunkelgelb dargestellt und mit ζ_1 bzw. ζ_2 bezeichnet. Interne Szenarien hingegen umfassen für jedes externe Szenario eine Auswahl von Alternativen, visualisiert durch farbige Punkte. Die separate Definition von Alternativen für jedes externe Szenario ist erforderlich, um die Alternativen kohärent zu den externen Rahmenbedingungen zu gestalten. Interne Szenarien berücksichtigen somit die in den externen Szenarien gegebenen Rahmenbedingungen und Anforderungen, wie z. B. einen vorgegebenen Wasser- oder Energiebedarf oder technische Restriktionen. Je Szenario werden so insgesamt m Alternativen definiert, deren Kriterienausprägungen über den Planungshorizont T variieren können. Dies ist in Abbildung 4.5 durch die gepunktete Linie dargestellt.

Für das vorliegende Entscheidungsproblem in dieser Arbeit bestehen mögliche Alternativen aus einer Reihe von technischen Lösungen, Umweltmaßnahmen oder politischen Instrumenten. Diese sind zum

Teil auch voneinander abhängig. Hinzu kommt, dass in frühen Planungsphasen oft nur ein breites Spektrum an noch unspezifizierten Alternativen zur Auswahl steht. Um den Prozess der Entwicklung von Alternativen zu systematisieren, werden Strategietabellen verwendet (vgl. Abschnitt 3.4.3). Die Strategietabellen werden nach Entscheidungsfeldern kategorisiert. Ein Entscheidungsfeld umfasst dabei ein ausgewähltes Teilproblem des WEN, d. h. eine bestimmte wasserwirtschaftliche, energiewirtschaftliche oder umweltbezogene Fragestellung, wie die Errichtung von Meerwasserentsalzungsanlagen. Ein Entscheidungsfeld kann zudem aus mehreren Teilentscheidungen bestehen, wie z. B. Standortfragen oder Technologiekonzepten für die Wasser- bzw. Energieinfrastruktur. Alternativen werden auf Basis der Tabelle anschließend durch iterative Auswahl kompatibler Teilentscheidungen über alle Entscheidungsfelder generiert. Das Ziel besteht in der Generierung einer Menge von Alternativen, welche die Vielfalt der zur Verfügung stehenden Teilentscheidungen abdeckt, und von einem breiten Spektrum von Akteuren akzeptiert wird. Tabelle 4.5 zeigt den Aufbau einer solchen Strategietabelle in allgemeiner Form. Um eine Alternative zu erstellen werden in jedem Entscheidungsfeld Optionen der einzelnen Teilentscheidungen kombiniert. Die konkrete Ausgestaltung einer solchen Strategietabelle für ein Entscheidungsproblem des WEN wird im Fallbeispiel dieser Arbeit (Abschnitt 5.2.3.2) aufgezeigt.

Tabelle 4.5: Allgemeine Form einer Strategietabelle

Entscheidungsfeld 1			Entscheidungsfeld 2		...	Entscheidungsfeld x	
Teilentscheidung 1	Teilentscheidung 2	...	Teilentscheidung 1	...	⋮	Teilentscheidung 1	Teilentscheidung y
Option 1	⋮	...	Option 1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Option z	Option z

Quelle: Eigene Darstellung nach Howard (1988)

Durch die Kombination der Strategietabelle mit der Szenarioplanung und deren Integration in die MCDA wird das Phänomen der Pfadabhängigkeit bereits in einer frühen Phase des Planungsprozesses berücksichtigt. Die Strategietabelle verhindert durch ihren iterativen und explorativen Ansatz eine zu enge Orientierung am Status quo. Das Zusammenspiel von Strategietabelle und Szenarioplanung schärft das Bewusstsein der Akteure für den langfristigen Charakter der zu treffenden Entscheidungen und fördert durch die visuelle Darstellung eine frühzeitige Auseinandersetzung mit möglichen Lock-in-Effekten. Ein adaptives Präferenzmodell und eine dynamische Neubewertung sind eine weitere Möglichkeit, die negativen Auswirkungen der Pfadabhängigkeit abzuschwächen (Hämäläinen und Lahtinen 2016; Brans et al. 1998). Dazu wird das Präferenzmodell zu bestimmten Zeitpunkten des Planungshorizontes (s. Abbildung 4.5) oder aufgrund neu gewonnener Daten, wie z. B. veränderter Kriterienausprägungen, überarbeitet, und die Alternativen werden neu bewertet. Dieser prospektive Ansatz zur Behandlung der Pfadabhängigkeit wird in Abschnitt 4.3.4 näher erläutert.

Der Ansatz, eine von allen Akteuren akzeptierte Auswahl von Szenarien und Alternativen zu generieren, verdeutlicht eine Herausforderung der Integration von Szenarioplanung und Strategietabellen in die MCDA – insbesondere in Anbetracht der Komplexität der vorliegenden Entscheidungsproblematik. Die Alternativen bestehen aus einem breiten Spektrum von sektorübergreifenden Entscheidungsfeldern und einer Vielzahl von Teilentscheidungen. Zur Erstellung der Szenarien und Alternativen treffen

somit die heterogenen Kenntnisse und Ansichten einer Vielzahl von Akteuren aufeinander. Zur Bewertung der Alternativen mittels PROMETHEE sind diese in ein repräsentatives Präferenzmodell zu überführen (vgl. z. B. Ram und Montibeller 2013; Ram et al. 2011). Daher werden die Bildung des Präferenzmodells und Bewertung der Alternativen nach MAMCA-PROMETHEE vorgenommen.

4.3.3 Explizite Einbindung verschiedener Interessensgruppen

Die Bildung des Präferenzmodells nach MAMCA-PROMETHEE ermöglicht es, widersprüchliche Ziele verschiedener Akteure zu modellieren (vgl. Abschnitt 3.5.1). Hierzu werden Zielsysteme und Präferenzinformationen, d. h. Kriterien, Präferenzfunktionen, Schwellenparameter und Kriteriengewichtungen, für jede Interessensgruppe separat erhoben (s. Abbildung 4.4).

Um Ziele zu identifizieren, Kriterienhierarchien aufzustellen und Präferenzinformationen zu erheben, bieten sich aufgrund der Komplexität der Problemstellung und der Heterogenität der Akteure indirekte Verfahren, wie z. B. Simos' Methode zur Kriteriengewichtung (Figueira und Roy 2002), an. Diese sind in interaktiv konzipierte Online- und Präsenzworkshops eingebettet, um den Entscheidungskontext und die verwendeten Verfahren zu erläutern. Darüber hinaus bieten die Workshops eine Diskussionsplattform und sensibilisieren alle Beteiligten für die Interdisziplinarität und Vielschichtigkeit des Entscheidungsproblems.

Im Rahmen mehrerer Workshops werden so Zielsysteme erstellt, Alternativen erzeugt und Präferenzinformationen erhoben. Das interaktive und hybride Format ermöglicht es, dabei eine Vielzahl von Akteuren zu erreichen, und begrenzt zudem den zeitlichen Aufwand für alle Beteiligten. Je nach Zweck des Workshops werden unterschiedliche Akteure eingebunden. Bei der Identifikation von Zielen und Erhebung von Präferenzinformationen werden möglichst alle beteiligten Akteure eingebunden. Die im vorherigen Schritt präsentierte Ermittlung von Handlungsalternativen involviert hingegen vorrangig technische Experten des jeweiligen Entscheidungsfelds.

Die erzeugten Alternativen werden anschließend für alle Szenarien anhand der Kriterien und Präferenzinformationen aller Akteure nach der Aggregationslogik von MAMCA-PROMETHEE bewertet (vgl. Abschnitt 3.5.2), mithilfe der Sensitivitätsanalysen für PROMETHEE analysiert und die Ergebnisse visualisiert. Um die Akteure auch im Anschluss an die Bewertung einzubeziehen, werden die Ergebnisse der MCDA in schriftlicher Form und digitaler Form bereitgestellt und mit den Akteuren besprochen. Die digitale Bereitstellung in Form eines Online-Informationssystems umfasst leicht zugängliche Werkzeuge, die einen Wissenstransfer der innerhalb der Entscheidungsunterstützung erlangten Erkenntnisse ermöglichen. Das Online-Informationssystem beinhaltet GIS-Daten und Darstellungen, verschiedene Webanwendungen und Datenschnittstellen für alle Akteure des WEN (s. Abschnitt 5.4.2.1). Zudem wird ein prospektiver Handlungsplan formuliert und mögliche Signale zur Auslösung von Neubewertungen definiert. Die prospektiven Elemente des Verfahrens werden im folgenden Abschnitt erläutert.

4.3.4 Prospektive Analyse mittels MAMCA-PROMETHEE

Aufgrund der bestehenden Unsicherheiten bei Entscheidungen im Wasser- und Energiesektor und des langen Planungshorizontes endet das für den WEN entwickelte MCDA Verfahren nicht mit einer ex-ante Bewertung. Unvorhergesehene Ereignisse können dazu führen, dass eine Entscheidung obsolet oder unzulänglich wird, so dass ex-post kurzfristige und flexible Anpassungen erforderlich sind. Bereits getroffene Entscheidungen können manchmal mit relativ geringem Mehraufwand und geringen Kosten geändert werden, z. B. durch Änderung von Umweltmanagementmaßnahmen. Selbst bei Wasser- und

Energieinfrastrukturprojekten oder bei technologischen Entscheidungen, die nicht ohne weiteres rückgängig gemacht werden können, sind noch Eingriffe und Anpassungen, insbesondere während der Bauphase, möglich. Die Herausforderung besteht jedoch darin, möglichst frühzeitig einen Anpassungsbedarf zu erkennen und geeignete Anpassungsmaßnahmen zu formulieren und zu bewerten. Die Prozessschritte der Aggregation, Analyse und Visualisierung werden daher, gegenüber dem allgemeinen Ablauf von MCDA Verfahren, um zwei Elemente ergänzt. Ein Element ist die Aufstellung eines prospektiven Handlungsplans, wie er z. B. von Marcella et al. (2020) im Kontext des WEN verwendet wurde. Ein weiteres prospektives Element ist die gezielte Identifikation und Signalisierung unerwarteter Entwicklungen, die eine Neubewertung erforderlich machen und zu veränderten Präferenzrelationen führen können (Schritt 10).

Ein prospektiver Handlungsplan (Schritt 9) formuliert über den Planungshorizont sequenzielle Implementierungsschritte und Maßnahmen, um die entwickelten und bewerteten Alternativen an externe Entwicklungen, z. B. Preisentwicklungen auf den Energiemärkten oder veränderte Wasserbedarfslagen, anpassen zu können. Zur Erstellung des prospektiven Handlungsplans wird auf die Erkenntnisse aus den Ursache-Wirkungs-Diagrammen und der Szenarioplanung zurückgegriffen. Die zuvor identifizierten kritischen Variablen bieten dabei Orientierung. So werden Anpassungsmaßnahmen im Hinblick auf die Bandbreite möglicher Entwicklungen dieser kritischen Variablen definiert. Der prospektive Handlungsplan bietet Entscheidungstragenden somit auch ex-post Leitlinien im Rahmen der modellierten Unsicherheit. Die digitalen Werkzeuge des erstellten Online-Informationssystems ergänzen den prospektiven Handlungsplan, indem sie beispielweise Szenarien und mögliche Adaptionsmaßnahmen in GIS abbilden.

Jedoch können bisher unbekannte Einflussfaktoren oder externe Schocks zu Abweichungen von den vorhergesagten Szenarien führen. Ebenso können sich Kriterienausprägungen oder Präferenzen im Zeitverlauf maßgeblich ändern und eine Neubewertung der Alternativen nach PROMETHEE erfordern. Daher werden Zeitpunkte innerhalb des Planungshorizonts festgelegt, zu denen die Alternativen neu bewertet werden, um das Präferenzmodell zu aktualisieren. Die so erlangten ex-post Ergebnisse können mit den initialen Auswertungen verglichen werden, um gegebenenfalls Anpassungen an den Alternativen vorzunehmen (Schritt 10). Neben den festgelegten Zeitpunkten für eine Neubewertung werden zusätzlich Schwellenwerte für kritische Variablen festgelegt, welche eine unvorhergesehene Entwicklung und damit den Bedarf einer Neubewertung der Alternativen nach PROMETHEE signalisieren (vgl. Brans et al. 1998; Brans et al. 2002). Weicht z. B. in Zukunft das Süßwasserdefizit über ein bestimmtes Maß von den im Rahmen der Szenarioplanung erwarteten Werten ab oder entwickeln sich die Energiepreise für den Betrieb der Wasserinfrastruktur deutlich anders als erwartet, können so dynamische Neubewertungen durch die Entscheidungsträger vorgenommen werden. Für die technische Umsetzung werden ihnen im Online-Informationssystem die notwendigen Softwaretools zur Verfügung gestellt.

Durch diese zwei prospektiven Elemente des MCDA Verfahrens können Entscheidungstragenden ex-ante zukünftige Adaptionsmöglichkeit aufgezeigt werden, und es werden methodische Hilfen geboten, um ex-post die Notwendigkeit zur Neubewertung und Adaptation zu erkennen.

4.4 Zusammenfassung

Der Betrachtungsgegenstand des WEN umfasst intersektorale und häufig grenzüberschreitende Entscheidungsprobleme des Umweltmanagements unter mehrdimensionalen Nachhaltigkeitszielen. Zudem treffen bei den Entscheidungsproblemen des WEN eine Vielzahl von Akteuren aus unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen, institutionellen Bereichen sowie aus der Zivilgesellschaft mit heterogenen Ansprüchen aufeinander. MCDA Verfahren eignen sich für komplexe Mehrzielentscheidungsprobleme des Umweltmanagements. Sie ermöglichen es, die einzelnen Interessensgruppen mit ihren unterschiedlichen Perspektiven und Ansprüchen in einen Dialog zu führen und die aus den verschiedenen fachspezifischen Modellen gewonnenen Ergebnisse unter Berücksichtigung der zugrundeliegenden Zielstellungen integrativ zu bewerten. Verglichen mit einer sektorspezifischen Perspektive auf Entscheidungsprobleme im Wasser-, Energie- und Umweltbereich ergeben sich für die Anwendung einer MCDA im WEN dabei jedoch zusätzliche Anforderungen. Zunächst werden geeignete Wege zur Erfassung der intersektoralen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen dem Wasser- und Energiesektor benötigt. Dies erfordert die Identifikation und Modellierung komplexer, oftmals nicht deterministischer Ursache-Wirkungs-Beziehungen und die Harmonisierung von Daten in verschiedenen Maßeinheiten und deren Überführung in die Aggregationsprozedur der gewählten MCDA Methode. Ebenso sollten MCDA Verfahren partizipativ gestaltet sein, Unsicherheiten verschiedener Quellen berücksichtigen, Kreativitätstechniken zur Entwicklung neuartiger Handlungsmaßnahmen bereitstellen und zugleich Pfadabhängigkeiten vorbeugen (Abschnitt 4.1).

Eine strukturierte Literaturstudie identifizierte bestehende methodische Instrumente und Softwaretools für die Entscheidungsunterstützung im Kontext des WEN sowie bislang angewandte MCDA Verfahren (Abschnitt 4.2). Die Ergebnisse der Literaturstudie zeigten, dass die Ergänzung der MCDA durch gezielt gewählte und ausgestaltete problemstrukturierende Methoden sowie weitere analytische Instrumente Möglichkeiten zur Bewältigung der kontextabhängigen Komplexität des WEN bietet. Zumeist werden dabei klassische MADM Verfahren und stellenweise MODM Verfahren verwendet. Die Literaturstudie offenbart weiteren Forschungsbedarf hinsichtlich der technischen Charakteristika der gewählten MCDA Verfahren sowie den ergänzend eingesetzten methodischen Instrumenten, um die Anforderungen des WEN zu adressieren. Bislang existiert kein MCDA Verfahren, das die Vorteile von Outranking Verfahren hinsichtlich Nachvollziehbarkeit, flexibler Präferenzmodellierung, differenzierter Ergebnisdarstellung und Vermeidung von Kompensation zwischen Kriterien für Entscheidungsprobleme mit heterogenen Akteuren im Kontext des WEN gänzlich nutzt.

Aus diesem Grund wurde ein neues MCDA Verfahren zur Bearbeitung der Problemstellung dieser Arbeit entwickelt (Abschnitt 4.3). Das MCDA Verfahren für die Entwicklung und prospektive Bewertung von Maßnahmen zur Lösung des Wasserdefizitproblems im Nahen Osten basiert auf den PROMETHEE Methoden und berücksichtigt dabei die Anforderungen, die sich aus einer gemeinsamen Betrachtung wasser- und energiewirtschaftlicher Entscheidungsprobleme nach dem Konzept des WEN ergeben erstmals gänzlich. Das MCDA Verfahren verzahnt den Ablauf von PROMETHEE mit den problemstrukturierenden Methoden der Ursache-Wirkungs-Diagramme, Szenarioplanung und Strategietabellen, um intersektorale Beziehungen und Unsicherheiten bei der Entwicklung von Handlungsalternativen zu berücksichtigen und diese prospektiv zu bewerten. Zielsysteme und Präferenzinformationen werden für jede Interessensgruppe separat erhoben und nach MAMCA aggregiert. Auf diese Weise ist es jedem Akteur möglich ein eigenes Zielsystem festzulegen. Darüber hinaus bietet MAMCA-PROMETHEE im Vergleich zu den bestehenden PROMETHEE-Methoden (vgl. Abschnitt 3.3.3.3) eine differenziertere Analyse der Ergebnisse im Rahmen der Konsensfindung.

Ein prospektiver Handlungsplan formuliert über den Planungshorizont sequenzielle Implementierungsschritte und Maßnahmen, um die entwickelten und bewerteten Alternativen an externe Entwicklungen anpassen und gegebenenfalls neu bewerten zu können. Zur Erstellung des prospektiven Handlungsplans wird auf die Erkenntnisse aus den Ursache-Wirkungs-Diagrammen und der Szenarioplanung zurückgegriffen. Er bietet Entscheidungstragenden somit auch ex-post Leitlinien im Rahmen der modellierten Unsicherheit und wird um digitale Werkzeuge, wie z. B. GIS-Plattformen und Kalkulationsprogrammen, ergänzt.

Das Vorgehen wird nun anhand des Fallbeispiels dieser Arbeit, der Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Behebung des Wasserdefizitproblems in Israel, Jordanien und Palästina, aufgezeigt.

5 Entwicklung und prospektive Bewertung von WEN Maßnahmen im Nahen Osten

In Abschnitt 1.1 wurde in das Wasserdefizitproblem des Nahen Ostens mit besonderem Fokus auf die Region Israels, Jordaniens sowie der palästinensischen Territorien im Westjordanland und Gaza eingeführt. Verhältnismäßig geringe Niederschlagsmengen, ein begrenztes Oberflächenwasserangebot und zunehmend erschöpfte Grundwasserleiter treffen auf eine zunehmende Nachfrage nach Süßwasser. Um langfristig eine ausreichende Verfügbarkeit von Süßwasser für industrielle, landwirtschaftliche und häusliche Zwecke zu gewährleisten, sind insbesondere in den Palästinensischen Gebieten und in Jordanien zeitnah zusätzliche Maßnahmen zur effizienteren Nutzung der vorhandenen Wasserressourcen sowie zur Erzeugung von zusätzlichem Süßwasser durch technische Verfahren der MWE erforderlich. Da die MWE und der Wassertransport über große Entfernungen unter topografisch anspruchsvollen Bedingungen sehr energieintensiv sind, ergeben sich an verschiedenen Stellen Überschneidungen mit energiewirtschaftlichen Infrastrukturentscheidungen, so dass sich das Konzept des WEN als Leitprinzip anbietet. In diesem Kapitel wird das in Abschnitt 4.3 entwickelte MCDA Verfahren für die Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen im WEN auf das vorliegende Fallbeispiel angewendet.

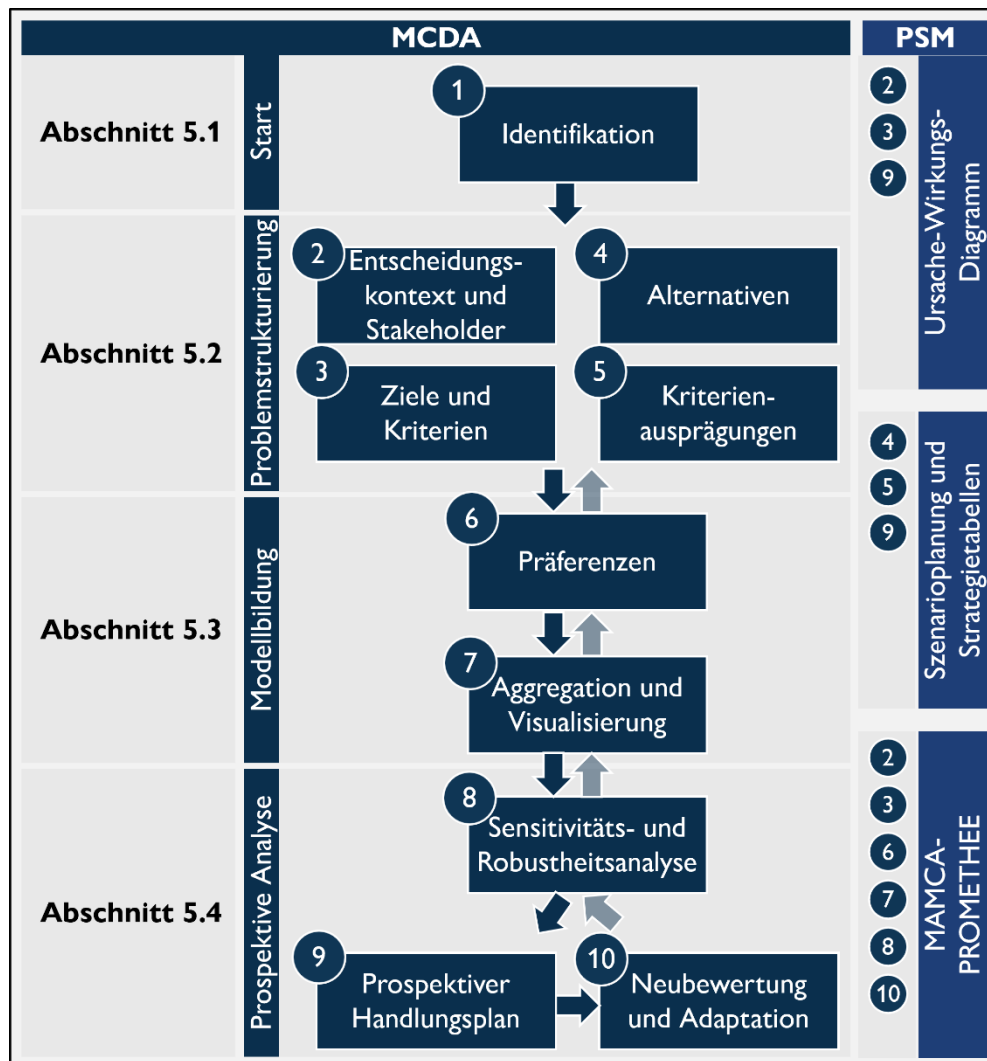


Abbildung 5.1: Struktur des Fallbeispiels

Quelle: Eigene Darstellung

Der Aufbau dieses Kapitels orientiert sich dabei am Ablauf des MCDA Verfahrens (Abbildung 5.1). In Abschnitt 5.1 wird zunächst in den Hintergrund des Fallbeispiels eingeführt, welches auf die multilaterale Forschungsinitiative SALAM zurückgeht und somit das zugrundeliegende Entscheidungsproblem identifiziert. In Abschnitt 5.2 wird das Vorgehen zur Ermittlung der beteiligten Interessensgruppen, deren Zielsysteme und die Ableitung entscheidungsrelevanter Kriterien erläutert. Ebenso wird der Prozess der Entwicklung von Alternativen, einer Reihe von ineinander greifenden wasser- und energiewirtschaftlichen Maßnahmen, die gemeinsam mit beteiligten Akteuren aus der Region erarbeitet wurden, aufgezeigt. Die finalisierten Entscheidungstabellen werden in Abschnitt 5.3 dargestellt. Ebenso wird die Vorgehensweise zur Erhebung der Präferenzinformationen über hybride Workshops erläutert. In Abschnitt 5.4 wird das Ergebnis der Aggregation nach MAMCA mit PROMETHEE als Aggregationsmethode analysiert und die Erstellung des prospektiven Handlungsplans, welcher zur Umsetzung empfohlene Maßnahmen, mögliche Adaptationsmechanismen und weitere digitale Werkzeuge für Entscheidungstragende beinhaltet, dargelegt. Abschnitt 5.5 fasst das Fallbeispiel zusammen.

Die genaue Ausgestaltung der in die MCDA integrierten problemstrukturierenden Methoden wird ebenfalls in den entsprechenden Abschnitten aufgezeigt. Dazu gehören sowohl die Ursache-Wirkungs-Diagramme (CLD) zur Identifizierung der kritischen intersektoralen Beziehungen des WEN als auch die Strategietabellen und die Szenarioplanung zur Entwicklung von Alternativen über den langfristigen Planungshorizont, welcher in diesem Fall bis zum Jahr 2050 reicht. Ebenso wird gezeigt, wie die flexible Modellierung von Zielsystemen nach MAMCA die differenzierte und nachvollziehbare Aggregationslogik von PROMETHEE ergänzt, um heterogene Interessensgruppen partizipativ in die MCDA einzubinden.

5.1 Die SALAM-Initiative

Die vorliegende Fallbeispiel ist Teil der zweiten Projektphase der SALAM-Initiative. Die SALAM-Initiative ist ein gemeinschaftliches Verbundprojekt, in dem im Zeitraum der Jahre 2020 bis 2022 von 19 Partnerinstitutionen aus Palästina, Jordanien, Israel und Deutschland gemeinsam Strategien zur Lösung des Wasserdefizitproblems im Nahen Osten erarbeitet wurden. Die SALAM-Initiative wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 02WM1533F gefördert. Das Projektkonsortium umfasst Universitäten, Forschungszentren, Beratungsunternehmen, Ingenieurbüros und nationale Behörden (De Bourgoing et al. 2022a, S. 12).

Die innerhalb von SALAM erarbeiteten Handlungsmaßnahmen beruhen auf der MWE am Mittelmeer und am Roten Meer. SALAM setzt dabei auf grenzüberschreitenden Wassertransfer, um Wasserdefizite langfristig und kosteneffizient auszugleichen, sowie auf enge Zusammenarbeit mit Entscheidungstragenden und weiteren Akteuren aus der Region. Hierzu werden innerhalb von SALAM die zukünftigen Wasserdefizite in palästinensischen und jordanischen Bedarfszentren quantifiziert und Maßnahmen für die grenzüberschreitende Förderung von entsalztem Meerwasser vom Mittelmeer und dem Roten Meer sowie weitere wasser- und energiewirtschaftliche Maßnahmen erarbeitet (De Bourgoing et al. 2022a, S. 12).

Die langfristige Behebung des Wasserdefizits erfordert einen umfassenden Ausbau der Infrastruktur, sowohl hinsichtlich der zu schaffenden Entsalzungs- und Förderkapazitäten als auch der Abwasseraufbereitung. Des Weiteren muss untersucht werden, wie das entsalzte Wasser im Verbund mit Oberflächenwasser, Grundwasser und Abwasser in der Region bewirtschaftet werden kann. Die Maßnahmen umfassen daher einerseits aufeinander abgestimmte Konzepte von technischen Anlagen und Bewirtschaftungskonzepten zur Zwischenspeicherung und Wiederverwendung von Süßwasser (Klein und

Theobald 2022b; Xanke et al. 2022b; Trùòng et al. 2022; Scheday und Zarzar 2022b) und aufbereitetem Abwasser (Khurelbaatar et al. 2022; Xanke et al. 2022a). Andererseits wurden Konzepte zur Integration erneuerbarer Energietechnologien in die entwickelten wasserwirtschaftlichen Maßnahmen untersucht. Dazu gehören technische Konzepte zur Nutzung der Sonneneinstrahlung für die energieintensive MWE (Yüce und Janowitz 2022b) und die Integration von Wasserkraft zur Rückgewinnung der für die Entsalzung und Förderung aufgewendeten Energie (Klein und Theobald 2022a). Zusätzlich wurden Implementierungsstrategien für israelisch-jordanische Wasser-Energie Handelsabkommen auf Basis der erarbeiteten Infrastrukturlösungen einer Potenzialstudie unterzogen (Janowitz et al. 2022c).

Die Fallstudie dieser Arbeit widmet sich der prospektiven multikriteriellen Analyse der im Rahmen von SALAM erarbeiteten Maßnahmen, um von den regionalen Entscheidungsinstanzen präferierte Maßnahmen zu identifizieren und Handlungsempfehlungen abzuleiten. Die in diesem Kapitel dargestellten Maßnahmen, Zielsysteme, Präferenzen und Kriterienausprägungen wurden vom Autor, gemeinsam mit den Projektpartnern, im Rahmen der SALAM-Initiative entwickelt beziehungsweise erhoben. Die Projektpartner aus Deutschland, Jordanien, Palästina und Israel haben somit maßgeblich zur Strukturierung des Entscheidungsproblems und der Präferenzhebung, sowohl vor Ort im Rahmen von Workshops, als auch über asynchron durchgeführte Befragungen, beigetragen. Die Abschlussberichte der Projektpartner sind gesammelt in der Veröffentlichung von De Bourgoing et al. (2022a) zu finden.

Alle für das Fallbeispiel erhobenen Daten beziehen sich daher auf den Projektzeitraum der Jahre 2020 bis 2022. Dies betrifft sowohl den Stand der Technik als auch die verwendeten Marktdaten zur Erstellung der techno-ökonomischen Analysen. Ebenso wurden innerhalb des Projektes sozio-politischer Daten von den beteiligten Akteuren im Rahmen von multilateralen Workshops erhoben und um weitere Daten aus Planungsdokumenten öffentlicher Institutionen, wie etwa zur Erstellung von Szenarien, ergänzt. Sie spiegeln den Planungsstand zum Projektzeitraum wider und können aufgrund der wiederkehrenden geopolitischen Instabilitäten in der Region nachträglichen Revisionen ausgesetzt sein.

5.2 Problemstrukturierung

In den folgenden Abschnitten wird das Vorgehen zur Strukturierung des Entscheidungsproblems beschrieben. Dies umfasst die Schritte 2 bis 5 des entwickelten MCDA Verfahrens (Abbildung 4.4). Hierzu wird zunächst der Entscheidungskontext abgegrenzt, es werden die intersektoralen Wirkungszusammenhänge mittels Erstellung eines CLD erfasst und die beteiligten Interessensgruppen benannt (Schritt 2).

Anschließend wird die hybride Vorgehensweise zur Erhebung der Kriterienhierarchien, d. h. über Workshops und asynchrone Befragungen, erläutert. Ebenso werden die aufgestellten Kriterienhierarchien und die Skalen und Polaritäten der Kriterien aufgezeigt (Schritt 3).

Die Entscheidungstabellen werden durch die Entwicklung konkreter Handlungsalternativen und Ermittlung der Kriterienausprägungen vervollständigt. Um Unsicherheiten in der Planung zu berücksichtigen, werden mittels der Szenarioplanung zunächst Wasserdefizitszenarien erstellt. Auf Grundlage dieser Wasserdefizitszenarien werden anschließend Handlungsalternativen über Strategietabellen entwickelt (Schritt 4).

Die Alternativen zur Behebung des Wasserdefizitproblems in Israel, Jordanien und Palästina sind hinsichtlich sämtlicher Nachhaltigkeitsdimensionen zu bewerten, d. h. die Kriterienhierarchien umfassen sowohl technische, ökonomische und umweltbezogene Kriterien sowie sozio-politische Aspekte. Aus

diesem Grund wurden verschiedene methodische Instrumente, wie im Einzelnen beschrieben, eingesetzt, um die Kriterienausprägungen für die entwickelten Alternativen zu ermitteln (Schritt 5).

5.2.1 Entscheidungskontext und beteiligte Interessensgruppen

In Jordanien, Israel und den palästinensischen Gebieten im Westjordanland und Gaza führen semi-ari-des Klima und Bevölkerungswachstum zu zunehmend reduzierter Süßwasserverfügbarkeit bei wachsender Nachfrage. Israel investiert seit Beginn des 21. Jahrhunderts in den Ausbau von Anlagen zur MWE und wird voraussichtlich in der Lage sein, den steigenden Bedarf an Süßwasser zu decken. Dagegen sind zusätzliche Meerwasserentsalzungskapazitäten am Mittelmeer und am Roten Meer in Verbindung mit grenzüberschreitendem Wassertransfer erforderlich, um die erwarteten Süßwasserdefizite in Jordanien und Palästina zu decken (Rusteberg et al. 2019).

Die Ziel- und Fragestellungen des in dieser Fallstudie betrachteten Entscheidungsproblems, welche zugleich den **Entscheidungskontext** festlegen, lauten daher wie folgt:

- Quantifizierung der erwarteten Süßwasserdefizite in Jordanien und Palästina bis in das Jahr 2050, welche langfristig mittels MWE zu decken sind.
- Ermittlung der zur Verfügung stehenden Technologien zur MWE und Erstellen von Infrastrukturkonzepten, bestehend aus Meerwasserentsalungsanlagen und energetischen Versorgungskonzepten.
- Konzeptionierung möglicher Alternativen für grenzüberschreitende Verteilungsnetzwerke zur Förderung des entsalzten Wassers, d. h. Trassierung und Bemessung von Rohrleitungen sowie Planung von Förderanlagen.
- Bewirtschaftungskonzepte für die zusätzlich anfallenden Abwasservolumina in Jordanien und dem Westjordanland, d. h. Konzepte zur Sicherstellung der benötigten Abwasseraufbereitungsanlagen und Nutzungskonzepte zur Verwendung des aufbereiteten Abwassers.
- Wie kann ein Wissenstransfer der angewandten Methoden und der gewonnenen Erkenntnisse realisiert werden, um Entscheidungsträgern auch in Zukunft eine Unterstützung in Fragen der wasser- und energiewirtschaftlichen Planung zu bieten?

5.2.1.1 Einbindung beteiligter Interessensgruppen

Ein wesentlicher Bestandteil der MCDA ist die Einbindung der wichtigsten Interessensgruppen (engl. stakeholder) in den Prozess der Entscheidungsunterstützung. Dies gilt sowohl für entscheidungstragende Personen und Institutionen, als auch für andere Gruppen, die ein Interesse daran haben, dass ihre Ansichten und Werte berücksichtigt werden. In Tabelle 5.1 sind die am Prozess beteiligten Projektpartner aus Deutschland und der Region aufgelistet. Zur Einbindung von Interessensgruppen aus der Zivilgesellschaft wurden darüber hinaus Personen aus dem akademischen Bereich und technische Experten weiterer Institutionen und Forschungseinrichtungen einbezogen. Sie sind in Tabelle B.2 aufgeführt. Eine Erhebung mit einer großen repräsentativen Bevölkerungsstichprobe wurde in dieser Projektphase nicht durchgeführt.

Tabelle 5.1: Übersicht der beteiligten Interessensgruppen und Experten

Bezeichnung	Funktion
Georg-August Universität Göttingen (UGOE)	Projektleitung, Wasserwirtschaftliche Planung (Süßwasserdefizite, Wasserspeicherung Israel)
Rusteberg Water Consulting (RWC)	Projektleitung, Wasserwirtschaftliche Planung (Wasserproduktion- und -transfer)
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ)	Wasserwirtschaftliche Planung (Konzeptionierung Abwasserinfrastruktur)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	Systembewirtschaftung, Wasserspeicherung und -wiederverwendung in Jordanien
Universität Kassel (UK)	Wasserspeicherung und -wiederverwendung, Konzeptionierung Wasserkraftwerk
Universität Duisburg-Essen (UDE)	Multikriterielle Bewertung von Alternativen, SALAM-Expertensystem
STEP Consulting (STEP)	Wasserwirtschaftliche Planung (Konzeptionierung Entsalzungsanlagen, Wasser-Energie-Abkommen Israel-Jordanien)
Dorsch International Consultants (DI)	Wasserwirtschaftliche Planung (Förderinfrastruktur, Abwasserinfrastruktur)
INTEND Geoinformatik (INT)	SALAM-Expertensystem (technische Umsetzung)
I3 Systems Information Technology (I3S)	SALAM-Expertensystem (technische Umsetzung)
Mekorot Water Company Ltd. (MEK)	Wasserwirtschaftliche Planung (Israel)
Hydrological Service of Israel (HSI)	Wasserwirtschaftliche Planung (Israel), Multikriterielle Bewertung
Environmental & Water Resources Engineering (EWRE)	Wasser- und energiewirtschaftliche Planung, Multikriterielle Bewertung, SALAM-Expertensystem
Ministry of Water and Irrigation of the Hashemite Kingdom of Jordan (MWI)	Wasserwirtschaftliche Planung (Jordanien), Multikriterielle Bewertung
Arab Technologist for Economic and Environmental Consultation (ATEEC)	Wasserwirtschaftliche Planung (Jordanien), Systembewirtschaftung, Multikriterielle Bewertung
University of Jordan (JUA)	Multikriterielle Bewertung (Jordanien)
Palestinian Water Authority (PWA)	Wasserwirtschaftliche Planung (Palästina), Multikriterielle Bewertung
Hydro-Engineering Consultancy (HEC)	Wasserwirtschaftliche Planung (Palästina), Systembewirtschaftung, Multikriterielle Bewertung
Palestinian Hydrology Group (PHG)	Multikriterielle Bewertung (Palästina)

Quelle: Eigene Darstellung nach De Bourgoing et al. (2022a)

Um alle Interessensgruppen möglichst effektiv und aufwandseffizient in die MCDA einzubinden, wurden innerhalb des MCDA Verfahrens verschiedene Formen der Interaktion gewählt (Tabelle 5.2). Die beteiligten Interessensgruppen werden dabei, abhängig von ihrer spezifizierten Funktion, über unterschiedliche Interaktionsformen und an unterschiedlichen Stellen der MCDA eingebunden. Konsortialtreffen wurden mehrfach über den Projektzeitraum verteilt und wahlweise Online oder in Präsenz abgehalten. Auf diesen wurden alle Beteiligten in die MCDA und den Verfahrensablauf eingeführt. Zu späteren Zeitpunkten wurden Konsortialtreffen genutzt, um den derzeitigen Stand der MCDA zu präsentieren und Rückmeldungen zu den entwickelten Alternativen, den Zwischenergebnissen und Auswertungen vom gesamten Projektkonsortium, insbesondere der regionalen Interessensgruppen, zu erhalten. Basierend auf diesen Rückmeldungen konnten neue Iterationen der MCDA initiiert werden. Die bilateralen Treffen dauerten in der Regel ein bis zwei Stunden und fanden mit ausgewählten Akteuren einer bestimmten Funktion statt, z. B. mit den technischen Experten zur Konzeptionierung des Wasserkraftwerks um die Alternativen zu definieren und Kriterienausprägungen zu ermitteln. Asynchrone Befragungen wurden in Form von Online-Fragebögen durchgeführt, um weitere regionale Interessensgruppen außerhalb des Projektkonsortiums zu erreichen. Die Workshops zur Ermittlung der Ziele und Präferenzen wurden aufgrund der räumlichen Distanz zur Region und der Pandemiesituation im Zeitraum 2020–2022 hybrid, d. h. im Rahmen eines Projekttreffens in der Region und ergänzend im Online-Format durchgeführt. Ein Kurzbericht diente der Verschriftlichung der erzielten Ergebnisse für die Entscheidungstragenden der Region und wurde durch Erläuterungen der zusätzlich übergebenen digitalen Werkzeuge ergänzt. Die genaue Ausgestaltung der einzelnen Interaktionsformen ist in den Abschnitten zum entsprechenden MCDA Verfahrensschritt erläutert.

Tabelle 5.2: Interaktionsformen zur Einbindung von Interessensgruppen in die MCDA

Verfahrensschritt	Format	Konsortial-treffen	Bilaterale Treffen	Asynchrone Befragungen	Workshops (Präsenz)	Workshops (Online)	Kurzbericht
Problem- strukturierung	Ziele und Kriterien		X		X	X	
	Alternativen	X	X				
	Kriterienausprägungen		X	X			
Modell	Präferenzenerhebung				X	X	
	Aggregation Visualisierung	X					
Prospektive Analyse	Ergebnisanalyse	X	X				
	Prospektiver Handlungsplan						X
	Neubewertung und Adaptation						X

Quelle: Eigene Darstellung

5.2.1.2 Erfassung intersektoraler Beziehungen

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil zur Erfassung des Entscheidungskontextes bei Entscheidungsproblemen im Kontext des WEN ist die Erfassung der intersektoralen Wirkungszusammenhänge des betrachteten Entscheidungsproblems. Im hier aufgezeigten Verfahren werden CLD in die MCDA integriert. CLD entstammen der qualitativen Systemdynamik und visualisieren wichtige Variablen und

Wirkungszusammenhänge zwischen den Sektoren Wasser und Energie sowie der Biosphäre in Form gerichteter Graphen. Sie helfen dabei die beteiligten Akteure für den komplexen Problemkontext zu sensibilisieren und machen die Dynamik zwischen Sektoren und Nachhaltigkeitsdimensionen durch grafisch dargestellte Rückkopplungsschleifen nachvollziehbar.

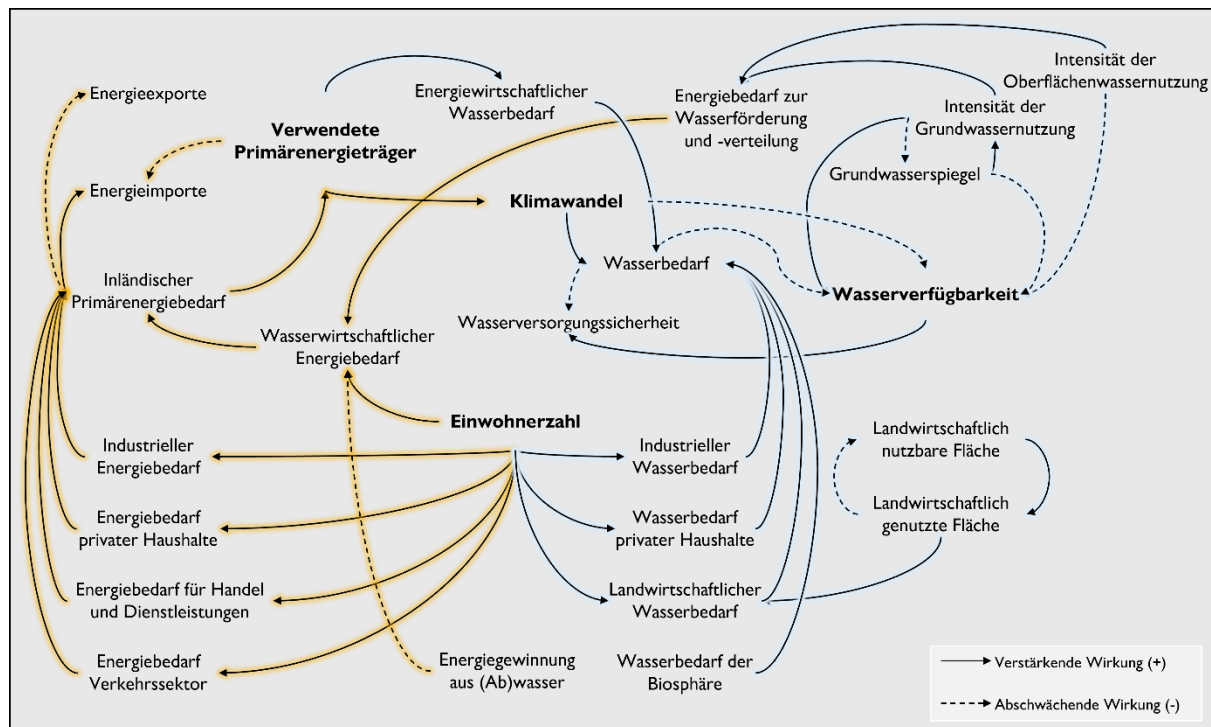


Abbildung 5.2: Ursache-Wirkungs-Diagramm des Entscheidungsproblems

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Sterman (2000), Ravar et al. (2020)

Das in Abbildung 5.2 dargestellte CLD visualisiert die identifizierten intersektoralen Beziehungen des betrachteten Entscheidungsproblems. Es erfasst einerseits zentrale energiewirtschaftliche Variablen und deren kausale Wirkungsbeziehungen (gelb schattierte Kanten) sowie wasserwirtschaftliche Zusammenhänge (blau schattierte Kanten). Durchgängig dargestellte Linien zeigen eine positive Polarität an und punktierte Linien eine negative, da z. B. eine intensivere Grund- und Oberflächenwassernutzung zu abnehmender Verfügbarkeit der natürlichen Wasserressourcen führt und zugleich der wasserwirtschaftliche Energiebedarf aufgrund der erhöhten Fördervolumina steigt. Die als kritisch identifizierten Variablen sind fett gedruckt dargestellt. Sie sind die zentralen Treiber unausgewogener Rückkopplungsstrukturen und beeinflussen die systemischen Entwicklungen daher in besonderem Maße. Im betrachteten Problem wurde die Rückkopplungsstruktur zwischen der steigenden Einwohnerzahl, dem voranschreitendem Klimawandel und den damit verbundenen wasser- und energiewirtschaftlichen Implikationen als besonders kritisch identifiziert. Die Identifikation dieser Rückkopplungsstrukturen und kritischen Variablen hilft bei der Ausgestaltung der weiteren Verfahrensschritte der MCDA.

Auf wasserwirtschaftlicher Seite sind die Folgen des Klimawandels und der steigende Wasserbedarf durch Bevölkerungswachstum in allen Nachfragesektoren (Industrie, Haushalte, Landwirtschaft, Wasserbedarf zur Erhaltung der Biosphäre) kritische Variablen. Sie sind durch wasser- und energiewirtschaftliche Maßnahmen nicht direkt beeinflussbar, stellen aber aufgrund ihrer verstärkenden Dynamik zentrale Planungsunsicherheiten dar. Die Entwicklung dieser Variablen leitet somit die Erstellung von Szenarien und die Entwicklung von Alternativen. Auf energiewirtschaftlicher Seite führt das Bevölkerungswachstum analog zu insgesamt steigendem Energiebedarf und der Gefahr den Klimawandel

durch Verwendung fossiler Energieträger weiter zu beschleunigen. Für das betrachtete Entscheidungsproblem ergibt sich daher aus Sicht des WEN daher der Ansatzpunkt, die Energieversorgung der zu entwickelnden Wasserinfrastrukturmaßnahmen zu berücksichtigen und dies explizit in der MCDA über Ziele und Bewertungskriterien abzubilden.

5.2.2 Zielermittlung und Erstellung von Kriterienhierarchien

Für die Bewertung von Alternativen müssen die Ziele der Entscheidungstragenden und beteiligten Interessensgruppen ermittelt werden. Eine Operationalisierung zunächst abstrakt formulierter Ziele ist durch deren Organisation in Form einer Kriterienhierarchie möglich. Auf der untersten Hierarchieebene der Kriterienhierarchie sind schließlich alle von den Entscheidungstragenden als relevant angesehen Kriterien aufgeführt. Kriterien bewerten die Alternativen im Hinblick auf die Erfüllung der einzelnen Zieldimensionen und tragen so zu deren Differenzierung unter Mehrfachzielsetzung bei (vgl. Abschnitt 3.3.2.2). Bei mehreren Beteiligten kann eine umfassende Diskussion der Entscheidungsziele und -kriterien mit allen Entscheidern auch dazu beitragen, ein gemeinsames Verständnis des Entscheidungsproblems zu fördern und den Entscheidungstragenden helfen, ihre Ziele zu erkunden und zu reflektieren (Salo und Hämäläinen 2010). Dies ist die Grundlage für ein möglichst rationales Entscheidungsverhalten.

Da das verwendete MCDA Verfahren auf der MAMCA basiert, kann jedem Akteur in der MCDA die Möglichkeit geboten werden, ein separates Zielsystem und Präferenzmodell zu erstellen. Um der transnationalen Struktur der beteiligten Interessensgruppen und den möglicherweise pluralen Interessen zu begegnen, wurde für das gesamte Entscheidungsproblem die Menge der Akteure

$$S = \{S_1, S_2, S_3\} = \{Israel, Jordanien, Palästina\}$$

definiert (vgl. Abschnitt 3.5.2). Aus der Festlegung des Entscheidungskontextes (Abschnitt 5.2.1) ergeben sich zudem drei wesentliche Entscheidungsfelder:

- Infrastrukturkonzepte zur MWE am Mittelmeer und am Roten Meer
- Konzepte für grenzüberschreitende Wasserbewirtschaftungsinfrastruktur
- Abwasserbewirtschaftungskonzepte für Jordanien und das Westjordanland

Tabelle 5.3: Erstellte Kriterienhierarchien und einbezogene Akteure

		Entscheidungsfeld		
		Meerwasserentsalzung am Mittelmeer und am Roten Meer	Grenzüberschreitende Wasserbewirtschaftungsinfrastruktur	Abwasserbewirtschaftungskonzepte für Jordanien und das Westjordanland
Akteur	Israel	X	X	
	Palästina		X	X
	Jordanien	X	X	X

Quelle: Eigene Darstellung

Für jedes der drei Entscheidungsfelder wurden mehrere Zielsysteme aufgestellt, eines für jeden Akteur (Tabelle 5.3). Die Kriterienhierarchien visualisieren und operationalisieren somit jeweils die Ziele der palästinensischen, jordanischen und israelischen Entscheidungstragenden für die betrachteten Entscheidungsfelder.

5.2.2.1 Methode und Vorgehen

Das Verfahren zur Ermittlung der Kriterienhierarchien innerhalb der Entscheidungsfelder wurde angesichts der Komplexität des Problems und der möglichen Maßnahmen sowie der Vielzahl der beteiligten Akteure in **drei Schritte** unterteilt.

Im **ersten Schritt** wurden Vorschläge möglicher Kriterienhierarchien erstellt. Die Strukturierung der Kriterienhierarchien orientiert sich am Konzept der nachhaltigen Entwicklung, wie in der Agenda 21 definiert. Das Oberziel wird daher auf der ersten Ebene in umweltbezogene, ökonomische und soziale Kriterien unterteilt. Da es sich bei den Alternativen hauptsächlich um wasser- und energiewirtschaftliche Infrastrukturkonzepte sowie technische Lösungen mit grenzübergreifendem Charakter handelt, werden technische und politische Ziele explizit einbezogen, um die Alternativen zu charakterisieren und ihre Kompatibilität mit bestehenden politischen Agenden zu beurteilen. Zur Erstellung einer Liste möglicher Kriterien für jede Zieldimension wurden die SDGs der Agenda 2030 (vgl. Abschnitt 2.1) und Angaben aus der Literatur zu vergleichbaren Projekten herangezogen. Ebenso wurden für jedes Kriterium Maßeinheiten, Skalenniveau und Polarität festgelegt.

Im **zweiten Schritt** wurden die entworfenen Kriterienhierarchien mit den technischen Experten der deutschen Projektpartner RWC, STEP, DI, UFZ und KIT (s. Tabelle 5.1) bilateral besprochen und iterativ angepasst. Das Ergebnis dieses Schrittes umfasst für jedes Entscheidungsfeld eine vorläufige Kriterienhierarchie mit einer schriftlichen Erläuterung jedes Kriteriums. Die Erläuterungen der Kriterien wurden so formuliert, dass sie einem möglichst breiten Personenkreis verständlich sind.

Im **dritten Schritt** wurden schließlich über hybride Workshops, d. h. in Präsenz und Online, die Projektpartner aus Israel, Jordanien und Palästina (HSI, EWRE, MWI, ATEEC, JUA, PWA, HEC, PHG) und weitere Interessensgruppen eingebunden. Für Workshops im Online-Format wurden die vorläufigen Kriterienhierarchien und Erläuterungen der Kriterien für eine Online-Umfrage aufbereitet. In den Online-Umfragen wurden Akteure nach den für sie wichtigen Kriterien für das jeweils betrachtete Entscheidungsproblem befragt. Fehlende Kriterien konnten ergänzt und überflüssige aus der Hierarchie entfernt werden. Die Online-Umfrage wurde dann, im Rahmen von Online-Workshops, mit ausgewählten regionalen Projektpartnern, je nach Entscheidungsfeld und Akteur, besprochen. Diese regionalen Projektpartner verteilten die Fragebögen, standen als Ansprechpartner vor Ort zur Verfügung und organisierten Workshops in ihren Organisationen. Ebenfalls wurden die Fragebögen per E-Mail an regionale Interessensgruppen verteilt, um ein breites Spektrum von involvierter Personen einzubeziehen. Die Konsolidierung der Rückläufe aus Fragebögen und Workshops in finalisierte Kriterienhierarchien fand innerhalb des Projektkonsortiums statt.

5.2.2.2 Kriterienhierarchien des Entscheidungsproblems

Die finale Kriterienhierarchie für das Entscheidungsfeld „Meerwasserentsalzung am Mittelmeer und am Roten Meer“ und den Akteur Israel ist exemplarisch in Abbildung 5.3 aufgezeigt. Zusätzlich sind die Maßeinheiten und gewünschten Polaritäten der Kriterien angegeben. Insgesamt wurden die im zweiten Schritt entworfenen Kriterienhierarchien von den unterschiedlichen Akteuren weitestgehend unverändert akzeptiert, so dass sich zwischen den Akteuren wenig Unterschiede ergeben. Etwaige Unterschiede werden in den finalisierten Entscheidungstabellen (Abschnitt 5.3.2) aufgezeigt.

Meerwasserentsalzung am Mittelmeer und dem Roten Meer		
Technisch	Maßeinheit	Polarität
Anlagenverfügbarkeit	[h/a]	↑
Energiebedarf	[kWh/m ³]	↓
Komplexität des Entsalzungsverfahrens	[Punkte]	↓
Personalbedarf	[Anzahl]	↓
Anforderungen an Qualifikation und Ausbildung des Personals	[Punkte]	↓
Ökonomisch		
Spezifische Wasserkosten	[USD/m ³]	↓
Investitionsbedarf	[USD/(m ³ /d)]	↓
Sozial		
Flächenbedarf	[m ² /(m ³ /d)]	↓
Autarkiegrad	[%]	↑
Umweltbezogen		
Auswirkungen auf marines Ökosystem	[Punkte]	↓
Umweltwirkung durch Anlagenbau	[Punkte]	↓
Spezifische CO ₂ Emissionen	[kg CO ₂ e/m ³]	↓
Politisch		
Kohärenz mit bestehenden politischen Vorhaben	[Likert, 1 – 7]	↑

Abbildung 5.3: Kriterienhierarchie Meerwasserentsalzung am Mittelmeer und am Roten Meer

Quelle: Eigene Darstellung

Die Kriterienhierarchie, auf die sich im Projektkonsortium nach Konsolidierung der Ergebnisse aus Workshops und Fragebögen geeinigt wurde, beinhaltet auf letzter Ebene insgesamt 13 Kriterien. Die Beschreibungen der Kriterien, wie sie auch in den Online-Umfragen und Workshops verwendet wurden, sind in Tabelle 5.4 aufgeführt. Die Beschreibungen, Maßeinheiten und Polaritäten der Kriterien für die Entscheidungsfelder „Grenzüberschreitende Wasserbewirtschaftungsinfrastruktur“ und „Abwasserbewirtschaftungskonzepte für Jordanien und das Westjordanland“ sind in Tabelle 5.5 und Tabelle 5.6 aufgeführt.

Die Akteure wurden innerhalb der Workshops für die Anforderungen an die Erstellung Kriterienhierarchie und mögliche Verzerrungseffekte sensibilisiert (vgl. Abschnitt 3.3.2.2). So wurde versucht, eine möglichst symmetrische und flache Kriterienhierarchie zu erstellen, die auf letzter Ebene eine prägnante Auswahl von Kriterien beinhaltet. Die Gewichtung der Kriterien wurde ebenfalls im Rahmen der hybriden Workshops und Online-Umfragen ermittelt. Das Vorgehen hierzu wird in Abschnitt 5.3.1 zum Verfahrensschritt der Präferenzhebung aufgezeigt. Im Zuge der Präferenzhebung wurde von den Entscheidungstragenden der Wunsch akteurspezifischer Kriteriengewichten verdeutlicht, weshalb auf eine Konsolidierung von ähnlichen Kriterienhierarchien zwischen den Akteuren zu einer gemeinsamen Kriterienhierarchie verzichtet wurde.

Tabelle 5.4: Beschreibung der Kriterien für die Meerwasserentsalzung

Technisch	Anlagenverfügbarkeit: Die Anlagenverfügbarkeit beschreibt die zeitliche Verfügbarkeit der Anlage bei voller Kapazitätsauslastung (Volllastbetriebsstunden).
	Energiebedarf: Thermische Entsalzungstechnologien, wie z. B. die Multi-Effekt-Destillation, benötigen elektrische Energie und Dampf für die Produktion von Süßwasser aus Meerwasser, während membranbasierte Technologien wie die Umkehrosmose elektrische Energie für den Betrieb von Hochdruckpumpen benötigen.
	Komplexität des Entsalzungsverfahrens: Die Salinität des Zulaufwassers, die Temperaturschwankungen und andere Charakteristika können variieren und eine komplexere Verfahrensgestaltung erfordern, da zusätzliche Aufbereitungsprozesse notwendig sind. Darüber hinaus kann das Anlagenkonzept (z. B. Bau an Land oder als Insellösung) oder die gewählte Energieverstechnologie die Gesamtkomplexität einer Alternative beeinflussen.
	Personalbedarf: Angesichts der Entsalzungskapazität, die in der Region in naher Zukunft zu installieren ist, muss die Verfügbarkeit von qualifiziertem und für die jeweilige Aufgabe ausreichend ausgebildetem Personal gewährleistet sein. Auch die Größe einer Anlage hinsichtlich der Entsalzungskapazität kann die Personalstruktur beeinflussen.
	Anforderungen an Qualifikation und Ausbildung des Personals: Die technische Komplexität von Meerwasserentsalzanlagen erfordert ein hohes Maß an chemischem und physikalischem Fachwissen. Außerdem variiert die benötigte Ausbildung für Management-, Wartungs-, Labor- und Aufsichtspersonal je nach gewählter Entsalzungstechnologie.
Ökonomisch	Spezifische Wasserkosten: Kosten pro Kubikmeter entsalztes Wasser, das von einer Anlage produziert wird. Die spezifischen Wasserkosten umfassen die jährlichen investitionsabhängigen Kosten (Abschreibungen, Zinsen, Wartung, Versicherung, Steuern) über die technische Lebensdauer der Anlagen und ihrer Nebeneinrichtungen. Die Fixkosten für das erforderliche Personal werden auf jährlicher Basis berücksichtigt. Die variablen Kosten umfassen den Material- und Energieverbrauch. Die Summe der jährlichen Betriebskosten wird durch die jährliche Kapazität der Anlage dividiert, um die spezifischen Wasserkosten zu berechnen.
	Investitionsbedarf: Der gesamte Investitionsbedarf wird durch die Planungs-, Bau- und Installationskosten einer Anlage bestimmt. Die Kosten für die Erschließung des Standorts sind ebenfalls enthalten. Darüber hinaus sind die Kosten für Ingenieurdienstleistungen, Unvorhergesehenes, Steuern und Abgaben enthalten.
Sozial	Flächenbedarf: Fläche, die von der Meerwasserentsalzanlage und den Nebengebäuden beansprucht und versiegelt wird.
	Autarkiegrad: Anteil des Energiebedarfs, der von eigenen Kraftwerken in der Nähe der Anlage zur Verfügung gestellt wird. Dies ermöglicht eine unabhängigere Stromversorgung bei höherer Kostensicherheit und reduziert potenzielle negative Auswirkungen auf das Stromversorgungsnetz.
Umweltbezogen	Auswirkungen auf marines Ökosystem: Sole ist das Hauptprodukt der MWE. Sie macht mindestens die Hälfte des gesamten Eingangswassers aus. Der Salzgehalt der Sole beträgt in der Regel mehr als 60 Gramm NaCl pro Liter und ist damit doppelt so hoch wie der Salzgehalt des Meerwassers. Normalerweise wird die Sole in einiger Entfernung von der Anlage unter Druck ins Meer geleitet, um eine zu hohe lokale Konzentration zu vermeiden. Wenn jedoch die Turbulenzen bei der Einleitung der Sole in das Meer zu gering sind oder der Dichteunterschied zwischen Sole und Meerwasser zu groß ist, kann sich die Sole auf dem Meeresboden ausbreiten und die dortige Vegetation schädigen. In einigen Küstengebieten gibt es zudem Pflanzen und Tiere, die empfindlich auf eine zu hohe Salzkonzentration reagieren.
	Umweltwirkungen durch Anlagenbau: Für den Bau von Meerwasserentsalzanlagen in Küstennähe stehen am Mittelmeer dem Golf von Akaba nur sehr begrenzt Flächen zur Verfügung. Die Landnutzung für die MWE konkurriert zudem mit touristischen Zwecken und Naturschutzbestrebungen.
	Spezifische CO₂ Emissionen: Der Prozess der MWE erfordert einen erheblichen Energieaufwand. Dieser Bedarf wird häufig durch Brennstoffe aus fossilen Quellen wie Erdgas oder Erdöl gedeckt. Der größte Teil des Treibhauspotenzials (Global Warming Potential, GWP) einer Anlage wird daher durch den Betrieb während der Nutzungsphase verursacht und nicht durch die Rohstoffe, den Bau oder ihren Rückbau. Diese Klimawirkung wird allgemein in CO ₂ -Äquivalenten Einheiten (CO ₂ eq.) pro Kubikmeter entsalztem Wasser ausgedrückt.
Politisch	Kohärenz mit bestehenden politischen Vorhaben: Kohärenz mit bestehenden politischen Plänen zum Ausbau der Wasserinfrastruktur. Dies schließt die Wahrscheinlichkeit ein, die erforderlichen Baugenehmigungen für die vorgeschlagenen Infrastrukturmaßnahmen zu erhalten.

Tabelle 5.5: Kriterien für grenzüberschreitende Wasserbewirtschaftungsinfrastruktur

	Beschreibung	Maßeinheit	Polarität
Technisch	Zuverlässigkeit: Wahrscheinlichkeit eines technischen Ausfalls während des Betriebs. Längere Wassertransfersysteme benötigen proportional mehr Zeit für die Installation und sind anfälliger für Störungen. Daher wird die Gesamtlänge aller in einer Alternative vorgesehenen Wassertransportleitungen als Indikator verwendet.	[km]	↓
	Technischer Aufwand: Realisierbarkeit einer Alternative mit geringem technischem Aufwand. Der technische Aufwand kann durch Planung von Wassertransferrou-ten nahe bestehender Straßen und Stromleitungen verringert werden.	[Likert, 1 – 7]	↑
	Anbindung an bestehende Wasserinfrastruktur: Je nach Trassierung des geplanten Transfersystems kann die bestehende Wasserinfrastruktur ohne zusätzlichen Aufwand genutzt werden.	[Likert, 1 – 7]	↑
Ökonomisch	Spezifische Wasserkosten: Kosten pro Kubikmeter entsalztes Wasser, das von einer Anlage produziert und zu einem gegebenen Nachfragepunkt gefördert wird. Die spezifischen Wasserkosten umfassen die jährlichen investitionsabhängigen Kosten (Abschreibungen, Zinsen, Wartung, Versicherung, Steuern) über die technische Lebensdauer der Anlagen, Transfersysteme und ihrer Nebeneinrichtungen. Die Fixkosten für das erforderliche Personal werden auf jährlicher Basis berücksichtigt. Die variablen Kosten umfassen den Material- und Energieverbrauch. Die Summe der jährlichen Betriebskosten wird durch die jährliche Kapazität der Alternative dividiert, um die spezifischen Wasserkosten zu berechnen.	[USD/m ³]	↓
	Investitionsbedarf: Der gesamte Investitionsbedarf wird durch die Planungs-, Bau und Installationskosten zu errichtender Wasserinfrastruktur bestimmt. Die Kosten für die Erschließung von Standorten sind ebenfalls enthalten. Darüber hinaus sind die Kosten für Ingenieurdienstleistungen, Unvorhergesehenes, Steuern und Abgaben enthalten.	[USD]	↓
Sozial	Beitrag zur ökonomischen Entwicklung der Region: Bedeutung einer Alternative für die wirtschaftliche Entwicklung der Region. Die Bedeutung hängt für die verschiedenen Akteure davon ab, wo die Meerwasserentsalzungsanlagen geplant werden und wie die Transferinfrastruktur trassiert wird.	[Likert, 1 – 7]	↑
	Gesellschaftliche Akzeptanz: Akzeptanz einer Alternative durch die Bevölkerung. Dies betrifft insbesondere die Standorte von Infrastrukturkomponenten (Entsalzungsanlagen und trassierte Transferrou-ten), die je nach Standort auf Bedenken der lokalen Bevölkerung stoßen können (z. B. wegen der Nähe zu Naturschutzgebieten, Wohngebieten oder wegen der Durchquerung bestimmter Städte oder Gegenden)..	[Likert, 1 – 7]	↑

	Beschreibung	Maßeinheit	Polarität
Umweltbezogen	Spezifische CO₂ Emissionen: Der Prozess der MWE und dessen anschließende Förderung erfordert einen erheblichen Energieaufwand. Dieser Bedarf wird häufig durch Brennstoffe aus fossilen Quellen wie Erdgas oder Erdöl gedeckt. Der größte Teil des Treibhauspotenzials (Global Warming Potential, GWP) wird daher durch den Betrieb von Infrastruktur verursacht und nicht durch die Rohstoffe, den Bau oder ihren Rückbau. Diese Klimawirkung wird allgemein in CO ₂ -Äquivalenten Einheiten (CO ₂ eq.) pro Kubikmeter entsalztem und transferierten Wasser ausgedrückt.	[kg CO ₂ e/m ³]	↓
	Weitere negative Umweltwirkungen: Die Risiken der Verunreinigung von Oberflächen- und Grundwasser durch Entsalzungsanlagen und die Auswirkungen auf die natürlichen Wasserträger in der Region. Leckagen in der Transferinfrastruktur können zudem die Verfügbarkeit von Süßwasser temporär einschränken.	[Punkte]	↓
Politisch	Kohärenz mit bestehenden politischen Vorhaben: Kohärenz mit den bereits geplanten Vorhaben der Regierung und die Wahrscheinlichkeit, finanzielle Unterstützung von internationalen Geldgebern für eine Alternative zu erhalten. Darüber hinaus umfasst dieses Kriterium auch administrative Aspekte wie die Wahrscheinlichkeit, Genehmigungen für den Bau von Wasserinfrastruktur zu erhalten (Entsalzungsanlagen oder Transferinfrastruktur).	[Likert, 1 – 7]	↑
	Unabhängigkeit der Wasserversorgung und Wasserversorgungssicherheit: Grad der Unabhängigkeit und Sicherheit der Wasserversorgung, z. B. durch die Sicherung von Wassernutzungsrechten. Dieses Kriterium wird vor allem durch den Standort der Entsalzungsanlagen und die damit verbundene Rechte an den entsalzten Süßwasservolumina, aber auch der Trassierung von Transferinfrastruktur beeinflusst.	[Likert, 1 – 7]	↑

Quellen: Rusteberg et al. (2022a), Scheday und Zarzar (2022b), Yüce und Janowitz (2022a), MWI (2023)

Tabelle 5.6: Abwasserbewirtschaftungskonzepte für Jordanien und das Westjordanland

	Beschreibung	Maßeinheit	Polarität
Technisch	Systemflexibilität: Die Flexibilität, die geplante Abwasserinfrastruktur sukzessive zu erweitern oder zurückzubauen, ohne das bestehende System dabei zu stark zu beeinträchtigen.	[Likert, 1 – 7]	↑
	Kapazität: Es ist wichtig sicherzustellen, dass ein Abwasseraufbereitungssystem in der Lage ist, das anfallende Abwasser effizient zu behandeln, um Umweltauflagen und Gesundheitsstandards einzuhalten. Die Kapazität muss dem Bedarf gerecht werden, um eine angemessene Abwasseraufbereitung und -entsorgung zu gewährleisten. Sie hängt von Faktoren wie der Bevölkerungsdichte des versorgten Gebiets, dem Abwasservolumen, den Umweltauflagen und der technischen Auslegung des Systems ab. Die Kapazität kann auch durch Erweiterungen oder Upgrades erhöht werden, um den zukünftigen Bedürfnissen gerecht zu werden.	[$m^3 \cdot 10^6/a$]	↑
	Auslastungsgrad: Der mittlere Auslastungsgrad ist das Verhältnis zwischen der jährlich behandelten Abwassermenge und der Kapazität des Abwasserbehandlungssystems.	[%]	↑
	Länge der Rohabwasserhauptleitung: Hauptleitung, welche Rohabwasser von verschiedenen Quellen oder Sammelpunkten zur Abwasseraufbereitungsanlage transportiert, wo es dann behandelt und gereinigt wird.	[km]	↓
	Länge der Transportleitung für aufbereitetes Abwasser: Leitungssystem, das dazu dient, das bereits behandelte und gereinigte Abwasser aus einer Abwasseraufbereitungsanlage an einen anderen Ort zu transportieren. Dies kann der Fall sein, wenn das gereinigte Abwasser in einen Fluss, See oder Ozean abgeleitet wird oder für bestimmte landwirtschaftliche oder industrielle Zwecke wiederverwendet wird.	[km]	↓
	Technische Komplexität: Die technische Komplexität von zentralen und dezentralen Abwasseraufbereitungssystemen hängt von verschiedenen Faktoren ab. Zentrale Systeme sind in der Regel größer und haben eine höhere Kapazität, um eine große Bevölkerung zu bedienen. Dies kann zu technischer Komplexität in Bezug auf die Skalierung und Steuerung des Systems führen. Dezentrale Systeme können technisch komplex sein, da sie, je nach Art der Abwasserbehandlung (z. B. Kleinkläranlagen, biologische Filtersysteme, Pflanzenkläranlagen), verschiedene Technologien und Ansätze erfordern.	[Punkte]	↑
Ökonomisch	Zuverlässigkeit: Die Zuverlässigkeit von Abwassersystemen wird von Faktoren wie Systemgröße, Topographie, Umweltauflagen und Bevölkerungsdichte beeinflusst. Zentrale Abwasseraufbereitungssysteme können von gut ausgebildetem Personal überwacht und gewartet werden, was die Zuverlässigkeit erhöht, sind aber auch anfälliger für Störungen, da ein einziger Ausfall das gesamte System betreffen kann. Dezentrale Abwasseraufbereitungssysteme verringern das Risiko, dass ein Systemausfall eine große Bevölkerung betrifft. Ihre Zuverlässigkeit hängt jedoch stark von der ordnungsgemäßen Installation und Wartung durch die Eigentümer ab.	[Punkte]	↑
	Spezifische Behandlungskosten: Kosten für die Aufbereitung einer bestimmten Abwassermenge zu Süßwasserqualität. Die Aufbereitungskosten umfassen die jährlichen investitionsabhängigen Kosten (Abschreibungen, Zinsen, Wartung, Versicherung, Steuern) über die technische Lebensdauer der Anlagen und ihrer Nebeneinrichtungen. Die Fixkosten für das erforderliche Personal werden auf jährlicher Basis berücksichtigt. Die variablen Kosten umfassen den Material- und Energieverbrauch.	[JOD/ m^3]	↓

	Beschreibung	Maßeinheit	Polarität
	Spezifische Transferkosten für Rohabwasser: Die spezifischen Transferkosten für Rohabwasser beziehen sich auf die Kosten, die pro Einheit anfallen, um Rohabwasser von seiner Quelle zur Aufbereitungsanlage zu transferieren. Diese Kosten umfassen die Aufwendungen für den Bau, die Wartung und den Betrieb der erforderlichen Infrastruktur und Anlagen, um das Rohabwasser zu transportieren, ohne dabei die eigentliche Abwasserbehandlung oder -reinigung zu berücksichtigen. Es handelt sich also um die Kosten, die speziell für den Transport von unbehandeltem Abwasser entstehen, bevor es einer weiteren Aufbereitung unterzogen wird.	[JOD/m ³]	↓
	Spezifische Transferkosten für aufbereitetes Abwasser: Die spezifischen Transferkosten für aufbereitetes Abwasser beziehen sich auf die Kosten, die pro Einheit anfallen, um bereits behandeltes und gereinigtes Abwasser von einer Kläranlage oder einem anderen Behandlungsort zu einem weiteren Verwendungsort (z. B. Industrie, Landwirtschaft oder natürliche Wasserträger) zu transportieren.	[JOD/m ³]	↓
	Investitionsbedarf: Der gesamte Investitionsbedarf wird durch die Planungs-, Bau und Installationskosten der Infrastrukturmaßnahmen bestimmt. Die Kosten für die Erschließung von Standorten sind ebenfalls enthalten. Darüber hinaus sind die Kosten für Ingenieurdienstleistungen, Unvorhergesehenes, Steuern und Abgaben enthalten.	[JOD · 10 ⁶]	↓
Sozial	Anschlussgrad: Prozentsatz der Bevölkerung, die an das Abwassersystem angeschlossen sind und ihre Abwässer über dieses System ableiten. Ein hoher Anschlussgrad bedeutet, dass ein großer Teil der Bevölkerung Zugang zu einem Abwassernetzwerk hat und seine Abwässer in dieses System einleitet.	[%]	↑
	Nutzbare Wasser für landwirtschaftliche Bewässerung: Das Ausmaß, in welchem aufbereitetes Abwasser den Bewässerungsbedarf von landwirtschaftlichen Flächen erfüllen kann. Aufbereitetes Abwasser für die landwirtschaftliche Bewässerung wurde von Schadstoffen und Verschmutzungen gereinigt und entspricht den qualitativen Anforderungen der Landwirtschaft. Es kann für die Bewässerung verwendet werden, um den Einsatz von Frischwasserressourcen zu reduzieren und so die Umweltauswirkungen von landwirtschaftlichen Bewässerungspraktiken reduzieren.	[%]	↑
	Gesellschaftliche Akzeptanz: Akzeptanz einer Alternative durch die Bevölkerung. Dies betrifft insbesondere die Standorte von Infrastrukturkomponenten, die je nach Standort auf Bedenken der lokalen Bevölkerung stoßen können und die Anliegen weiterer Interessensgruppen, wie z. B. Landwirtschaftsverbände.	[Likert, 1 – 7]	↑
Umweltbezogen	Flächenbedarf: Der Flächenbedarf von Abwasserinfrastruktursystemen für die verschiedenen Komponenten eines Abwassersystems. Diese Fläche kann für verschiedene Zwecke erforderlich sein, einschließlich dem Bau von Klärwerken, Abwassersammelleitungen, Pumpstationen und anderen Einrichtungen zur Abwasserbehandlung und -entsorgung. Der Flächenbedarf wird zu dieser frühen Planungsphase über eine Bewertung in Punkten approximiert.	[Punkte]	↓
	Umweltwirkungen durch Abwassereinleitung: Abwasser wird üblicherweise durch Kanalisationssysteme zu Aufbereitungsanlagen transportiert. Es können jedoch insbesondere bei zentralen Aufbereitungssystemen verschiedene Umstände und Probleme auftreten, die dazu führen, dass Abwasser aus dem System austritt und die Umwelt schädigt (z. B. Überlaufereignisse, Leckagen, Systemausfälle).	[Punkte]	↓
	Positive Effekte auf Ökosysteme in Wadis: Die Wadis in Jordanien sind trockene Flussbetten oder Schluchten, die in der Regel saisonal oder episodisch Wasser führen. Abwassersysteme können in Jordanien, insbesondere in Wadi-Gebieten, zur Schonung lokal begrenzter Wasserressourcen, zur Vermeidung von Wadi-Verschmutzung und zur Anpassung an saisonale Bedingungen beitragen.	[Punkte]	↑

	Beschreibung	Maßeinheit	Polarität
Politisch	Politische Akzeptanz: Bezieht sich auf die Zustimmung und Unterstützung seitens politischer Institutionen und entscheidungstragender Gremien für die Planung, Implementierung und den Betrieb von Infrastruktur und Bewirtschaftungsvarianten. Diese Unterstützung ist entscheidend für die Allokation von Ressourcen, die Schaffung von Regulierungen und die Festlegung politischer Prioritäten im Bereich der Abwasserbewirtschaftung.	[Likert, 1 – 7]	↑
	Kohärenz mit bestehenden politischen Vorhaben: Kohärenz mit bereits bestehenden politischen Vorhaben, wie z. B. der nationalen Wasserstrategie Jordaniens.	[Likert, 1 – 7]	↑
	Abhängigkeit von Baugenehmigungen: Je nach gewähltem Systemansatz, zentral oder dezentral, unterscheidet sich der Aufwand zur Einholung von Baugenehmigungen und die Wahrscheinlichkeit diese in der beabsichtigten Zeit zu erhalten.	[Likert, 1 – 7]	↓
	Kohärenz mit bestehenden Finanzierungszusagen: Eine Reihe von Vorhaben in der Abwasserbewirtschaftung sind bereits projektiert und von externen Geldgebern finanziert. Dabei wird in der Region verstärkt auf eine Beteiligung von privatwirtschaftlichen Geldgebern gesetzt. Weitere Maßnahmen sollten daher kompatibel zu bestehenden privatwirtschaftlichen Vorhaben gestaltet sein.	[Likert, 1 – 7]	↑

Quellen: Khurelbaatar et al. (2022), Xanke et al. (2022a), PWA (2013), MWI (2023)

5.2.3 Entwicklung von Handlungsmaßnahmen

Wasser- und energiewirtschaftliche Infrastruktur wird in der Regel viele Jahre genutzt (Beutler und Lienert 2020). Sie muss daher so konzipiert sein, dass sie auch zukünftige Anforderungen erfüllen kann. Im hier vorliegenden Entscheidungsproblem sind Handlungsmaßnahmen zu entwickeln, welche die in Jordanien und Palästina erwarteten Süßwasserdefizite bis in das Jahr 2050 decken können. Zugleich sind komplementäre Abwasserbewirtschaftungsstrategien notwendig, die von der zur Verfügung stehenden Infrastruktur abhängen. Jedoch sind weder die zukünftigen Süßwasserdefizite vollständig bekannt, noch besteht vollkommene Klarheit über die zur Verfügung stehenden Handlungsmaßnahmen und deren Konsequenzen – es besteht Unsicherheit. Bei Umgang mit dieser Art der Unsicherheit (French 1995) hilft es, in Szenarien zu denken (Scholten et al. 2015).

In der vorliegenden Fallstudie wurden drei Szenarien untersucht, die mögliche Entwicklungen des zukünftigen Wasserdefizits in der Region beschreiben. Sie basieren auf zukünftigen sozio-ökonomischen Entwicklungen und der Verfügbarkeit natürlicher Wasserträger. Diese sind Treiber des Wasserdefizits und wurden über Ursache-Wirkungs-Diagramme (Abschnitt 5.2.1.2) und ergänzende Literaturstudien identifiziert. So wurden in der Szenarioerstellung mögliche Entwicklungen des zukünftigen Wasserbedarfs von Haushalten und Landwirtschaft, mögliche Bevölkerungsentwicklungen und die Verfügbarkeit natürlicher Wasserressourcen unter Berücksichtigung der Auswirkungen des Klimawandels betrachtet. Jedes der drei Szenarien quantifiziert ein zu erwartendes Süßwasserdefizitprofil für Jordanien und die palästinensischen Autonomiegebiete bis in das Jahr 2050 in fünfjähriger zeitlicher Auflösung. Die Szenarien charakterisieren somit die Anforderungen an zu entwickelnde Infrastruktur- und Bewirtschaftungskonzepte und bilden die Grundlage zur Entwicklung von Alternativen. Konkret wurden so Alternativen

- zur Meerwasserentsalzung am Mittelmeer und am Roten Meer (Kurzbezeichnung: seawater desalination, SWD),
- für Abwasserbewirtschaftungskonzepte in Jordanien und dem Westjordanland (Kurzbezeichnung: wastewater treatment, WWT) und für
- grenzüberschreitende Wasserbewirtschaftungsinfrastruktur (Kurzbezeichnung: water production and transfer options, WPTO) entwickelt.

Zur Entwicklung dieser Alternativen wurde die Szenarioplanung zudem mit Strategietabellen verknüpft, was sich in der MCDA als nützliche Kombination erwiesen hat, um kreatives Denken anzuregen und eine zu enge Orientierung am Status quo durch Verharren in konventionellen Denkmustern zu vermeiden (Lienert et al. 2015).

5.2.3.1 Erstellung von Wasserdefizitszenarien

Der primäre Einsatzzweck der Szenarioplanung in der MCDA besteht darin, zukünftige Entwicklungen systematisch zu untersuchen und in der Modellbildung zu verarbeiten, mit Unsicherheiten umzugehen und neue Alternativen zu entdecken (vgl. z. B. Lienert et al. 2015; Schnaars 1987; Schoemaker 1995). Auch bei den hier erstellten Szenarien ist es nicht das Ziel, möglichst genaue Prognose- und Simulationsmodelle zu erstellen. Aus diesem Grund wurde bewusst auf die Entwicklung von Prognosemodellen oder detaillierte Erhebungen vor Ort verzichtet. Die Datenerhebung basierte hingegen auf einer umfassenden Literaturrecherche und dem Abruf von verfügbaren Daten der zuständigen politischen Institutionen in Jordanien und Palästina, sowie dem Austausch mit den technischen Experten innerhalb des Projektkonsortiums und den Entscheidungstragenden, um kohärente Zukunftsbilder anstelle von

statistischen Prognosen zu entwickeln. Ein Vorgehen zur Erstellung von Wasserdefizitszenarien für den Nahen Osten mittels simulationsbasierter Prognosemodelle findet sich z. B. in Riepl (2014). Eine zusammenfassende Übersicht an Datenquellen zu Fragen des WEN in globaler, nationaler und regionaler Auflösung stellen Purwanto et al. (2021) bereit.

Für das vorliegende Entscheidungsproblem wurden die drei externen Szenarien ζ_1 , ζ_2 und ζ_3 zur Beschreibung möglicher Entwicklungen des Süßwasserdefizits in Jordanien und Palästina bis in das Jahr 2050 definiert (vgl. Abschnitt 4.3.2). Zeitlich sind die Szenarien in fünfjährigen Intervallen skaliert. Für die räumliche Skalierung wurden für Jordanien acht Bedarfsgebiete und für Palästina vier Bedarfsgebiete festgelegt. Die Bedarfsgebiete orientieren sich für Jordanien an den jordanischen Verwaltungsgovernements, und die palästinensischen Territorien im Westjordanland wurden anhand ihrer Topographie in ein nördliches, mittleres und südliches Gebiet unterteilt. Hinzu kommt der Wasserbedarf des Gazastreifens. Abbildung 5.4 zeigt die Gestaltung und Ergebnisse dieser Wasserdefizitszenarien auf. Die Kartendarstellung im rechten Teil der Abbildung stellt dabei die innerhalb von Szenario ζ_1 („Referenzszenario“) erwarteten Süßwasserdefizite des Jahres 2050, vor Implementierung zusätzlicher Handlungsmaßnahmen, dar. Eine rote Färbung zeigt mit zunehmender Farbintensität ein größeres Süßwasserdefizit an, während eine blaue Färbung analog einen zu erwartenden Süßwasserüberschuss anzeigt. Die Szenarien ζ_2 („Hohe Bedarfsentwicklung“) und ζ_3 („Konservative Bedarfsentwicklung“) bilden ebenfalls mögliche Süßwasserdefizitprofile ab, basieren jedoch auf abweichenden Annahmen und Datengrundlagen.

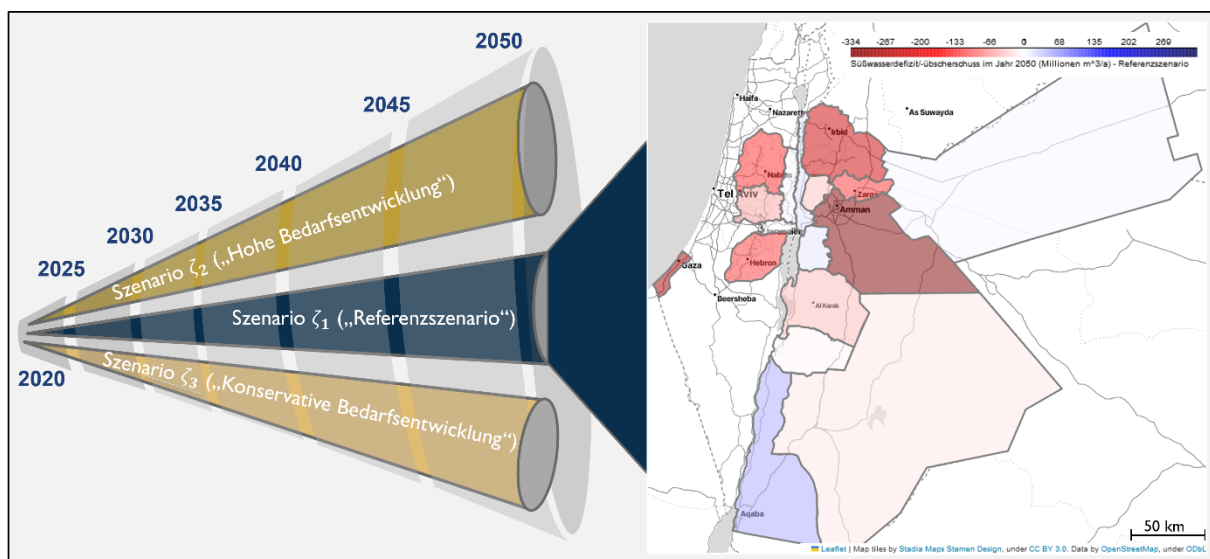


Abbildung 5.4: Externe Szenarien des Fallbeispiels

Quelle: Eigene Darstellung; Kartendaten aus OpenStreetMap (Haklay und Weber 2008)

Die ermittelten Wasserdefizite ergeben sich aus dem verfügbaren Süßwasser in der Region (Grundwasser, Oberflächenwasser und bislang installierte Entsalzungskapazität) unter Berücksichtigung der Nachfrage der Bedarfsgebiete. Die Nachfrage der Bedarfsgebiete setzt sich aus der Nachfrage privater Haushalte, der Industrie sowie der Landwirtschaft zusammen. Das verfügbare Süßwasser sowie die Nachfrage der Sektoren wird dabei wesentlich durch die sozio-ökonomischen und klimabedingten Treibervariablen beeinflusst, wobei die sozioökonomische Entwicklung für Palästina und Jordanien eine wesentlich größere Rolle für die Entwicklung des Wasserbedarfs spielt als die Folgen des Klimawandels (Droogers et al. 2012).

Das Referenzszenario ζ_1 wurde im Rahmen der SALAM-Initiative von Rusteberg et al. (2022a) erstellt. Es folgt einem „*business as usual*“-Ansatz und geht davon aus, dass keine wesentlichen Eingriffe in das Wasserressourcensystem vorgenommen werden. Die zugrundeliegenden Annahmen dieses Szenarios sind in Tabelle 5.7, gemeinsam mit denen für die Szenarien ζ_2 und ζ_3 , aufgeführt. Die aufgezeigte Entwicklung der Annahmen bezieht sich dabei auf den Zeitraum der Jahre 2020–2050. So wird im Referenzszenario ein Anstieg der Einwohnerzahl in Jordanien von 10,8 Millionen Einwohner im Jahr 2020 auf 19 Millionen Einwohner im Jahr 2050 erwartet. Die Szenarien ζ_2 und ζ_3 beschreiben mögliche Extremszenarien und orientieren sich am unteren und oberen Rand der in der Literatur identifizierten Bandbreite von Werten für die Treibervariablen. Für die Einwohnerzahl Jordaniens ergibt sich damit im konservativen Szenario ein erwartetes Bevölkerungswachstum auf 15 Millionen Einwohner im Jahr 2050 und in Szenario ζ_2 wird von bis zu 21 Millionen Einwohnern im Jahr 2050 ausgegangen.

Die Bandbreite des Wasserbedarfs der privaten Haushalte ist an Literaturangaben über die Menge an sauberem Wasser orientiert, die zur Befriedigung der menschlichen Grundbedürfnisse nach Hygiene und Gesundheit als notwendig erachtet wird. Gleick (1996) schlägt einen Wert von 80 Liter pro Person und Tag (engl. liters per capita per day, lcd) vor, während Crouch et al. (2021) 92 lcd als Untergrenze für die Befriedigung der Grundbedürfnisse eines modernen Lebensstils unter Wasserknappheit ansehen (z. B. Gartenbewässerung, Schwimmbäder und Autowaschanlagen sind exkludiert). Dieser Wert wurde für das konservative Szenario ζ_3 gewählt. Da ein Wert von 175 lcd jedoch eine realistischere Annahme für den Wasserbedarf privater Haushalte sei, um sich dem Lebensstandard entwickelter Industrienationen anzunähern (Crouch et al. 2021), wurde dieser Wert dem Szenario ζ_2 zugrunde gelegt. Ein Abgleich der Daten des Referenzszenarios ζ_1 mit weiteren Werten aus der Literatur zeigt, dass diese Werte bereits am oberen Rand der beobachteten Bandbreite angesetzt sind (vgl. PWA 2013; MWI 2023). Sie werden daher für das Szenario ζ_2 nur geringfügig und nur für Jordanien erhöht. Im konservativen Szenario wird davon ausgegangen, dass sich der industrielle Wasserbedarf Palästinas stärker gegenüber dem in Jordanien erhöht, da es in Palästina derzeit keine großen Industrieanlagen (z. B. Chemie- oder Zementwerke) gibt, die große Mengen an Wasser verbrauchen. Ein Anstieg des industriellen Wasserbedarfs von 3 % auf 10 % des Gesamtbedarfs, wie in den Nachbarländern, wird erwartet (PWA 2013). Die nationale Wasserstrategie Jordaniens geht ebenfalls von einem absoluten Anstieg des industriellen Wasserbedarfs aus, welcher relativ gesehen jedoch nahezu konstant bleibt (MWI 2023).

Für Palästina wird im Szenario "Konservative Bedarfsentwicklung" eine kontinuierliche Ausweitung der landwirtschaftlichen Bewässerungsflächen, entsprechend der langfristigen Strategie der Regierung, angenommen (PWA 2013). Im Szenario "Hohe Bedarfsentwicklung" wird eine maximale Nutzbarmachung der potenziellen landwirtschaftlichen Bewässerungsflächen angenommen. Für Jordanien wird hinsichtlich der landwirtschaftlich genutzten Fläche im konservativen Szenario von einer kontinuierlich rückläufigen Entwicklung gemäß des aktuellen Trends ausgegangen. Ziel ist die Umstellung auf ertragreichere landwirtschaftliche Kulturen bei gleichzeitiger Verringerung der Anbaufläche und Erhöhung der Bewässerungseffizienz (MWI 2023). Für das Szenario "Hohe Bedarfsentwicklung" wurde das historische Maximum der vergangenen 20 Jahre zugrunde gelegt (World Bank 2023b). Der landwirtschaftliche Bewässerungsbedarf kann durch die Auswirkungen des Klimawandels, durch Umstellungen der angebauten Kulturen und durch Fortschritte bei der Bewässerungseffizienz konstant bleiben (Szenario ζ_1), zurückgehen (Szenario ζ_3) oder steigen (Szenario ζ_2).

Eine weitere Größe, die die Berechnung des zu deckenden Süßwasserdefizits wesentlich beeinflusst und mit Unsicherheiten behaftet ist, sind die genutzten natürlichen Süßwasserressourcen, wie Grundwas-

serleiter oder Oberflächenwasser. Im konservativen Szenario wird von einer verringerten Nutzungsdichte natürlicher Grundwasserleiter in Gaza und Jordanien ausgegangen (PWA 2013; MWI 2023). Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Verfügbarkeit natürlicher Wasserträger fällt dabei moderat aus, und es werden ergänzende Maßnahmen zur Verringerung physischer Verluste (z. B. aufgrund menschlicher Verunreinigungen, Austritten oder Salzwassereintritt) implementiert (UNDP 2013). Das Szenario „Hohe Nachfrageentwicklung“ ist durch einen stärkeren Einfluss des Klimawandels und drastischere physische Verluste geprägt (MWI 2023; PWA 2013). Im Referenzszenario wird die Erschließung neuer Grundwasserentnahmepunkte im Westjordanland angenommen, wohingegen für Jordanien bis 2050 ein Rückgang der Oberflächen- und Grundwassernutzung um 20 % erwartet wird, um übernutzte Grundwasserleiter zu schonen und der klimabedingt abnehmenden Verfügbarkeit entgegenzuwirken (Rusteberg et al. 2022a).

Auf Grundlage dieser drei externen Szenarien können nun für jedes Szenario kohärente interne Szenarien definiert werden. Die internen Szenarien umfassen Handlungsalternativen aus den in diesem Fallbeispiel betrachteten Entscheidungsfeldern. Da die Wasserdefizite zwischen den externen Szenarien variieren und sich auch die Handlungsmaßnahmen in ihrer Ausgestaltung und den Kriterienausprägungen unterscheiden werden, wurden die Alternativen und resultierenden Entscheidungstabellen für jedes Szenario separat aufgestellt.

Tabelle 5.7: Annahmen und Datengrundlagen zur Erstellung der externen Szenarien

Treiber [Einheit]	Land	Szenario ζ_1 Referenzszenario	Szenario ζ_3 Konservative Bedarfsentwicklung	Szenario ζ_2 Hohe Bedarfsentwicklung	Referenzen
Bevölkerungs- entwicklung [<i>Einwohner</i>]	Palästina	5,1–13,6 Mio.	5,1–8,5 Mio.	5,1–13,6 Mio.	World Bank (2023a), UNFPA (2017), Rusteberg et al. (2022a)
	Jordanien	10,8–19 Mio.	10,8–15 Mio.	10,8–21 Mio.	MWI (2023), Rusteberg et al. (2022a), Yoon et al. (2021)
Wasserbedarf privater Haushalte [<i>lcd</i>] ²¹	Palästina	80–120	80–92	80–175	PCBS (2016), Crouch et al. (2021), Gleick (1996) Rusteberg et al. (2022a)
	Jordanien	95–120	Konstanter Bedarf: 95	95–175	Crouch et al. (2021), Gleick (1996), Rusteberg et al. (2022a)
Industrieller Wasserbedarf [$m^3 \cdot 10^6/a$]	Palästina	bis 18 % des Gesamtbedarfs	3–10 % des Gesamtbedarfs	bis 18 % des Gesamtbedarfs	PWA (2013), PNIPH (2015), Rusteberg et al. (2022a)
	Jordanien	bis 9 % des Gesamtbedarfs	3–4 % des Gesamtbedarfs	bis 10 % des Gesamtbedarfs	UNICEF (2022), MWI (2023), Rusteberg et al. (2022a)
Landwirtschaftlich genutzte Fläche [<i>dunam</i>] ²²	Palästina	0,23 Mio.–0,76 Mio.	Ausweitung: 0,23 Mio.–0,65 Mio.	0,23–0,75 Mio.	PWA (2013), Rusteberg et al. (2022a)
	Jordanien	0,98–1,39 Mio.	Rückläufig: 0,98–0,73 Mio.	0,98–1,18 Mio.	MWI (2023), World Bank (2023b), Rusteberg et al. (2022a)
Landwirtschaftlicher Be- wässerungsbedarf [$m^3/(dunam/a)$]	Palästina	Konstant: 900 (lokale Verlagerungen)	900–704	Zunehmend durch Klimaver- änderung: 900–990	UNDP (2013), PWA (2013), Rusteberg et al. (2022a)
	Jordanien	Konstant: 623 (lokale Verlagerungen)	Rückläufig: 623–591	623–685	Al-Omari et al. (2015), UNDP (2013), Rusteberg et al. (2022a)
Nutzung natürlicher Süß- wasserträger (exkl. Im- port und Entsalzung) [$m^3 \cdot 10^6/a$]	Palästina	Zunehmende Nutzung natür- licher Wasserträger: 188–431	Rückläufig: 188–149	Klimaveränderung und phy- sische Verluste: 188–71	PWA (2013), Rusteberg et al. (2022a)
	Jordanien	Abnehmende Grundwasser- entnahmen: 548–434	Rückläufig: 548–407	548–206	UNDP (2013), MWI (2023), Rusteberg et al. (2022a)

²¹ Liter pro Person und pro Tag (engl. liters per capita per day, lcd)

²² Die Einheit "Dunam" ist eine in Israel, Jordanien und Palästina gebräuchliche Maßeinheit für Flächen. Ein Dunam entspricht 1.000 m² oder 0,1 Hektar.

5.2.3.2 Vorgehen zur Entwicklung von Handlungsalternativen mittels Strategietabellen

Die multikriteriell zu bewertenden Alternativen wurden mithilfe von Strategietabellen entwickelt. Die Verwendung von Strategietabellen innerhalb der MCDA wurde in Abschnitt 3.4.3 vorgestellt. In Abschnitt 4.3.2 wurde die allgemeine Form der Strategietabellen für die Entwicklung von Maßnahmen im Rahmen des in diesem Fallbeispiel angewandten MCDA Verfahrens beschrieben.

Um den Prozess der Entwicklung von Alternativen mittels Strategietabellen zu systematisieren, wurden diese zunächst in die drei zuvor identifizierten Entscheidungsfelder „Meerwasserentsalzung am Mittelmeer und am Roten Meer“, „Grenzüberschreitende Wasserbewirtschaftungsinfrastruktur“ und „Abwasserbewirtschaftungskonzepte für Jordanien und Palästina“ unterteilt. Die einzelnen Entscheidungsfelder wurden anschließend in einer Reihe von bilateralen Treffen mit den technischen Experten des jeweiligen Entscheidungsfeldes in Teilentscheidungen und mögliche Optionen differenziert. Auf einem Konsortialtreffen wurde die vorläufige Strategietabelle dem gesamten Projektkonsortium und den Entscheidungstragenden zur Diskussion gestellt und auf Grundlage der Rückmeldungen in einer weiteren Iteration überarbeitet. Diese Art des Austausches trug zudem dazu bei, innerhalb des interdisziplinären Projektkonsortiums ein umfassendes Verständnis für die gesamte Entscheidungsproblematik zu entwickeln. Die resultierende Strategietabelle dieses Prozesses ist in Tabelle 5.8 dargestellt.

Tabelle 5.8: Strategietabelle für das Fallbeispiel, transponierte Darstellung

Feld	Teilentscheidung	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4
MWE am Mittelmeer und am Roten Meer	Standorte	Haifa	Netanya	Akaba	Gaza
	Anlagenkonzept	Küstennah	Offshore, 12 m Wassertiefe	Offshore, 30 m Wassertiefe	
	Energietechnologie	Erdgas	Photovoltaik	Konzentrierende Solarthermie	Erneuerbare und Energiespeicher
Grenzüberschreitende Wasserbewirtschaftungsinfrastruktur	Trassierung Verteilnetzwerk	Kostenminimale Trassierung	Trassierung über Jerusalem	Unidirektionale Versorgung des Westjordanlandes	Duales Verteilnetzwerk
	Einbindung von Wasserkraft	Zufuhr über Freispiegleitung	Zufuhr über Druckrohrleitung	Kontinuierlicher Betrieb	Intermittierender Betrieb mit Speicherbecken
Abwasserbewirtschaftungskonzepte für Jordanien und das Palästina	Ausbau des Abwassersystems	Zentrale Aufbereitungssysteme	Ausbau dezentraler Lösungen	Selektive Kombination	
	Gezielte Grundwasseranreicherung	Salzwassereintritt entgegenwirken	Gezielte Erhöhung des Grundwasserspiegels an ausgewählten Stellen	Keine gezielte Maßnahme	
	Renaturierung des Jordantals	Maximale Renaturierung	Stabilisierung des Toten Meeres	Renaturierung des unteren Jordantals	Einleitung in jordanische Wadis
	Landwirtschaftliche Nutzung	Umstellung auf ertragsreichere Kulturen	Vermischung mit Süßwasser zur Bewässerung	Ausweitung der bewässerten Landwirtschaft	Keine landwirtschaftliche Nutzung von zusätzlichem Abwasser

Als Teilentscheidungen wurden in jedem Entscheidungsfeld insbesondere Aspekte mit strategischem Charakter ausgewählt, wie z. B. Standortfragen oder grundsätzliche technologische Entscheidungen bei der Konzeptionierung von Meerwasserentsalzungsanlagen oder der Gestaltung des grenzüberschreitenden Wasserverteilnetzwerks. Die einzelnen Optionen decken ein breites Spektrum aus etablierten, bereits zur Verfügung stehenden Möglichkeiten ab (z. B. Meerwasserentsalzungsanlagen mit dediziertem Gaskraftwerk) und enthalten zudem Optionen mit innovativem Charakter, wie z. B. die Einbindung von Wasserkraftanlagen in das Verteilnetzwerk des entsalzten Wassers oder die Vermischung

von aufbereitetem Abwasser mit entsalztem Wasser zur landwirtschaftlichen Bewässerung in Jordanien. Auf diese Weise können Alternativen generiert werden, die einerseits kohärent, vergleichbar und spezifisch, andererseits aber auch klar differenzierbar und facettenreich sind (vgl. Abschnitt 3.3.2.3).

Die Alternativen wurden auf Basis dieser Tabelle anschließend durch iterative Auswahl kompatibler Teilentscheidungen über alle Entscheidungsfelder generiert. Einige Optionen schließen sich dabei gegenseitig aus und können nicht kombiniert werden, wie z. B. die Wahl bestimmter Entsalzungsstandorte und Trassierungsoptionen, teils sind aber auch mehrere Optionen pro Teilentscheidung wählbar. Dies stellt jedoch keine Einschränkung dar, da der Hauptzweck der Strategietabellen nicht darin bestand, den Prozess der Entwicklung von Alternativen zu automatisieren und zu simplifizieren. Vielmehr sollten die Strategietabellen kognitive Anreize zu schaffen sowie eine Diskussionsplattform zu bieten, um konventionelle Denkmuster zu durchbrechen.

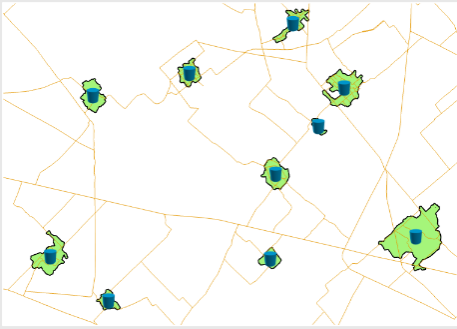
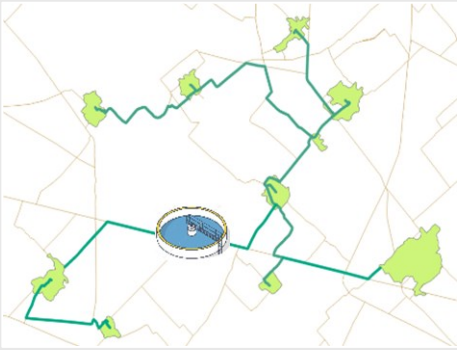

5.2.3.3 Alternativen zur Behebung des Wasserdefizitproblems im Nahen Osten

Für das Entscheidungsfeld „Meerwasserentsalzung am Mittelmeer und am Roten Meer“ wurden insgesamt zehn Alternativen generiert. Für die MWE am Mittelmeer wurden sechs verschiedene Anlagenkonzepte entwickelt. Alle Konzepte basieren auf der Umkehrosmose, und die elektrische Energie wird durch ein Gas- und Dampfkraftwerk (GuD) und ergänzende PV-Anlagen bereitgestellt. Drei der Konzepte wurden für den Standort Akkon/Schawe Zion in der Nähe von Haifa ausgelegt und drei weitere nahe Netanja. Am Roten Meer wurden vier Entsalzungsanlagen auf Basis erneuerbarer Energien (EE) konzipiert. Die Konzepte basieren auf membranbasierten oder thermischen Entsalzungstechnologien. Für die Energieversorgung werden GuD-Kraftwerke, konzentrierende Solarthermie (engl. concentrated solar power, CSP) und PV-Anlagen sowie entsprechende Energiespeichersysteme betrachtet. Die Sole wird, je nach Konzept, entweder direkt in das Rote Meer am Golf von Akaba oder das Tote Meer im Norden Jordaniens eingeleitet. Die Entsalzungskapazität ist für alle Konzepte modular in Schritten von 200 Millionen m³ pro Jahr (MCM/a) ausgelegt, um den Bedarf an Süßwasser in Palästina und Jordanien schrittweise zu decken und bis zum Jahr 2050 eine Kapazität von 1.000 MCM/a zu erreichen. Die Konzepte sind in Tabelle B.1 zusammenfassend beschrieben. Für eine ausführliche Charakterisierung der Alternativen am Mittelmeer siehe Yüce und Janowitz (2022a) und Janowitz et al. (2022a). Die konzipierten MWE-Anlagen am Roten Meer sind ausführlich in Yüce und Janowitz (2022b) und Janowitz et al. (2022b) beschrieben.

Die erstellten Abwasserbewirtschaftungskonzepte für Jordanien und das Palästina setzen sich aus Infrastrukturerweiterungen und Weiternutzungskonzepten der zusätzlich gereinigten Abwasservolumina zusammen. Beim dezentralen Ansatz (Alternative WWT 1) wird das Abwassersystem durch Abwasseraufbereitungsanlagen auf Siedlungsebene erweitert. Zusätzlich zu den bestehenden 34 zentralen Aufbereitungsanlagen werden insgesamt 370 kleine bis mittelgroße Anlagen in der Nähe von Siedlungen gebaut, die noch nicht über die Möglichkeit zur Aufbereitung von Abwasser verfügen. Das aufbereitete Abwasser wird größtenteils über das bestehende Wassernetzwerk durch die jordanischen Wadis transportiert und über eine Pipeline im Norden des Jordantals, nahe der König-Talal-Talsperre, eingeleitet. Hierdurch wird eine Vermischung mit den natürlichen Wasserträgern im unteren Jordantal vermieden. Das aufbereitete Abwasser wird im nördlichen Jordantal zu gleichen Teilen mit Süßwasser vermischt und gezielt für die landwirtschaftliche Bewässerung eingesetzt. Eine weitere Alternative besteht in der Expansion zentraler Abwasseraufbereitungssysteme (Alternative WWT 2). Bei diesem Ansatz wird die Region in Einzugsgebiete unterteilt und pro Einzugsgebiet eine zentrale Abwasseraufbereitungsanlage errichtet. Die Siedlungen werden hierzu durch ein gemeinsames Kanalisationsnetzwerk miteinander

verbunden, durch welche das Rohwasser zur Aufbereitungsanlage geleitet wird. Zudem werden innerhalb der Einzugsgebiete lokale Kanalisationssysteme errichtet. Insgesamt werden so 26 zusätzliche zentrale Abwasseraufbereitungsanlagen, 8.819 km Kanalisationsnetzwerk und 1.790 km Rohwasserleitung installiert. Das aufbereitete Abwasser wird über die König-Talal-Talsperre in das Jordantal zur weiteren Nutzung eingeleitet. In der dritten Alternative (Alternative WWT3) wird die Region ebenfalls in Einzugsgebiete unterteilt. Für jedes Einzugsgebiet wird dann individuell eine dezentrale oder zentrale Lösung installiert. Dabei wird die jeweils kostengünstigste Variante gewählt, um die spezifischen Kosten der Abwasserbehandlung so gering wie möglich zu halten. In allen drei Alternativen wird insgesamt die gleiche Systemkapazität angestrebt. Jedoch bringen die dezentralen Lösungen gegenüber zentralen Systemen größere physische Verluste beim Transfer des aufbereiteten Abwassers über die Wadis mit sich (ca. 18 % gegenüber 5 %). Es steht somit eine geringere Menge an gereinigtem Abwasser für die weitere Nutzung im Jordantal zur Verfügung.

Tabelle 5.9: Alternativen zur Abwasserbewirtschaftung in Jordanien und dem Westjordanland

Bezeichnung	Beschreibung	
Ausbau dezentraler Abwassersysteme (WWT 1)	370 neue Abwasseraufbereitungsanlagen auf Siedlungsebene und Ausleitung über die Wadis in das nördliche Jordantal.	
Einrichtung eines zentralen Abwassersystems (WWT 2)	Vernetzung der Region zu Einzugsgebieten und 26 zusätzliche zentrale Abwasseraufbereitungsanlagen. Ausleitung in das nördliche Jordantal.	
Kosteneffiziente Ausbaustrategie (WWT 3)	Sowohl Aufbau zentraler als auch dezentraler Systeme je Einzugsgebiet. Wahl der kostengünstigeren Variante.	

Quelle: Khurelbaatar et al. (2022)

Die Charakteristika der Infrastrukturkonzepte sind ausführlich in Khurelbaatar et al. (2022) erläutert. Die Weiternutzungskonzepte des behandelten Abwassers im Jordantal sind in Xanke et al. (2022a) und Xanke et al. (2022c) beschrieben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden in dieser Fallstudie im weiteren Verlauf lediglich die Handlungsalternativen zur Errichtung einer grenzüberschreitenden

Wasserbewirtschaftungsinfrastruktur vorgestellt, um die Anwendung des entwickelten MCDA Verfahrens exemplarisch aufzuzeigen.

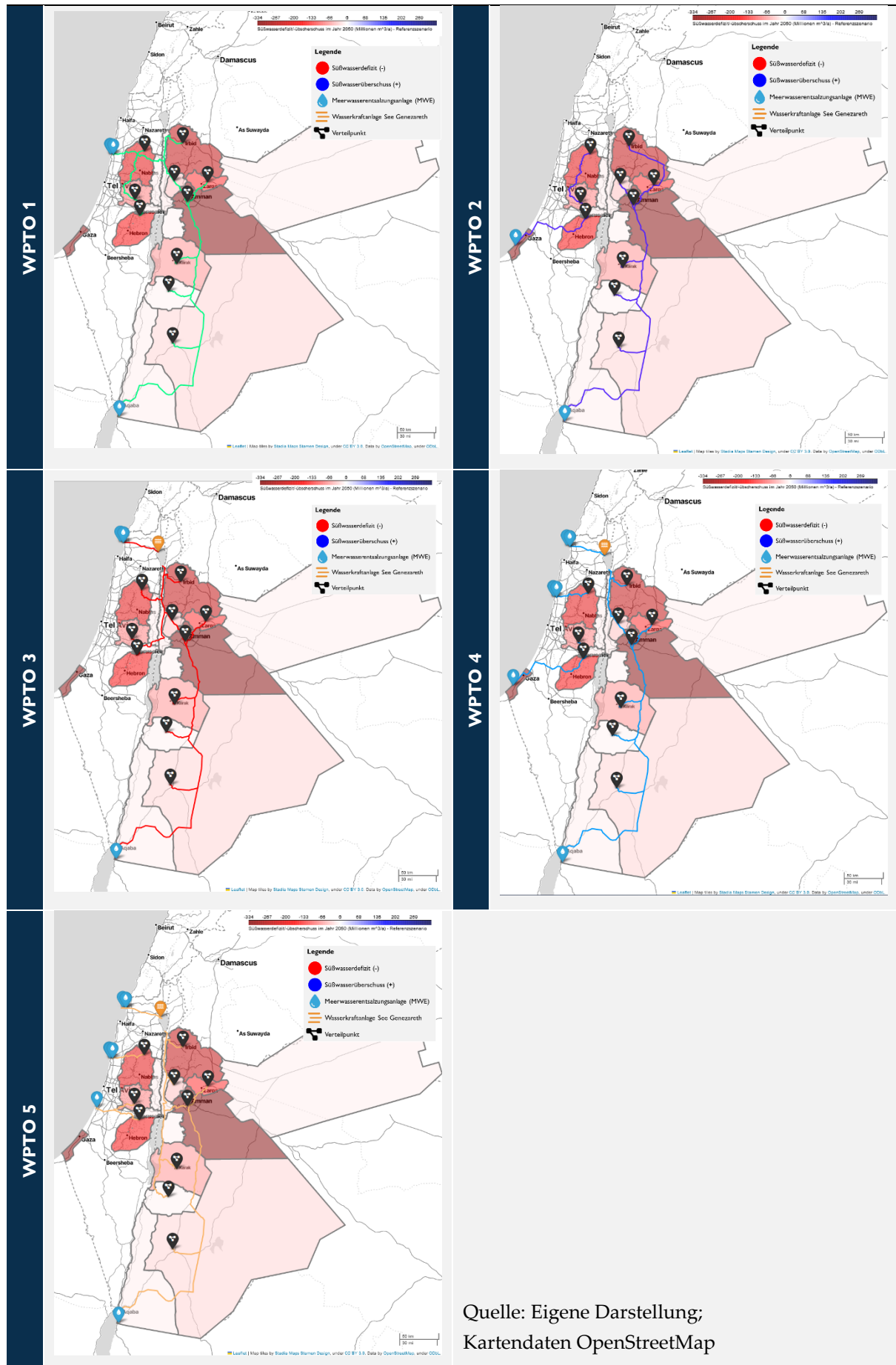
Die erwarteten jährlichen Süßwasserdefizite in Jordanien und Palästina liegen im Jahr 2050, je nach Szenario, bei 0,51–2,52 Milliarden m³. Diese Menge an zusätzlich benötigtem Süßwasser kann nicht durch eine einzige Entsalzungsanlage und eine Transferpipeline gedeckt werden. Darüber hinaus können grenzüberschreitende Wasserstrategien deutlich kosteneffizienter sein als eine Reihe separater nationaler Lösungen. Insbesondere der Wassertransfer von der israelischen Mittelmeerküste in den Norden Jordaniens könnte aufgrund der kürzeren Transferdistanzen und der Topographie wesentlich wirtschaftlicher sein als die alleinige Versorgung der jordanischen Bedarfsgebiete über Akaba. Die generierten Alternativen für eine grenzüberschreitende Wasserbewirtschaftungsinfrastruktur berücksichtigen die Möglichkeiten eines solchen Entsalzungs- und Verteilungssystems. Tabelle 5.10 zeigt die fünf, durch Kombination ausgewählter Entsalzungs- und Trassierungsoptionen aus der Strategietabelle generierten, Alternativen, um Wasser an verschiedenen Standorten zu entsalzen und in die jordanischen und palästinensischen Bedarfsgebiete zu verteilen.

Tabelle 5.10: Alternativen für eine grenzüberschreitende Wasserbewirtschaftungsinfrastruktur

Bez.	Beschreibung
WPTO 1	Errichtung einer MWE-Anlage bei Netanja, um das gesamte Westjordanland und einen Teil von Jordanien zu versorgen. Das Verteilnetz nach Jordanien ist durch das nördliche Westjordanland trassiert. Bau einer MWE-Anlage in Akaba, um die restlichen jordanischen Gebiete zu versorgen.
WPTO 2	Bau einer MWE-Anlage in Gaza zur Versorgung des Westjordanlands. Versorgung aller jordanischen Bedarfsgebiete über MWE-Anlagen am Golf von Akaba.
WPTO 3	Bau einer MWE-Anlage bei Haifa, um das gesamte Westjordanland und einen Teil Jordaniens zu versorgen. Bidirektionale Trassierung des Transfersystems in das Westjordanland und Integration eines neuen Wasserkraftwerkes am See Genezareth in das System. Bau einer MWE-Anlage in Akaba, um die restlichen jordanischen Bedarfsgebiete zu versorgen.
WPTO 4	Errichtung von MWE-Anlagen in Gaza und Netanja, um das Westjordanland zu versorgen. Errichtung von MWE-Anlagen bei Haifa und Akaba, um die jordanischen Bedarfsgebiete abzudecken. Zusätzlich Errichtung eines Wasserkraftwerkes am See Genezareth.
WPTO 5	Kostenminimale Wahl von MWE-Anlagen und Trassierung des Verteilnetzes. Bau einer MWE-Anlage bei Netanja, um Bedarf des nördlichen Bedarfsgebietes im Westjordanland zu decken. Die MWE-Anlage in Ashdod versorgt das mittlere und südliche Bedarfsgebiet. Versorgung der jordanischen Bedarfsgebiete über eine MWE-Anlage bei Haifa, inkl. Einbindung eines Wasserkraftwerkes, und eine MWE-Anlage in Akaba.

Quelle: Rusteberg et al. (2022c)

Abbildung 5.5 visualisiert die gewählten Standorte der MWE sowie die Trassierung der Transfersysteme. Bei den Alternativen, welche eine MWE-Anlage am Standort Haifa berücksichtigen, wurde zusätzlich eine Wasserkraftanlage am Fuße des See Genezareth konzipiert (Klein und Theobald 2022c, 2022a). Aufgrund des Höhengefälles von der Mittelmeerküste in Richtung Jordanien kann das entsalzte Wasser ohne zusätzlichen Energieaufwand über einen Tunnel in den See Genezareth (-208 m ü. NHN) eingeleitet werden. Dieser dient somit als Speicherbecken für das Wasserkraftwerk. Bei Weiterleitung des Wassers zu den Bedarfsorten im Westjordanland und Jordanien lassen sich effektive Fallhöhen von etwa 170–205 m realisieren und so ein Teil der anfallenden Energie für Entsalzung und Transfer zurückgewinnen.



Quelle: Eigene Darstellung;
Kartendaten OpenStreetMap

Abbildung 5.5: Visualisierung der grenzüberschreitenden Wasserinfrastrukturalternativen

5.2.4 Bestimmung der Kriterienausprägungen

Um die entwickelten Maßnahmen im Hinblick auf die erhobenen Ziele zu bewerten, muss für jede Alternative bestimmt werden, wie gut sie in Bezug auf die einzelnen Kriterien abschneidet. Die Bestimmung dieser Kriterienausprägungen vervollständigt eine Entscheidungstabelle, welche die Grundlage für das spätere Entscheidungsmodell darstellt. Die vervollständigten Entscheidungstabellen für das Fallbeispiel sind in Abschnitt 5.3.2 aufgezeigt.

Die Kriterienausprägungen wurden für jedes der drei Entscheidungsfelder und jedes der drei betrachteten Szenarien bestimmt. Die Kriterienausprägungen wurden entweder berechnet, erhoben oder auf Basis von Expertenmeinungen abgeschätzt. Im folgenden ist die Bestimmung der Kriterienausprägungen der fünf zuvor entwickelten Alternativen für grenzüberschreitende Wasserbewirtschaftungsinfrastruktur (WPTO 1–WPTO 5) aufgezeigt. Die Erläuterungen sind nach den Zieldimensionen (technisch, ökonomisch, umweltbezogen, sozial, politisch) der betrachteten Kriterien (Tabelle 5.5) gegliedert.

5.2.4.1 Technische und ökonomische Kriterien

Die technischen (Zuverlässigkeit, Technischer Aufwand, Anbindung an bestehende Wasserinfrastruktur) und ökonomischen Kriterienausprägungen (Spezifische Wasserkosten, Investitionsbedarf) wurden mittels einer techno-ökonomischen Analyse rechnerisch bestimmt und durch Expertenbefragungen erhoben. Damit werden Wasser- und Energieinfrastrukturvorhaben in einem frühem Planungsstadium hinsichtlich ihrer technischen Charakteristika und ökonomischen Implikationen approximativ charakterisiert. Auf diese Weise können mit vertretbarem Aufwand technische Varianten differenziert und Entscheidungsalternativen hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit bewertet werden.

Die durchgeführte techno-ökonomische Analyse basiert auf den in Abschnitt 5.2.3.1 erstellten Wasserdefizitszenarien, den technischen Konzeptionierungen der MWE-Anlagen (Janowitz et al. 2022b) und der Trassierung und Bemessung des Verteilnetzwerkes (Scheday und Zarzar 2022a). Auf Basis dieser Daten wurde zunächst jede Alternative in Teilabschnitte, beginnend vom Punkt der Entsalzung bis zum Verteilpunkt im Bedarfsgebiet (vgl. Abbildung 5.5), untergliedert. Für jeden Netzwerkabschnitt wurden anschließend die Länge und die Höhendifferenz ermittelt. Die Gesamtlänge einer Alternative, gemessen in km zu installierender Rohrleitung, ist zugleich die Ausprägung des Kriteriums **Zuverlässigkeit**.

Zur Bestimmung des **Investitionsbedarfs** wurden zusätzlich die Standorte und der Leistungsbedarf der zur Förderung benötigten Pumpwerke sowie Durchmesser der Rohrleitungen berechnet. Jeder Netzwerkabschnitt wurde dabei auf Hochpunkte untersucht und in Teilsektionen, anhand der Lage der Hochpunkte, unterteilt. Anschließend wurde für jede Teilsektion die statische Förderhöhe und die Druckverlusthöhe ermittelt (Brown 2003; Swamee und Jain 1976). Die Betrachtung der Druckverlusthöhe und der statischen Förderhöhe ist Grundlage für die Wahl des Rohrdurchmessers und die Entscheidung über die Errichtung eines Pumpwerkes: Ist die statische Förderhöhe positiv oder ist die Druckverlusthöhe betragsmäßig größer als eine negative Förderhöhe, so ist die Errichtung eines Pumpwerkes erforderlich. Für jedes Pumpwerk wurde die zu installierende Leistung und der resultierende Energiebedarf über den Planungszeitraum, auf Basis des gegebenen Volumenstroms, bestimmt. Der Investitionsbedarf ergibt sich aus dem Kapitalbedarf für Installation von Rohrleitungen, Pumpwerken und Nebeneinrichtungen. Nicht enthalten sind für den Erwerb von Grundstücksrechten anfallende Kosten sowie die Anschlusskosten der Pumpwerke an das Energieversorgungsnetz. Das Vorgehen und die verwendeten Berechnungsgrundlagen sind ausführlich in Schär und Geldermann (2022d) dargelegt.

Die **spezifischen Wasserkosten** umfassen sowohl die spezifischen Kosten der MWE als auch die spezifischen Transferkosten. Sie wurden über die Annuitätenmethode²³ bestimmt und beinhalten alle wesentlichen Kosten für die Bereitstellung eines Kubikmeters Wassers im Verteilpunkt. Die spezifischen Transferkosten wurden für jede Alternative anhand der insgesamt zu installierenden Rohrleitungen und deren Durchmessern sowie den Installationskosten der Pumpwerke inkl. Nebeneinrichtungen ermittelt. Ein Aufschlag für Wartung und Instandhaltung wurde ebenfalls berücksichtigt. Die Energiekosten, welche je nach Topographie und den zu fördernden Wassermengen maßgebliche Auswirkungen auf die spezifischen Wasserkosten haben, wurden anhand der jährlich zur Förderung aufzubringenden Energiemenge berechnet. Abbildung 5.6 zeigt das Berechnungsschema der spezifischen Wasserkosten und die resultierende Kostenstruktur beispielhaft für die Alternative WPTO 2 und den Akteur Jordanien auf (Entsorgung in Akaba und Transfer in alle jordanischen Bedarfsgebiete). Bei grenzüberschreitenden Alternativen wurden die Kosten für die Akteure Jordanien und Palästina anteilig, anhand der bezogenen Süßwasservolumina, berechnet. Der Nettoertrag des Wasserkraftwerks ergibt sich aus dem Verhältnis der jährlichen Erträge des Kraftwerks zum Volumenstrom des Süßwasserzuflusses aus der MWE-Anlage Haifa. Bei der Alternative WPTO 2 ergibt sich folglich kein Ertrag, da sowohl die MWE-Anlage Haifa als auch das Wasserkraftwerk nicht eingeplant wurden. Bei den Alternativen, welche die MWE-Anlage in Haifa einbinden, wurde hingegen ein durchschnittliches Minderungspotenzial der spezifischen Wasserkosten von 0,05 USD/m³ approximiert (Schär und Geldermann 2022c, 2022d).

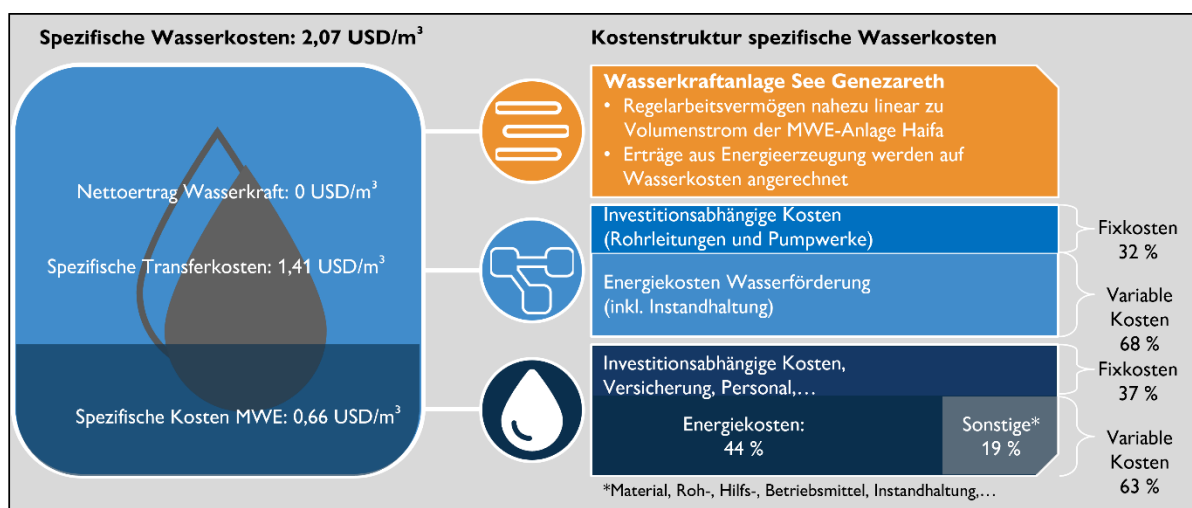


Abbildung 5.6: Berechnungsschema spezifische Wasserkosten, Alternative WPTO 2

Quelle: Eigene Darstellung; Daten nach eigenen Berechnungen und Yüce und Janowitz (2022b)

Die Kriterienausprägungen **technischer Aufwand** und **Anbindung an bestehende Wasserinfrastruktur** wurden durch Befragungen der technischen Experten des Projektpartners DI qualitativ über eine 7-Punkt Likert Skala erhoben (Scheday und Zarzar 2022b).

²³ Die Annuitätenmethode baut auf der Kapitalwertmethode auf. Gegenwartswerte zukünftiger Zahlungen werden durch Abzinsung in konstante Jahresbeträge umgewandelt (vgl. z. B. Giesecke et al. 2014, S. 76).

5.2.4.2 Bestimmung der umweltbezogenen Wirkungen

Die umweltbezogenen Wirkungen der Alternativen werden anhand ihrer CO₂ äquivalenten Emissionen und durch ein kombiniertes Kriterium in der Bewertung berücksichtigt. Die **spezifischen CO₂ Emissionen** eines Kubikmeters Süßwasser, befördert zum Verteilpunkt im Bedarfsgebiet, wurden anhand des Energiebedarfs zur Entsalzung und Förderung berechnet. Hierzu wurde zunächst für jede Alternative der Energiebedarf für die Schritte der Entsalzung und Förderung bestimmt. Dieser wurde anschließend mit den zu fördernden Volumenströmen und den Emissionsfaktoren des regionalen Strommixes gewichtet, um die spezifischen CO₂ äquivalenten Emissionen (kg CO₂ eq./m³) für jede Alternative und jeden Akteur zu erhalten. Für die Alternative WPTO 2 ergeben sich aus der Entsalzung in Gaza und Förderung in das Westjordanland so spezifische Emissionen i. H. v. 4,10 kg CO₂ eq./m³ für den Akteur Palästina und 3,79 kg CO₂ eq./m³ für den Akteur Jordanien (Entsalzung in Akaba und der Förderung an die jordanischen Bedarfsgebiete) (Rusteberg et al. 2022b). Das Berechnungsschema der Emissionsfaktoren ist in Tabelle 5.11 anhand des Beispiels Jordanien aufgezeigt. Bei Berechnung der Emissionsfaktoren der Entsalzung wurden darüber hinaus energetischen Versorgungskonzepte der jeweiligen MWE-Anlagen berücksichtigt, da diese weitestgehend energieautark ausgelegt sind (Yüce und Janowitz 2022b).

Tabelle 5.11: Strommix Jordanien 2019 und GHG-Emissionen

Technologie	Erzeugung 2019 [GWh]	Anteil [%]	Emissionsfaktor, gewichtet nach Erzeugung [kg CO ₂ eq./kWh _{el}]	Emissionsfaktor, gewichtet nach Erzeugung [kg CO ₂ eq./kWh _{el}]
Biomasse	4	0,0 %	0,099	0
Kohlekraft	0	0,0 %	1,000	0
Wasserkraft	18	0,1 %	0,034	0
GuD	16.603	81,0 %	0,575	0,466
Öl	907	4,4 %	0,800	0,035
PV	2.086	10,2 %	0,073	0,007
Windkraft	875	4,3 %	0,030	0,001
Summe	20.493	100 %	-	0,510

Quelle: Eigene Darstellung; Daten und Berechnungen nach IEA (2022a) und Rusteberg et al. (2022b)

Das Kriterium „**weitere negative Umweltwirkungen**“ ist qualitativer Natur und berücksichtigt die negativen Wirkungen der Entsalzung und des anschließenden Transfers. Es wurde als Proxy-Kriterium angelegt und über eine Punkteskala von den technischen Experten des Projektkonsortiums quantifiziert. Zur Bestimmung der Kriterienausprägungen wurden zunächst für jedes Anlagenkonzept die negativen Wirkungen durch Anlagenerrichtung, Meerwasserentnahme und Solerrückführung auf das maritime Ökosystem quantifiziert. Die Umweltwirkungen des Transfers wurden anhand der Länge und der durchschnittlichen Auslastung des Transfernetzwerkes abgeschätzt. Die Gesamtlänge sollte dabei möglichst kurz sein, um Eingriffe in die natürliche Umwelt möglichst gering zu halten und Effizienzverlusten durch Leckagen entgegenzuwirken. Die Auslastung ergibt sich aus dem Verhältnis des jährlichen Volumenstroms zur Länge des Netzwerkes. Die Bewertungen dieser einzelnen Faktoren wurden anschließend summiert und normalisiert. Die jeweils schlechteste Alternative erhielt hier nach Normalisierung 100 Punkte und bessere Alternativen anteilmäßig weniger Punkte (Rusteberg et al. 2022b).

5.2.4.3 Erhebung der sozio-politischen Kriterienausprägungen

Die Ausprägungen der sozialen Kriterien (**Beitrag zur ökonomischen Entwicklung der Region, gesellschaftliche Akzeptanz**) und der politischen Kriterien (**Kohärenz mit bestehenden politischen Vorhaben, Unabhängigkeit der Wasserversorgung und Wasserversorgungssicherheit**) wurden mit Hilfe einer strukturierten Online-Befragung erhoben. Auf diese Weise konnten entscheidungstragende Institutionen und Repräsentierende weiterer Interessensgruppen erreicht werden.

Die Online-Befragung wurde über die freie Online-Umfrage-Applikation *LimeSurvey* durchgeführt. Für jedes der drei Entscheidungsgelder wurde eine separate Befragung erstellt. Die Befragungen wurden so strukturiert, dass den Befragten zunächst eine Einführung in das vorliegende Entscheidungsproblem gegeben wurde. Der Entscheidungskontext, die Kriterien und Alternativen wurden schriftlich und anhand von unterstützenden Abbildungen erläutert (z. B. Abbildung 5.7). Anschließend wurden die Befragten gebeten, die Alternativen hinsichtlich der sozialen und politischen Kriterien anhand einer Likert-Skala mit 7 Merkmalsausprägungen zu bewerten. Zudem wurden sie gebeten, zu jeder Bewertung eine kurze schriftliche Begründung abzugeben.

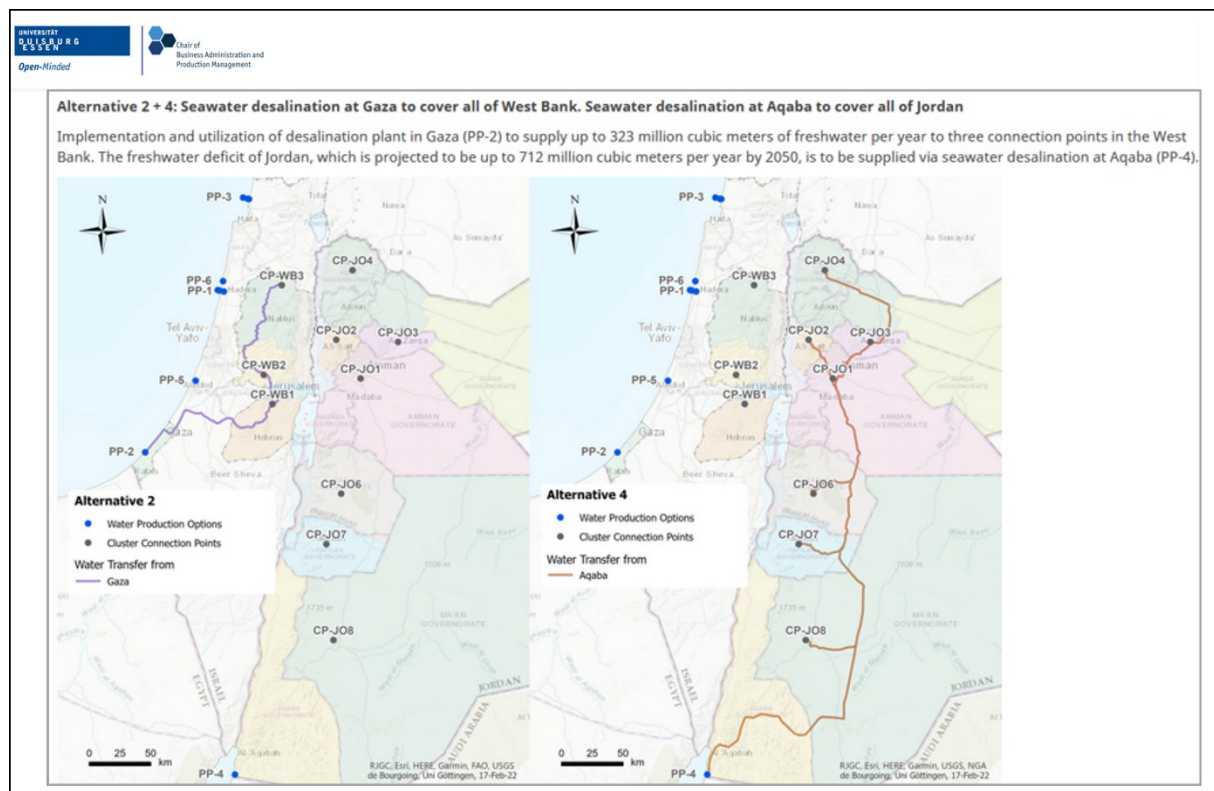


Abbildung 5.7: Erläuterung Alternative WPTO in der Online Befragung

Quelle: Eigene Darstellung; Kartendaten von De Bourgoing et al. (2022b)

Der Fragebogen wurde an verschiedene Personengruppen in der Region ausgeteilt. Zur Erhebung der politischen Kriterien wurden möglichst Personen der entscheidungstragenden Institutionen eingebunden. Für die sozialen Kriterien wurden zur Berücksichtigung weiterer Interessensgruppen aus der Zivilgesellschaft zudem Repräsentierende weiterer Institutionen und Forschungseinrichtungen einbezogen. Die Tabelle B.2 im Anhang gibt eine Übersicht der befragten Personen zur Erhebung der sozialen und politischen Kriterienausprägungen.

5.3 Modellbildung nach MAMCA und Aggregation mittels PROMETHEE

Bei der vorliegenden Problemstellung handelt es sich im entscheidungstheoretischen Sinne um ein Ordnungsproblem (vgl. Abschnitt 3.3.1). Das Ziel ist die quantitative Bewertung der zuvor entwickelten grenzüberschreitenden Wasserinfrastrukturalternativen anhand der Ziele und Präferenzen der involvierten Interessensgruppen und die Aufstellung einer Rangfolge in Form von Präferenzrelationen.

Für die Erstellung eines Präferenzmodells nach MAMCA mit PROMETHEE als Aggregationsprozedur werden neben den Kriterien, Alternativen und Kriterienausrägungen zusätzlich inter- und intra-kriterielle Präferenzinformationen in Form von Kriteriengewichten und Präferenzfunktionen für jeden Akteur benötigt (vgl. Abschnitt 3.3.3). So wird jedem Akteur die Möglichkeit eines separaten Präferenzmodells geboten. Diese Informationen gehen anschließend als Parameter in die Aggregation nach PROMETHEE ein. Im folgenden wird das Vorgehen zur Erhebung der Präferenzinformationen für grenzüberschreitende Wasserinfrastrukturalternativen beschrieben. Die Entscheidungstabellen, die der Aggregation zugrunde liegen, sind ebenfalls aufgezeigt.

5.3.1 Präferenzenerhebung

Die Präferenzenerhebungen wurden im Rahmen mehrerer interaktiver Workshops während des Konsortialtreffens in Jordanien im Oktober 2021 sowie mittels Online-Befragungen über *LimeSurvey* im Frühjahr 2022 durchgeführt. Zur Vorbereitung der Online-Befragungen wurden ergänzende Workshops abgehalten, um die Methodik vorzustellen und Fragen zu Alternativen und Kriterien zu beantworten. Während dieser Workshops wurden die Teilnehmenden zudem auf die Abhängigkeit zwischen den ökonomischen Kriterien und mögliche Verzerrungseffekte durch asymmetrische Kriterienhierarchien hingewiesen, um dies bei der Erhebung berücksichtigen zu können.

Die Bestimmung der **Kriteriengewichte**, d. h. der quantifizierten Präferenzen bezüglich eines jeden Bewertungskriteriums, wurde dabei nach der erweiterten Simos-Methode von Figueira und Roy (2002) vorgenommen (vgl. Abschnitt 3.3.3.2). Auf diese Weise wurde für jedes Entscheidungsfeld und jeden Akteur (vgl. Tabelle 5.3) ein Präferenzmodell erstellt. Die Online-Fragebögen wurden so gestaltet, dass die Befragten anhand eines illustrativen Beispiels nochmals kurz in die Methodik eingeführt wurden. Anschließend wurden sie gebeten, die Kriterien für grenzüberschreitende Wasserinfrastrukturalternativen entsprechend ihrer relativen Wichtigkeit anzuordnen (Abbildung 5.8). Die Kriteriengewichte wurden anschließend für jeden Akteur durch Bilden des Mittelwertes über alle Rückläufe der Erhebung bestimmt. Tabelle 5.12 zeigt die Kriteriengewichtungen der drei Akteure Israel, Jordanien und Palästina zur Bewertung der grenzüberschreitenden Wasserinfrastrukturalternativen auf. Da jeder Akteur seine eigene Kriterienhierarchie erstellt hat, unterscheiden sich die einbezogenen und gewichteten Kriterien von Akteur zu Akteur.

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Open-Minded

Chair of
Business Administration and
Production Management

Please rank the criteria for the assessment of transboundary water production and transfer strategies according to their relative importance. This ranking is used to assign weights to the criteria within the Multi-Criteria Assessment method.

If you consider a criterion as not decision-relevant and want to exclude it, you can leave it on the left side and not rank it. You may also introduce blank cards into you ranking to indicate a larger gap in importance between criteria. In the following step, you may also add additional criteria you consider as decision-relevant.

Illustrative example: Ranking criteria for purchasing a new car

The following set of criteria is given (1.) and ordered according to the relative importance of criteria (2.).

1.

Power [horse power]

Specific costs [US \$/km driven]

Image of the brand [likert scale, 1-7]

Specific CO₂ emissions [kg CO₂ eq./km]

Aesthetics [point scale, 1-100]

Blank Card (to indicate a larger gap in importance between criteria)

→

2.

Aesthetics [point scale, 1-100]

Specific CO₂ emissions [kg CO₂ eq./km]

Blank Card (to indicate a larger gap in importance between criteria)

Specific costs [US \$/km driven]

Power [horse power]

most important ↑

importance

↓ least important

The visual appearance ('aesthetics') is considered most important, followed by the specific CO₂ emissions of the alternatives. Then, a blank card is inserted, because these two criteria are by far the most important criteria. Nevertheless, the costs followed by the power of the car are somewhat important. The Image of the brand is not considered as decision relevant and therefore excluded by not ordering it.

Double-click or drag-and-drop items in the left list to move them to the right - your highest ranking item should be on the top right, moving through to your lowest ranking item.

🔊 Please select at most 14 answers

Your choices

Technical reliability and duration of implementation [system length in km]
Technical feasibility [likert scale 1-7]
Connectivity to existing water infrastructure [likert scale 1-7]
Specific water costs [US \$/m ³]
Total investment needed [US \$]
Economic development of the region [likert scale, 1-7]
Social acceptance [likert scale, 1-7]
Adverse environmental impacts [point scale 1-100]
Specific CO ₂ emissions [kg CO ₂ eq./m ³ of desalinated and transferred water]
Acceptance by national stakeholders [likert scale, 1-7]
Contribution to water independency and supply security [likert scale, 1-7]
blank card (to indicate a gap in importance between criteria)
blank card (to indicate a gap in importance between criteria)
blank card (to indicate a gap in importance between criteria)

Your ranking

Abbildung 5.8: Online-Befragung zur Erhebung der Kriteriengewichte

Quelle: Eigene Darstellung

Insgesamt zeigt sich über die drei Akteure eine variierende Gewichtung der Zieldimensionen und Kriterien. Zudem hat Akteur S_1 (Israel), gegenüber den Akteuren S_2 (Jordanien) und S_3 (Palästina), lediglich fünf der elf Kriterien als entscheidungsrelevant erachtet. Umweltbezogene Kriterien werden von Akteur S_1 gänzlich ausgeschlossen. Die politischen Kriterien werden durch Akteur S_1 und S_2 mit 33,3 % bzw. 28 % am stärksten gewichtet. Akteur S_3 gewichtet insgesamt die technischen Kriterien am stärksten (25,4 %), gefolgt von den politischen Kriterien mit 22,7 %. Insbesondere dem Kriterium „Unabhängigkeit der Wasserversorgung und Wasserversorgungssicherheit“ wird von den Akteuren S_2 und S_3 eine hohe Bedeutung zugesprochen. Die ökonomischen Kriterien werden mit 16,9 % (Akteur S_3) bis 24,6 % (Akteur S_2) gewichtet. Die „spezifischen Wasserkosten“ sind dabei jeweils stärker gewichtet als das Kriterium „Investitionsbedarf“. Soziale Ziele werden von Akteur S_1 am zweitstärksten (26,7 %) und von den Akteuren S_2 und S_3 ähnlich stark gewichtet (16,7 % bzw. 17,5 %). Die zwei umweltbezogenen Kriterien werden von Akteur S_2 mit insgesamt 10,1 % gegenüber Akteur S_3 (17,7 %) relativ schwach gewichtet.

Tabelle 5.12: WPTO - Durchschnittliche Kriteriengewichtung der Akteure

Kriterium		Akteur S_1	Akteur S_2	Akteur S_3
Techn.	Zuverlässigkeit	-	6,1 %	8,2 %
	Technischer Aufwand	13,3 %	7,0 %	11,2 %
	Anbindung an bestehende Wasserinfrastruktur	6,7 %	7,5 %	6,0 %
Ökon.	Spezifische Wasserkosten	20,0 %	13,0 %	11,6 %
	Investitionsbedarf	-	11,6 %	5,3 %
Soz.	Beitrag zur ökonomischen Entwicklung der Region	-	5,1 %	8,9 %
	Gesellschaftliche Akzeptanz	26,7 %	11,6 %	8,6 %
Umw.	Spezifische CO ₂ Emissionen	-	4,7 %	6,8 %
	Weitere negative Umweltwirkungen	-	5,4 %	10,9 %
Pol.	Kohärenz mit bestehenden politischen Vorhaben	-	13,3 %	5,6 %
	Unabhängigkeit der Wasserversorgung und Wasserversorgungssicherheit	33,3 %	14,7 %	17,1 %

Quelle: Schär und Geldermann (2022b)

Im Anschluss wurde für jedes Kriterium eine der in PROMETHEE verfügbaren **Präferenzfunktionen** festgelegt. Die Präferenzfunktionen wurden in Absprache mit den Akteuren für jedes Kriterium über alle Akteure einheitlich festgelegt. Für die von den technischen Experten und Akteuren auf einer Likert-Skala bewerteten Kriterien wurde die Stufenfunktion (Typ 4) gewählt. Diese Funktion wurde der gewöhnlichen Funktion (Typ 1) vorgezogen, da über die Indifferenzschwelle eventuelle Unsicherheiten und geringe Unterschieden in den Ausprägungen weniger stark in die Bewertung eingehen. Bei den ökonomischen Kriterien lag eine lineare Präferenz (Typ 3) vor. Bei den umweltbezogenen Kriterien und dem technischen Kriterium „Zuverlässigkeit“ wurde eine lineare Präferenzfunktion mit zusätzlichem Indifferenzbereich (Typ 5) verwendet, da geringfügige Unterschiede in den Kriterienausprägungen hier als vernachlässigbar angesehen wurden.

Die **Schwellenparameter** wurden, entgegen der Präferenzfunktionen, für jeden Akteur und jedes Szenario separat bestimmt. Da für jeden Akteur eine Entscheidungstabelle erstellt wird und sich die Kriterienausprägungen der Alternativen in den Szenarien unterscheiden, sind auch die Schwellenparameter für jedes Szenario gesondert zu bestimmen. Die Präferenzschwellenwerte wurden nach dem empirischen Ansatz von Tsoutsos et al. (2009) auf 20 % der Bandbreite des jeweiligen Kriteriums, d. h. der Differenz zwischen der maximalen und minimalen Kriterienausprägung, festgelegt. Die Indifferenzschwellenwerte wurden auf 10 % dieser Bandbreite gesetzt. Die Präferenz- und Indifferenzschwellenwerte der Stufenkriterien des Typs 4 wurden einheitlich auf 2 bzw. 1 festgelegt. Die gewählten Präferenzfunktionen und die gesetzten Schwellenparameter sind in Tabelle 5.13 für das Referenzszenario ζ_1 aufgezeigt.

Tabelle 5.13: Präferenzfunktionen und Parameter der Akteure - Referenzszenario

Kriterium	Präferenzfunktion	Parameter S_1	Parameter S_2	Parameter S_3
Zuverlässigkeit	Linear mit Indifferenzbereich (Typ 5)	$p=74,4$ $q=37,2$	$p=40,8$ $q=20,4$	$p=24,6$ $q=12,3$
Technischer Aufwand	Stufenkriterium (Typ 4)	$p=2$ $q=1$	$p=2$ $q=1$	$p=2$ $q=1$
Anbindung an bestehende Wasserinfrastruktur	Stufenkriterium (Typ 4)	$p=2$ $q=1$	$p=2$ $q=1$	$p=2$ $q=1$
Spezifische Wasserkosten	Lineare Präferenz (Typ 3)	$p=0,10$	$p=0,08$	$p=0,12$
Investitionsbedarf	Lineare Präferenz (Typ 3)	$p=529$	$p=211$	$p=135$
Beitrag zur ökonomischen Entwicklung der Region	Stufenkriterium (Typ 4)	$p=2$ $q=1$	$p=2$ $q=1$	$p=2$ $q=1$
Gesellschaftliche Akzeptanz	Stufenkriterium (Typ 4)	$p=2$ $q=1$	$p=2$ $q=1$	$p=2$ $q=1$
Spezifische CO ₂ Emissionen	Linear mit Indifferenzbereich (Typ 5)	$p=0,09$ $q=0,05$	$p=0,13$ $q=0,07$	$p=0,25$ $q=0,12$
Weitere negative Umweltwirkungen	Linear mit Indifferenzbereich (Typ 5)	$p=5,8$ $q=2,9$	$p=5,6$ $q=2,8$	$p=7,8$ $q=3,9$
Kohärenz mit bestehenden politischen Vorhaben	Stufenkriterium (Typ 4)	$p=2$ $q=1$	$p=2$ $q=1$	$p=2$ $q=1$
Unabhängigkeit der Wasserversorgung und Wasserversorgungssicherheit	Stufenkriterium (Typ 4)	$p=2$ $q=1$	$p=2$ $q=1$	$p=2$ $q=1$

5.3.2 Aggregation und Visualisierung

Nach Erhebung der Präferenzinformationen kann nun anhand der Präferenzinformationen und Entscheidungstabellen aller Akteure ein Präferenzmodell gemäß der MAMCA erstellt werden. Hierzu werden die Informationen nach den PROMETHEE Methoden aggregiert und die Ergebnisse anschließend visualisiert.

5.3.2.1 Entscheidungstabellen

Für das Fallbeispiel werden drei verschiedene Wasserdefizitszenarien betrachtet, welche zu unterschiedlichen Kriterienausprägungen führen, d. h. für jedes Szenario entsteht eine Entscheidungstabelle. Zudem konnte jeder Akteur ein eigenes Zielsystem aufstellen und seine spezifischen Präferenzinformationen angeben, so dass je Szenario für jeden Akteur eine Entscheidungstabelle anzulegen ist. Insgesamt gehen so neun verschiedene Entscheidungstabellen in die Aggregation ein. Die Entscheidungstabellen für jedes Szenario sind nachfolgend in Tabelle 5.14, Tabelle 5.15 und Tabelle 5.16 dargestellt.

Tabelle 5.14: Entscheidungstabelle WPTO – Szenario ζ_1

Szenario ζ_1 Referenzszenario		Zuverlässigkeit	Technischer Aufwand	Anbindung an bestehende Wasserinfrastruktur	Spezifische Wasserkosten	Investitionsbedarf	Beitrag zur ökonomischen Entwicklung der Region	Gesellschaftliche Akzeptanz	Weitere negative Umweltwirkungen	Spezifische CO ₂ Emissionen	Kohärenz mit bestehenden politischen Vorhaben	Unabhängigkeit der Was- serversorgung und Was- serversorgungssicherheit
Alternative	Akteur	[km] ↓	[Likert] ↑	[Likert] ↑	[USD/m ³] ↓	[Mio. USD] ↓	[Likert] ↑	[Likert] ↑	[Punkte] ↓	[kg CO ₂ eq./m ³] ↓	[Likert] ↑	[Likert] ↑
WPTO 1	S ₁	937	5	5	1,52	3.340	5	5	70	3,91	5	5
	S ₂	762	5	5	1,72	2.756	3	2	72	4,24	3	2
	S ₃	175	5	5	1,09	584	3	3	66	3,17	3	3
WPTO 2	S ₁	947	4	5	1,74	4.682	7	7	95	3,89	7	7
	S ₂	679	4	4	1,91	3.660	6	6	100	3,79	5	5
	S ₃	268	4	6	1,35	1.022	6	6	85	4,10	6	6
WPTO 3	S ₁	997	2	4	1,50	3.873	6	5	87	3,67	6	6
	S ₂	744	3	5	1,56	2.781	3	3	81	3,62	3	3
	S ₃	253	1	2	1,37	1.092	3	3	99	3,77	2	2
WPTO 4	S ₁	955	3	4	1,45	3.714	6	6	77	3,53	5	5
	S ₂	744	3	5	1,59	3.081	4	3	81	3,59	4	4
	S ₃	211	4	3	1,14	634	4	3	67	3,41	3	3
WPTO 5	S ₁	1.028	3	5	1,34	3.022	6	6	80	3,47	5	5
	S ₂	883	3	5	1,51	2.604	3	3	89	3,74	4	3
	S ₃	145	4	5	0,99	417	3	3	60	2,87	2	2

Tabelle 5.15: Entscheidungstabelle WPTO – Szenario ζ_2

Szenario ζ_2 - Hohe Bedarfsentwicklung		Zuverlässigkeit	Technischer Aufwand	Anbindung an bestehende Wasserinfrastruktur	Spezifische Wasserkosten	Investitionsbedarf	Beitrag zur ökonomischen Entwicklung der Region	Gesellschaftliche Akzeptanz	Weitere negative Umweltwirkungen	Spezifische CO ₂ Emissionen	Kohärenz mit bestehenden politischen Vorhaben	Unabhängigkeit der Was- serversorgung und Was- serversorgungssicherheit
Alternative	Akteur	[km] ↓	[Likert] ↑	[Likert] ↑	[USD/m ³] ↓	[Mio. USD] ↓	[Likert] ↑	[Likert] ↑	[Punkte] ↓	[kg CO ₂ eq./m ³] ↓	[Likert] ↑	[Likert] ↑
WPTO 1	S ₁	937	5	5	1,67	6.128	5	5	72	3,71	5	5
	S ₂	762	5	5	1,85	4.884	3	2	75	4,11	3	2
	S ₃	175	5	5	1,33	1.245	3	3	66	2,94	3	3
WPTO 2	S ₁	947	4	5	1,80	7.740	7	7	95	4,63	7	7
	S ₂	679	4	4	2,04	6.003	6	6	100	4,77	5	5
	S ₃	268	4	6	1,32	1.737	6	6	85	4,36	6	6
WPTO 3	S ₁	997	2	4	1,52	6.231	6	5	89	3,21	6	6
	S ₂	744	3	5	1,60	4.455	3	3	84	3,44	3	3
	S ₃	253	1	2	1,37	1.776	3	3	99	2,76	2	2
WPTO 4	S ₁	955	3	4	1,48	5.930	6	6	78	3,99	5	5
	S ₂	744	3	5	1,66	4.805	4	3	84	4,18	4	4
	S ₃	211	4	3	1,14	1.126	4	3	67	3,63	3	3
WPTO 5	S ₁	828	3	5	1,39	6.395	6	6	82	2,96	5	5
	S ₂	683	3	5	1,61	5.569	3	3	94	3,01	4	3
	S ₃	937	5	5	1,67	6.128	5	5	72	3,71	5	5

Tabelle 5.16: Entscheidungstabelle WPTO – Szenario ζ₃

Szenario ζ 3- Konservative Bedarfsentwicklung		Zuverlässigkeit	Technischer Aufwand	Anbindung an bestehende Wasserinfrastruktur	Spezifische Wasserkosten	Investitionsbedarf	Beitrag zur ökonomischen Entwicklung der Region	Gesellschaftliche Akzeptanz	Weitere negative Umweltwirkungen	Spezifische CO ₂ Emissionen	Kohärenz mit bestehenden politischen Vorhaben	Unabhängigkeit der Was- serversorgung und Was- serversorgungssicherheit
Alternative	Akteur	[km] ↓	[Likert] ↑	[Likert] ↑	[USD/m ³] ↓	[Mio. USD] ↓	[Likert] ↑	[Likert] ↑	[Punkte] ↓	[kg CO ₂ eq./m ³] ↓	[Likert] ↑	[Likert] ↑
WPTO 1	S ₁	904	5	5	1,76	2.516	5	5	73	2,99	5	5
	S ₂	729	5	5	1,95	2.032	3	2	76	3,16	3	2
	S ₃	175	5	5	1,40	484	3	3	66	2,67	3	3
WPTO 2	S ₁	914	4	5	1,98	3.398	7	7	95	3,73	7	7
	S ₂	646	4	4	2,24	2.689	6	6	100	3,62	5	5
	S ₃	268	4	6	1,47	710	6	6	85	3,94	6	6
WPTO 3	S ₁	963	2	4	1,70	2.896	6	5	90	2,71	6	6
	S ₂	710	3	5	1,78	2.057	3	3	85	2,85	3	3
	S ₃	253	1	2	1,55	839	3	3	99	2,45	2	2
WPTO 4	S ₁	921	3	4	1,66	2.827	6	6	79	3,38	5	5
	S ₂	710	3	5	1,90	2.409	4	3	85	3,43	4	4
	S ₃	211	4	3	1,19	419	4	3	67	3,28	3	3
WPTO 5	S ₁	1.198	3	5	1,59	2.594	6	6	68	3,29	5	5
	S ₂	922	3	5	1,80	2.267	3	3	70	3,26	4	3
	S ₃	275	4	5	1,19	328	3	3	65	3,36	2	2

5.3.2.2 Aggregation mittels MAMCA-PROMETHEE

Die Alternativen wurden durch Aggregation der Entscheidungstabellen gemäß den Gleichungen (3.27)–(3.34) für jedes Szenario bewertet. Die Ergebnisse der Aggregation sind in Tabelle 5.17 dargestellt. Anhand des MAMCA Nettoflusses (ϕ^{net}) wird Alternative WPTO 5 in jedem der betrachteten Szenarien von allen Akteuren präferiert. Die Alternative WPTO 3 wird in allen Szenarien am schlechtesten bewertet.

Tabelle 5.17: Bewertung der Alternativen über alle Akteure anhand des MAMCA Nettoflusses

MAMCA Nettofluss ϕ^{net}	WPTO 1	WPTO 2	WPTO 3	WPTO 4	WPTO 5
Szenario ζ_1	-0,014	0,059	-0,215	-0,016	0,186
Szenario ζ_2	-0,065	0,058	-0,160	0,011	0,155
Szenario ζ_3	0,029	0,054	-0,139	0,002	0,056

Eine Aussage darüber, ob jeder einzelne der drei Akteure (Israel, Jordanien, Palästina) auch die Alternative WPTO 5 präferiert, lässt die alleinige Betrachtung des MAMCA Nettoflusses jedoch nicht zu. Zudem werden die Alternativen WPTO 2 und WPTO 5 in Szenario ζ_3 nahezu identisch bewertet. Deshalb sind in Abbildung 5.9 die Bewertungen der Alternativen nach PROMETHEE II für jeden Akteur und für jedes der Szenario gezeigt. Auf der horizontalen Achse sind für jedes der drei Szenarien die Akteure aufgeführt. Auf der vertikalen Achse sind die Nettoflüsse der Alternativen WPTO 1–WPTO 5 je Akteur ($\phi^{net,s}$) abgetragen.

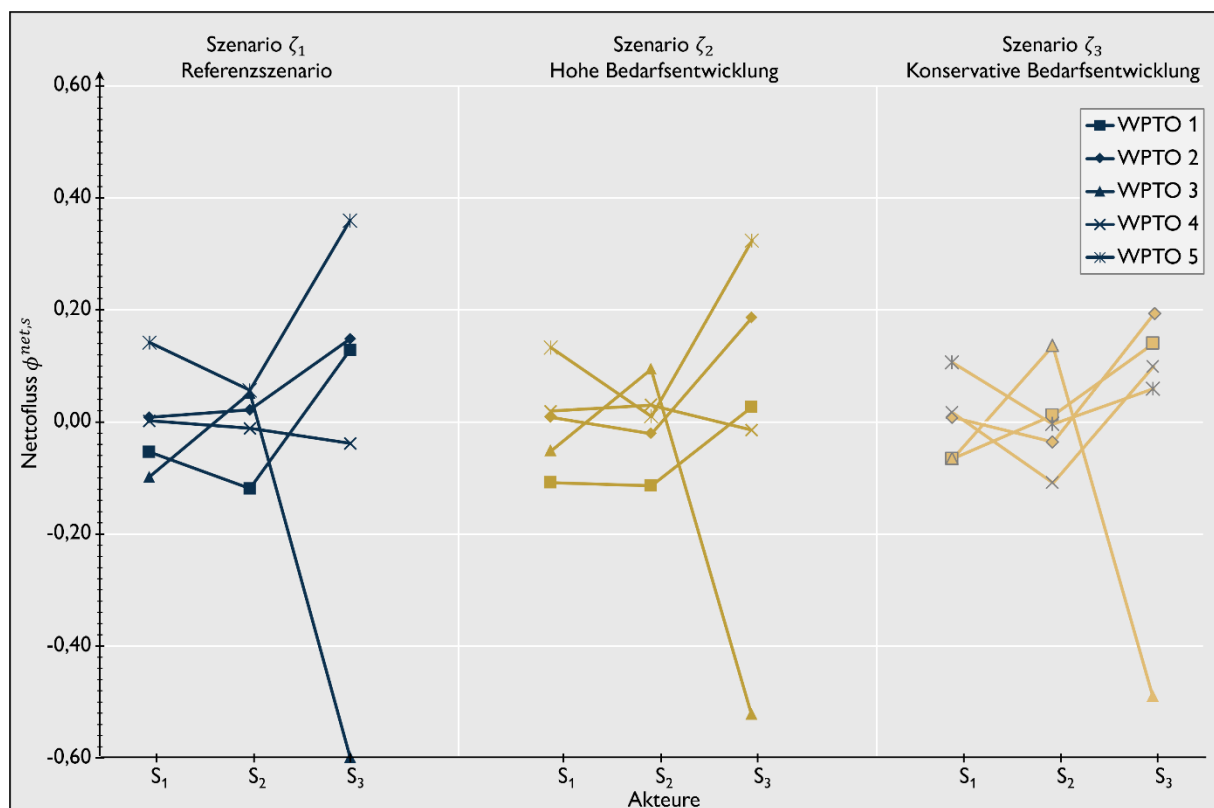


Abbildung 5.9: Ergebnisse der Bewertung nach PROMETHEE II – Nettoflüsse je Akteur

Quelle: Eigene Darstellung

Die Ergebnisse zeigen, dass es über alle Szenarien keine einheitlich präferierte Alternative gibt. Lediglich in Szenario ζ_1 wird Alternative WPTO 5 von allen Akteuren präferiert.

In Szenario ζ_2 weist Alternative WPTO 5 über alle Akteure zwar den höchsten MAMCA Nettofluss auf (vgl. Tabelle 5.17), jedoch wird nun ersichtlich, dass Akteur S_2 die Alternativen WPTO 3 und WPTO 4 in diesem Szenario deutlich gegenüber WPTO 5 präferiert. In Szenario ζ_3 verdeutlichen die Nettoflüsse der einzelnen Akteure ($\phi^{net,s}$), dass jeder Akteur eine unterschiedliche Alternative präferiert. So lässt sich auch der vergleichsweise niedrige MAMCA Nettofluss ϕ^{net} i. H. v. 0,056 für Alternative WPTO 5 und der geringe Abstand zur nächstbesten Alternative) in diesem Szenario erklären (WPTO 2 mit einem MAMCA Nettofluss ϕ^{net} i. H. v. 0,054).

Die Modellierung nach MAMCA mit akteurspezifischer Präferenzenerhebung bietet zudem die Möglichkeit einer detaillierteren Analyse. Durch die Betrachtung der Nettoflussbeiträge auf der Ebene einzelner Akteure können die Kriterien, die zu einer abweichenden Präferenz führen, identifiziert werden. Abbildung 5.10 zeigt die Nettoflussbeiträge ϕ_j^{net,s_2} von Akteur S_2 in Szenario ζ_2 . Die gewichtete Summe der Nettoflussbeiträge ergibt den Nettofluss der Alternativen für Akteur S_2 (ϕ^{net,s_2}).

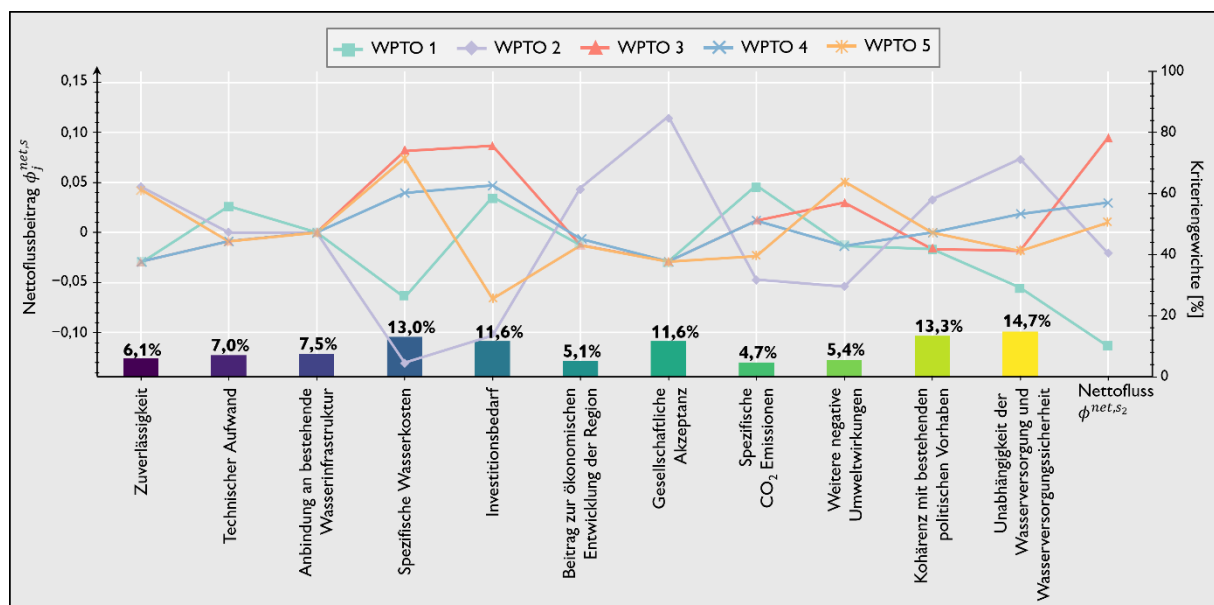


Abbildung 5.10: Nettoflussbeiträge Akteur S_2 (Jordanien) - Szenario ζ_2

Quelle: Eigene Darstellung

Für Alternative WPTO 5 wird so eine relativ schlechte Bewertung in den Kriterien „gesellschaftliche Akzeptanz“ und „Investitionsbedarf“ durch Akteur S_2 ersichtlich. Die Kriterien haben mit 11,6 % zudem eine vergleichsweise hohe Gewichtung. Auffallend ist, dass Alternative WPTO 5 beim ökonomischen Kriterium „spezifische Wasserkosten“ hingegen gut abschneidet. Zudem wird Alternative WPTO 2 im Kriterium „Unabhängigkeit der Wasserversorgung und Wasserversorgungssicherheit“, welches mit 14,7 % am stärksten gewichtet ist, deutlich besser bewertet.

Aus diesen Informationen ergeben sich Ansatzpunkte für die Initialisierung der Ergebnisdiskussion mit allen Akteuren oder mögliche Überarbeitungen der Alternativen. So könnte die, im Vergleich zu WPTO 2, geringere gesellschaftliche Akzeptanz aller anderen Alternativen darauf zurückzuführen sein, dass dabei insgesamt weniger Entsalzungskapazität in Jordanien installiert wird. Bei Alternative WPTO 2 wird das gesamte jordanische Süßwasserdefizit über die Entsalzungsanlage in Akaba gedeckt

(vgl. Abbildung 5.5), was die Autarkie der jordanischen Süßwasserversorgung erhöht. So erfüllt Alternative WPTO 2 die sozio-politischen Zielstellungen besser, ist zugleich aber auch schlechter in Bezug auf die umweltbezogenen Zielstellungen und unwirtschaftlicher, da die Größendegressionsvorteile einer transnationalen Lösung nicht genutzt werden können.

In diesem Zusammenhang fällt auf, dass Akteur S_3 (Palästina) in Szenario die ζ_3 die Alternative WPTO 2 aus ähnlichen Gründen, d. h. einer guten Bewertung hinsichtlich der sozio-politischen Kriterien, präferiert (vgl. Abbildung 5.11). Akteur S_1 (Israel) präferiert in allen Szenarien deutlich die Alternative WPTO 5.

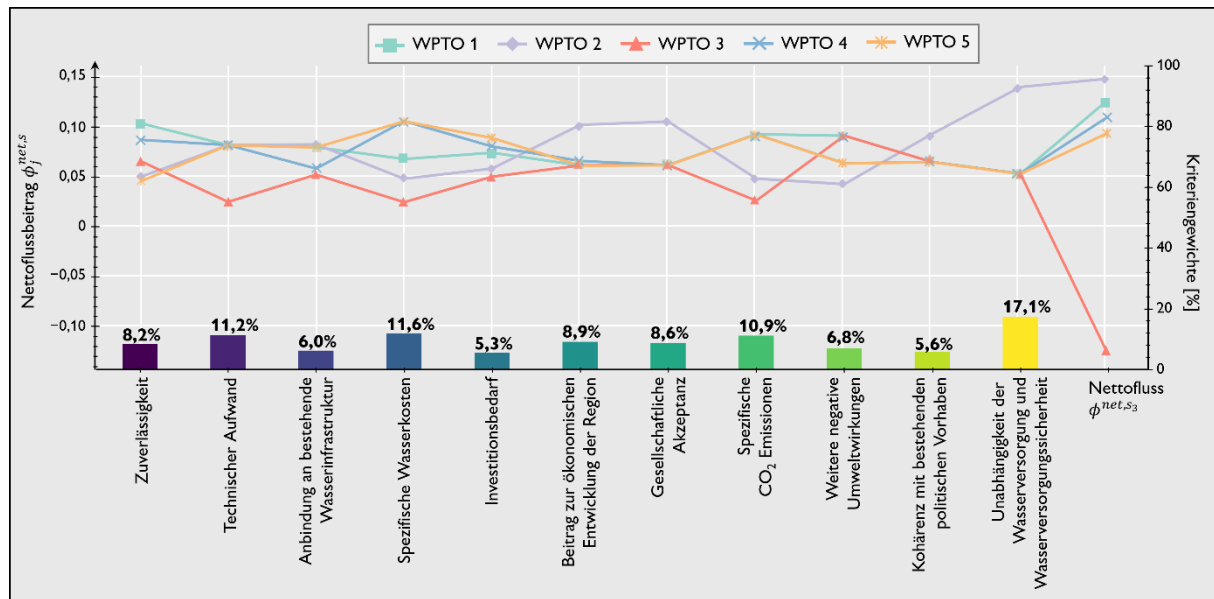


Abbildung 5.11: Nettoflussbeiträge Akteur S_3 (Palästina) – Szenario ζ_3

Quelle: Eigene Darstellung

Die oben dargestellten Präferenzen basieren auf der Aggregation nach PROMETHEE II und den Nettoflüssen. Eine differenziertere Bewertung der Alternativen ist anhand der PROMETHEE I Ausgangs- und Eingangsflüsse möglich. Die Ergebnisse der Aggregation nach PROMETHEE I sind in Abbildung 5.12 für alle betrachteten Szenarien dargestellt. Die Szenarien sind in den Zeilen abgetragen und die Bewertung der fünf Alternativen nach PROMETHEE I für einen bestimmten Akteur in den Spalten. Die Ausgangs- und Eingangsflüsse der Alternativen sind jeweils als gruppierte Balken visualisiert. Diese Art der Darstellung zeigt übersichtlich, dass nach PROMETHEE I in keinem Szenario eine einzige Alternative präferiert wird.

In Szenario ζ_1 und für Akteur S_1 weist Alternative WPTO 2 den höchsten Ausgangsfluss ϕ^+ auf, hat jedoch zugleich einen höheren Eingangsfluss ϕ^- , so dass diese Alternativen nach PROMETHEE I unvergleichbar sind. Alternative WPTO 5 hingegen wird allen weiteren Alternativen gegenüber präferiert. Für Akteur S_2 ist Alternative WPTO 2 in diesem Szenario ebenfalls mit allen weiteren Alternativen unvergleichbar. Die Alternativen WPTO 3 und WPTO 5 sind ebenfalls unvergleichbar und werden gegenüber den Alternativen WPTO 4 und WPTO 1 präferiert. Für den Akteur Palästina (S_3) wird ersichtlich, dass Alternative WPTO 3 von allen anderen Alternativen klar dominiert wird. Aus den Alternativen WPTO 1, 2, 4 und 5 lässt sich jedoch in keinem Szenario eine eindeutig präferierte Alternative ermitteln.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass die Alternativen insgesamt unterschiedliche Stärken und Schwächen aufweisen. Zudem unterscheiden sich die Bewertungsprofile der Alternativen teilweise deutlich

zwischen den Akteuren, z. B. die Alternativen WPTO 1 und 3 zwischen den Akteuren Jordanien und Palästina. Zur Ableitung von Handlungsempfehlungen sind daher insbesondere in Anbetracht der eng beieinander liegenden Bewertungen weitere Analysen sinnvoll.

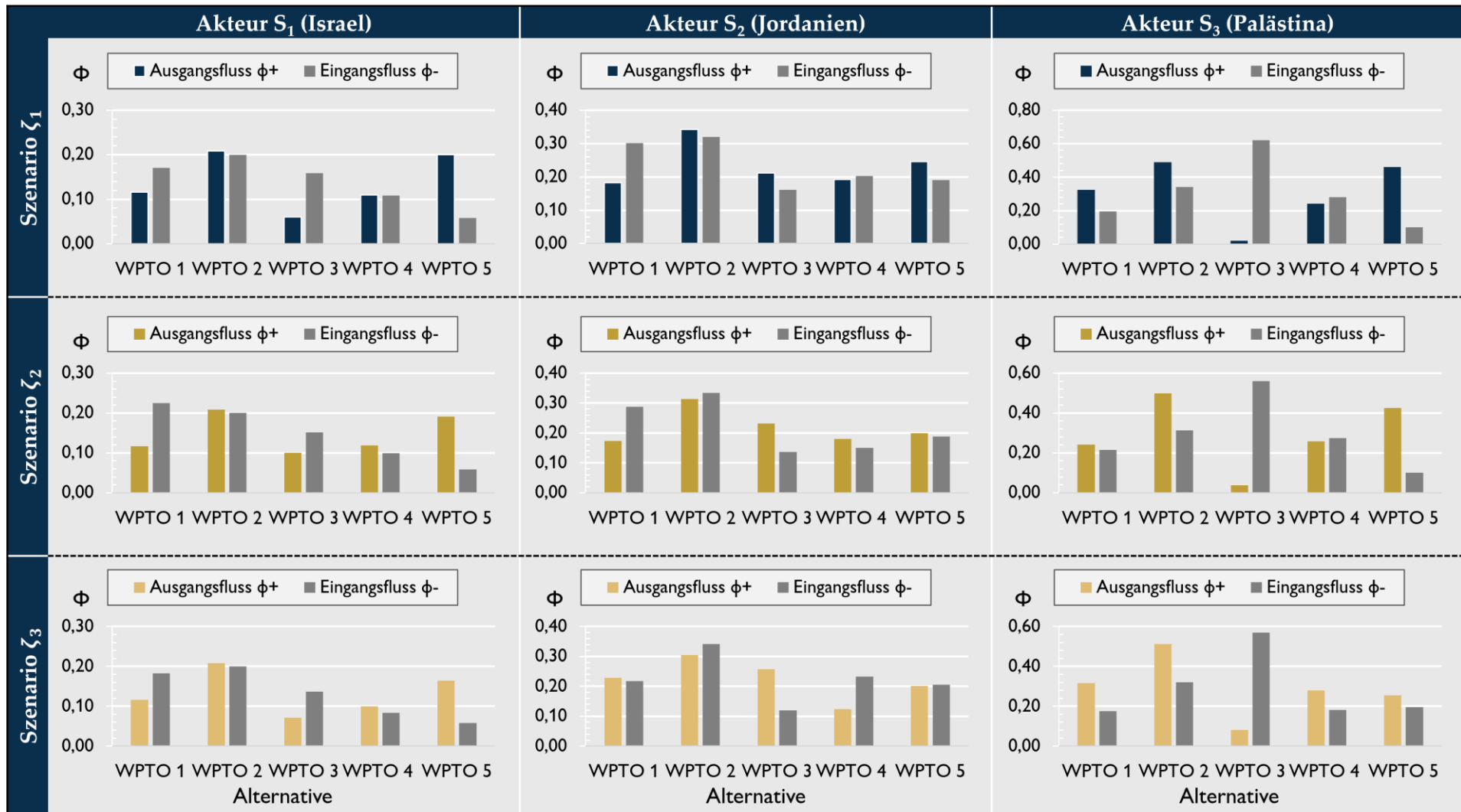


Abbildung 5.12: Aggregation nach PROMETHEE I für jedes Szenario und jeden Akteur

Quelle: Eigene Darstellung

5.4 Prospektive Analyse

Insgesamt haben die Ergebnisse aufgezeigt, dass keine Alternative klar erkennbar von allen Akteuren präferiert wird. Über alle Akteure, d. h. anhand des MAMCA Nettoflusses ϕ^{net} , wird Alternative WPTO 5 präferiert. Die Bewertung ist jedoch nicht eindeutig und unterscheidet sich zwischen den Akteuren. Die Akteure Israel und Palästina präferieren in den meisten Szenarien Alternative WPTO 5. Jordanien hingegen präferiert nach dem akteurspezifischen Nettofluss $\phi^{net,s}$ die Alternative WPTO 2. Die Analyse nach PROMETHEE I verdeutlichte die eng beieinanderliegende Bewertung vieler Alternativen und konnte keine dominierende Alternative offenbaren. Viele der Alternativen sind nach PROMETHEE I unvergleichbar.

Da die Ergebnisse nah beieinander liegen, kann Unsicherheit einen großen Einfluss auf die abgeleiteten Präferenzbeziehungen haben. Unsicherheit kann in das vorliegende Präferenzmodell aus verschiedenen Quellen einfließen (vgl. Abschnitt 3.3.3.4). Die Unsicherheit in Bezug auf das externe Entscheidungsumfeld wurde mit Hilfe der bereits vorgestellten Szenarien in einem gewissen Maße berücksichtigt. Weitere wesentliche Unsicherheiten bestehen hinsichtlich der Vollständigkeit und Eindeutigkeit der erhobenen Präferenzinformationen sowie der Stabilität der bislang festgestellten Präferenzrelationen. Unsicherheiten bei der Erhebung der Präferenzen werden deshalb mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen überprüft. Die Stabilität der bislang aufgestellten Präferenzrelationen kann durch die Genauigkeit der ermittelten Kriterienausprägungen beeinflusst werden. Die Ergebnisse der Aggregation werden deshalb ebenfalls hinsichtlich dieser Unsicherheiten mittels stochastischer Verfahren analysiert, um die Robustheit der Ergebnisse im Sinne einer Verlässlichkeit unter sich ändernden Modellparametern zu bewerten.

Die Analyse kann sich jedoch nur auf solche Aspekte und Unsicherheiten erstrecken, die während der Modellerstellung wahrgenommen werden. Die Unsicherheit über das Unvorstellbare kann nicht quantifiziert oder modelliert werden (French 1995). Im vorliegenden Entscheidungskontext ist sie aufgrund dessen Komplexität und langfristigen Charakters jedoch von essentieller Bedeutung für die Entscheidungstragenden und die nachhaltige Umsetzung von Alternativen. Die Analyse wird daher, gegenüber dem allgemeinen Ablauf von MCDA Verfahren, um prospektive Elemente ergänzt. Die prospektiven Elemente umfassen die Formulierung eines Handlungsplans und ergänzende digitale Werkzeuge, welche den Entscheidungstragenden die Möglichkeit geben, auf unerwartete Entwicklungen und bisher unbekannte Einflussfaktoren oder externe Schocks zu reagieren und gegebenenfalls eine Neubewertung der Alternativen durchzuführen.

5.4.1 Sensitivitäts- und Robustheitsanalysen

Mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen wird überprüft, wie die Ergebnisse der Aggregation nach MAMCA-PROMETHEE auf variierende Eingangsdaten für das Entscheidungsmodell reagieren. Bei den variablen Eingangsdaten handelt es sich in erster Linie um Präferenzinformationen, deren Variation durch Unsicherheiten begründet ist. Zudem zeigte sich in Gesprächen mit den Entscheidungstragenden, dass die modellierten Gewichte der ökonomischen Kriterien in Unwucht zu ihrer tatsächlichen Bedeutung stehen könnten. Aus diesem Grund wird ebenfalls eine Gegenüberstellung der ökonomischen Folgen einer Alternative und ihrer Bewertung hinsichtlich aller weiteren Kriterien vorgenommen.

Weitere variable Eingangsdaten für die Aggregation sind die Kriterienausprägungen. Die Kriterienausprägungen hinsichtlich der technischen, ökonomischen, sozialen, umweltbezogenen und politischen Ziele unterliegen insbesondere zu frühen Planungsphasen einem gewissen Maß an Unsicherheit. Je nach Instanz der verwendeten Kriterienausprägungen können die Ergebnisse der Aggregation nach

PROMETHEE daher voneinander abweichen. Dies betrifft sowohl die Bewertungen der Alternativen anhand der PROMETHEE Flüsse, als auch die basierend darauf erhaltenen Rangordnungen und Präferenzrelationen. Es wird daher sowohl die Sensitivität innerhalb der einzelnen Akteure auf Änderungen in den Präferenzinformationen untersucht, als auch die Stabilität der erhaltenen Präferenzrelationen mittels einer Extremranganalyse überprüft. Zudem werden die Ergebnisse auf die Anfälligkeit gegenüber dem Phänomen der Rangumkehr überprüft.

5.4.1.1 Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen

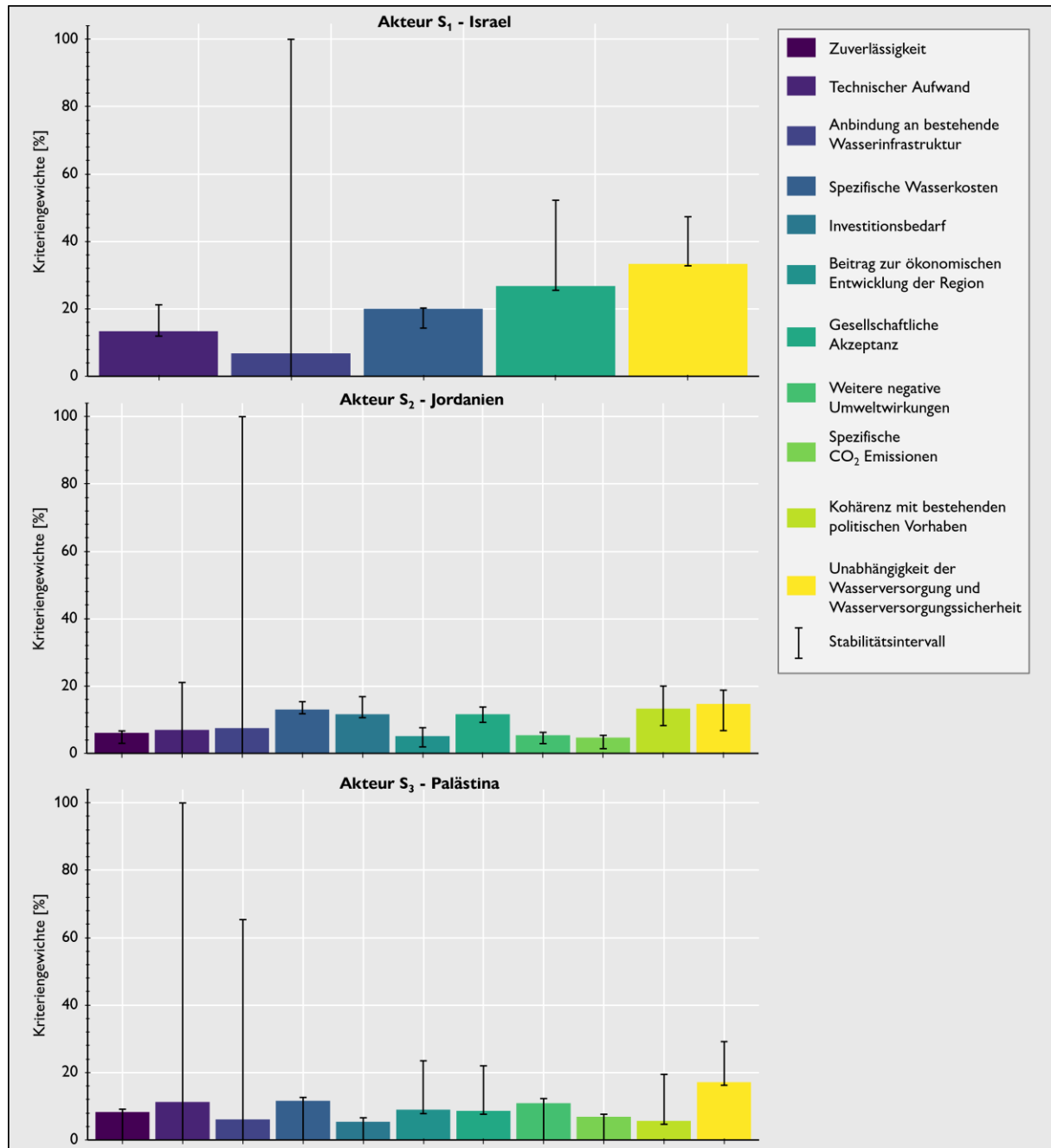


Abbildung 5.13: Stabilitätsintervalle der Kriteriengewichte je Akteur – Szenario ζ_1

Es wird zunächst untersucht, wie die Ergebnisse auf Änderungen in den Kriteriengewichten reagieren. Dies gibt Aufschluss darüber, bei welchen Akteuren und Kriterien Unsicherheiten einen großen Einfluss auf die ermittelten Präferenzrelationen haben. Die Stabilitätsintervalle der Kriteriengewichte aller

Akteure für das Szenario ζ_1 sind in Abbildung 5.13 dargestellt. Die Höhe der gefärbten Balken repräsentiert die ursprünglichen Gewichte der Kriterien. Die schwarzen Linien verdeutlichen den Bereich, in welchem eine Änderung des entsprechenden Gewichts zu keiner Änderung in den Präferenzrelationen nach PROMETHEE II führt (Mareschal 1988). Alle gezeigten Abbildungen wurden mit Hilfe der Software *PROMETHEE-Cloud* erstellt (Pohl 2023).

Es ist ersichtlich, dass bei einigen Kriterien bereits eine kleine Änderung der Gewichtung zu einer Änderung der Rangordnung führt. So reagiert die Bewertung für Akteure S_2 und S_3 besonders sensitiv hinsichtlich der Gewichtung der umweltbezogenen Kriterien und hinsichtlich des Kriteriums „Zuverlässigkeit“. Zudem haben für Akteur S_2 bereits geringfügige Änderungen in der Gewichtung des Kriteriums „spezifische Wasserkosten“ einen Einfluss auf die PROMETHEE II Präferenzrelationen. Stabilitätsintervalle, welche das gesamte Intervall von 0–100 % umfassen, indizieren, dass die Gewichtung dieser Kriterien keinen Einfluss auf das Ergebnis hat. Dies betrifft für die Akteure S_1 und S_2 das Kriterium „Anbindung an bestehende Wasserinfrastruktur“ und für Akteur S_3 das Kriterium „Technischer Aufwand“. Diese Kriterien können als nicht entscheidungsrelevant betrachtet werden. Akteur S_1 hat gegenüber den weiteren Akteuren insgesamt weniger Kriterien als entscheidungsrelevant erachtet und kein umweltbezogenes Kriterium inkludiert. Hier reagiert die Rangordnung besonders sensitiv auf veränderte Gewichtungen im Kriterium „spezifische Wasserkosten“. Das Stabilitätsintervall reicht bei diesem Kriterium von 14,3 bis 20,3 %.

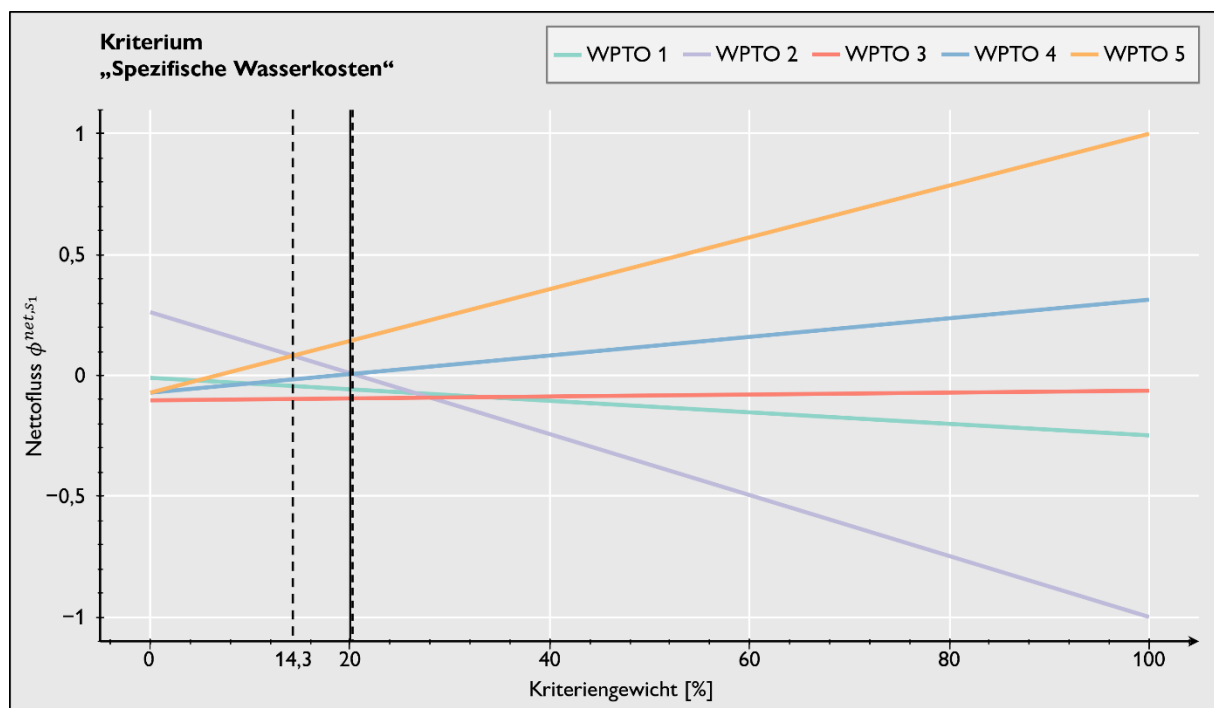


Abbildung 5.14: Insensitivitätsintervall für das Kriterium "Spezifische Wasserkosten" – Szenario ζ_1

Die Implikationen der Stabilitätsintervalle auf die Rangordnungen werden durch Betrachtung der Insensitivitätsintervalle erkennbar. Insensitivitätsintervalle bieten gegenüber den Stabilitätsintervallen detailliertere Informationen auf Ebene einzelner Kriterien. Abbildung 5.14 zeigt das Insensitivitätsintervall für das Kriterium „spezifische Wasserkosten“ des Akteurs S_1 (Israel) im Referenzszenario. Die durchgängige senkrechte Linie stellt die ursprüngliche Kriteriengewichtung dar, die punktierten senkrechten Linien das Stabilitätsintervall. Der Akteur S_1 präferiert bei einer Gewichtung kleiner als 14,3 % die Alternative WPTO 2 gegenüber der ursprünglich präferierten Alternative WPTO 5. Übersteigt das Gewicht des Kriteriums „spezifische Wasserkosten“ den Wert von 20,3 %, wird Alternative WPTO 4

gegenüber WPTO 2 präferiert. Der Rang der Alternative WPTO 5 bleibt unverändert und sie wird weiterhin allen anderen Alternativen gegenüber vorgezogen.

Die Insensitivitätsintervalle der Akteure S_2 und S_3 für die umweltbezogenen Kriterien sind in Abbildung 5.15 zusammenfassend dargestellt. Die beiden Darstellungen im oberen Teil der Abbildung beziehen sich auf die Kriteriengewichte des Akteurs S_2 und die beiden unteren auf die Gewichte von Akteur S_3 . Es ist zu sehen, dass bereits eine geringfügige Erhöhung der Gewichtung des Kriteriums „spezifische CO₂ Emissionen“ von 4,7 % auf 5,4 % zu einer Präferenz von Alternative WPTO 3 gegenüber WPTO 5 für den Akteur S_2 (Jordanien) führt. Analog hätte eine Erhöhung der Gewichtung des Kriteriums „weitere negative Umweltwirkungen“ von ursprünglich 5,4 % auf 6,3 % den gleichen Effekt. Die Insensitivitätsintervalle für den Akteur S_3 reichen jeweils bis zu einer Gewichtung von 0 %, d. h. lediglich Erhöhungen der Kriteriengewichte können zu Veränderungen in der Rangfolge führen. Gegenüber dem Akteur S_2 zeigt eine Betrachtung der Insensitivitätsintervalle jedoch, dass veränderte Gewichtungen der umweltbezogenen Kriterien zu keiner Änderung der Alternative auf dem ersten Rang führen. Akteur S_3 präferiert bei allen möglichen Kriteriengewichtungen der umweltbezogenen Kriterien die Alternative WPTO 5 allen anderen Alternativen gegenüber (gemäß PROMETHEE II).

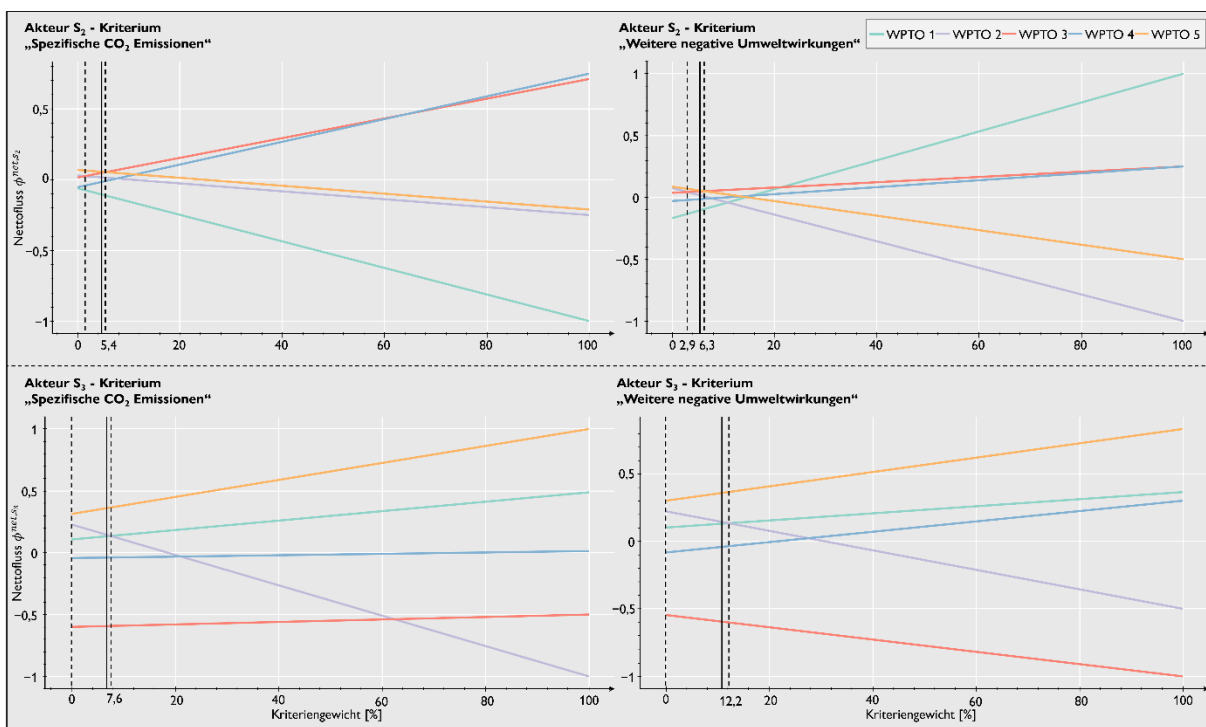


Abbildung 5.15: Insensitivitätsintervalle für die umweltbezogenen Kriterien der Akteure S_2 und S_3 – Szenario ζ_1

Um die Sensitivität hinsichtlich der ökonomischen Kriterien zu untersuchen, wurden in einer weiteren Sensitivitätsanalyse die ökonomischen Kriterien aus dem Nettofluss herausgerechnet. Eine grafische Gegenüberstellung der ökonomischen Kriterien und Nettoflüsse visualisiert schließlich das Verhältnis zwischen den Kosten einer Alternative gegenüber ihrer sonstigen Zielerreichung.

Die Abbildung 5.16 enthält hierzu drei Diagramme, eines für jeden der betrachteten Akteure. Auf der horizontalen Achse sind jeweils die spezifischen Wasserkosten der fünf betrachteten Alternativen ablesbar. Auf der vertikalen Achse eines Diagrammes sind jeweils die Nettoflüsse der Alternativen für einen Akteur, bezeichnet $\phi^{net,s}$, abgetragen. Jedes Diagramm enthält die Bewertungen über alle Szenarien, wobei die Szenarien farblich gekennzeichnet sind. Die fünf Alternativen sind durch unterschiedliche Markierungen indiziert.

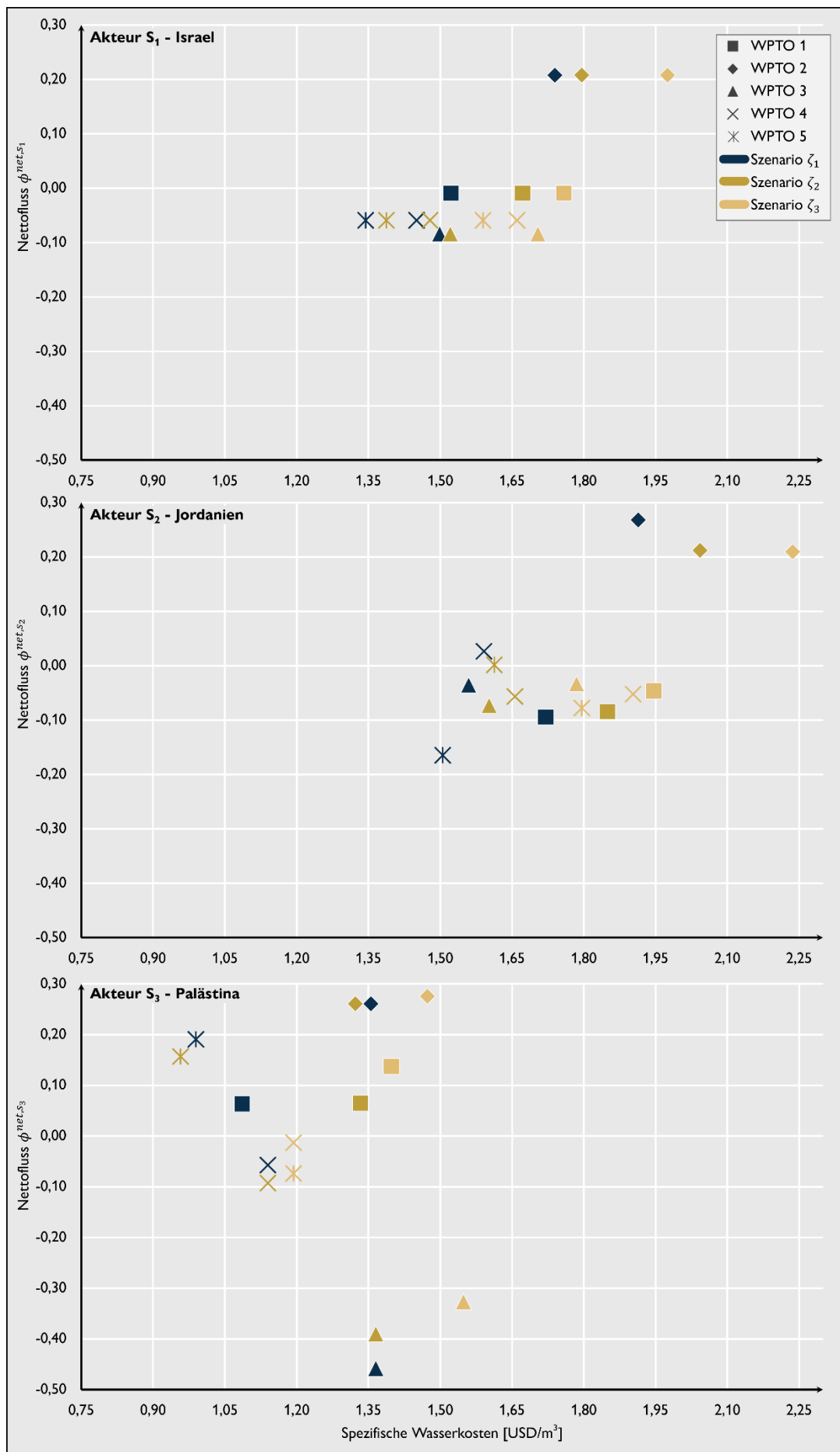


Abbildung 5.16: Gegenüberstellung Nettoflüsse je Akteur und spezifische Wasserkosten

Zur Berechnung der Nettoflüsse wurden die Kriteriengewichte der ökonomischen Kriterien auf den Wert 0 gesetzt und die verbleibenden Kriterien entsprechend normalisiert. Je weiter links und höher eine Alternative abgetragen ist, desto günstiger und besser bewertet ist sie. Die Gegenüberstellung der Nettoflüsse und spezifischen Wasserkosten zeigt, dass ohne Berücksichtigung der spezifischen Wasserkosten die Alternative WPTO 2 von allen Akteuren und in jedem Szenario am besten bewertet wird. Zugleich ist die Alternative WPTO 2 für die Akteure S_1 und S_2 mit den höchsten spezifischen Wasserkosten verbunden. So sind für keinen Akteur Pareto-Alternativen erkennbar, d. h. Alternativen, die sowohl den höchsten Nettofluss, als auch die geringsten spezifischen Wasserkosten aufweisen. Für den Akteur Palästina (S_3) ist die Alternative WPTO 5 in den Szenarien ζ_1 und ζ_2 die günstigste Alternative und hinsichtlich der weiteren Kriterien nur geringfügig schlechter bewertet als Alternative WPTO 2.

5.4.1.2 Robustheit der Präferenzrelationen

Um die Auswirkungen von Unsicherheiten in den Kriterienausprägungen auf die Stabilität der Bewertung zu berücksichtigen, wurden Monte-Carlo-Simulationen zur Variation der Kriterienausprägungen durchgeführt. Die Monte-Carlo-Simulation bildet randomisierte Stichproben gegebener Eingangsdaten. In diesem Fall wurden insgesamt 1.000 verschiedene Entscheidungstabellen erzeugt und anschließend nach MAMCA-PROMETHEE aggregiert. In jedem der 1.000 Berechnungsläufe variieren die Kriterienausprägungen dabei um bis zu 10 %. Zur Randomisierung der Entscheidungstabellen wurde eine Gleichverteilung verwendet. Alle anderen Parameter des Entscheidungsmodells bleiben in den Berechnungsläufen konstant. Abbildung 5.17 zeigt die Ergebnisse der Aggregation für die fünf Alternativen WPTO 1 bis WPTO 5. Die Szenarien ζ_1 bis ζ_3 wurden separat untersucht, so dass für jedes Szenario 1.000 Berechnungsläufe durchgeführt wurden. Im Diagramm für jedes Szenario sind die Alternativen gegenüber dem MAMCA Nettofluss, d. h. der Aggregation über alle Akteure, als Violinen-Diagramm abgetragen. Je breiter sich der Körper auf der Horizontalen ausdehnt, desto häufiger hat eine Alternative eine auf der Vertikalen abgetragene Bewertung erreicht. Die obere und untere Spitze eines Körper stellen die Bandbreite der Bewertungen einer Alternative dar. Die punktierten Linien zeigen das 25 %, 50 % und 75 %-Quartil.

Es ist zu sehen, dass Alternative WPTO 3 in allen Szenarien am schlechtesten bewertet wird. Im Median liegt die Bewertung dieser Alternative deutlich unter denen der übrigen Alternativen. Alternative WPTO 2 und WPTO 5 werden im Szenario ζ_1 ähnlich bewertet, wobei die Bewertungen von WPTO 5 sich stärker um den Median verteilen, aber gegenüber WPTO 2 auch eine größere Bandbreite nach unten aufweisen. Die Ergebnisse für Szenario ζ_2 sind ähnlich zu denen für Szenario ζ_1 . In den Ergebnissen für Szenario ζ_3 fällt auf, dass die Alternativen WPTO 1, 4 und 5 ähnlich bewertet werden. Im direkten Vergleich hat WPTO 5 eine erkennbar geringere Bandbreite in den Bewertungen. Ebenso fällt auf, dass Alternative WPTO 2 in diesem Szenario über alle Berechnungsläufe eindeutig besser bewertet wird als WPTO 5.

Die mittels der Monte-Carlo-Simulationen erzielten Ergebnisse helfen, die Robustheit der multikriteriellen Bewertung über alle Akteure zu beurteilen. Bei einer Aggregation auf Grundlage der in den Entscheidungstabellen Tabelle 5.14 bis Tabelle 5.16 gezeigten Kriterienausprägungen wurde Alternative WPTO 5 in allen Szenarien, teils deutlich, gegenüber den anderen Alternativen präferiert (vgl. Tabelle 5.17). Unter Annahme eines gewissen Unsicherheitsniveaus in den Kriterienausprägungen zeigt sich die Alternative WPTO 2 jedoch robuster gegenüber der Alternative WPTO 2.



Abbildung 5.17: Bewertung nach MAMCA-PROMETHEE mit veränderten Kriterienausprägungen

Um den Einfluss von Änderungen der Kriteriengewichte zu analysieren, wurden zudem Monte-Carlo-Simulationen auf den Kriteriengewichten durchgeführt. Abbildung C.1 im Anhang visualisiert die Bewertung nach MAMCA-PROMETHEE mit veränderten Kriteriengewichten anhand von Violinen-Diagrammen. Es wurden ebenfalls 1.000 gleichverteilte Stichproben für die Kriteriengewichte der Akteure erzeugt, die eine Variation der bestehenden Kriteriengewichte um bis zu 10 % pro Kriterium vornehmen. Die Variation bedeutet in diesem Fall eine Multiplikation der bisherigen Kriteriengewichte mit einem Faktor im Bereich 0,9–1,1 und nicht eine absolute Erhöhung der Gewichte, z. B. von 10 % auf 20 %. Die variierten Kriteriengewichte wurden vor Eingabe in die Aggregationsprozedur normalisiert, so dass sie weiterhin in Summe 1 ergeben und somit den Bedingungen von PROMETHEE genügen (vgl. Gleichung 3.5). Die Kriterienausprägungen sind in diesem Fall konstant gehalten und wie in den Entscheidungstabellen zuvor aufgezeigt.

Die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation auf den Kriteriengewichten zeigen, dass die Bewertungen in den Szenarien ζ_1 und ζ_2 robust gegenüber geringfügigen Änderungen in den Kriteriengewichten sind. Die breite horizontale Ausdehnung der Körper bei den Alternativen WPTO 1 und WPTO 4 zeigt zudem, dass diese Alternativen eine geringe Streuung in der Bewertung aufweisen. In Szenario ζ_3 liegen die Bewertungen der Alternativen WPTO 2 und 5 weiterhin dicht beieinander, wobei die Bewertungen von WPTO 2 eine größere Bandbreite aufweisen. Der Vergleich der beiden durchgeführten Monte-Carlo-Simulationen zeigt, dass eine Unsicherheit von 10 % in den Kriterienausprägungen einen stärkeren Effekt auf die Bewertung gegenüber einer zehnpromzentigen Unsicherheit in den Kriteriengewichten hat.

Aufgrund der ähnlichen Bewertung der Alternativen WPTO 2 und WPTO 5 empfiehlt sich zudem die Robustheit der erstellten Präferenzrelationen gegenüber dem Phänomen der Rangumkehr zu überprüfen. Rangumkehr kann bei Outranking Verfahren durch Hinzufügen oder Entfernen einer Alternative auftreten und die erlangten Präferenzrelationen verändern. In diesem Fall wurden die Präferenzrelationen der Alternativen WPTO 2 und WPTO 5 auf Rangumkehr überprüft. Hierzu wurde die durch Verly und De Smet (2013) definierte Schranke für das Vorliegen von Rangumkehr in den PROMETHEE Methoden für die in Tabelle 5.17 gezeigten ursprünglichen Bewertungen und alle Berechnungsläufe der Monte-Carlo-Simulation (Abbildung 5.17) für jedes Szenario berechnet. Die Ergebnisse dieser Analyse zeigen, dass die erlangten Präferenzrelationen anfällig für Rangumkehr sind:

- In Szenario ζ_1 kann Rangumkehr zwischen WPTO 2 und WPTO 5 im ursprünglichen Berechnungslauf auftreten. In den Berechnungsläufen der Monte-Carlo-Simulation mit veränderten Kriterienausprägungen kann Rangumkehr in 1.000 von 1.000 Fällen auftreten.
- In Szenario ζ_2 kann Rangumkehr zwischen WPTO 2 und WPTO 5 im ursprünglichen Berechnungslauf auftreten. In den Berechnungsläufen der Monte-Carlo-Simulation mit veränderten Kriterienausprägungen kann Rangumkehr in 1.000 von 1.000 Fällen auftreten.
- In Szenario ζ_3 kann Rangumkehr zwischen WPTO 2 und WPTO 5 im ursprünglichen Berechnungslauf auftreten. In den Berechnungsläufen der Monte-Carlo-Simulation mit veränderten Kriterienausprägungen kann Rangumkehr in 958 von 1.000 Fällen auftreten.

Die bislang durchgeführten Robustheitsanalysen beziehen sich auf die MAMCA Nettoflüsse ϕ^{net} und somit auf die Ergebnisse der Aggregation über alle Akteure. Während der MAMCA Nettofluss geeignet ist, um globale Präferenzen zu ermitteln, erlaubt er keine Analyse der unterschiedlichen Auswirkungen von Unsicherheiten auf die ermittelten Präferenzen einzelner Akteure. Dies ist mittels Betrachtung der akteursspezifischen Nettoflüsse $\phi^{net,s}$ möglich.

Akteur	Szenario ζ_1 („Referenzszenario“)					Szenario ζ_2 („Hohe Bedarfsentwicklung“)					Szenario ζ_3 („Konservative Bedarfsentwicklung“)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
S_1 Israel	13	735	11	35	206	0	778	21	33	168	19	786	27	39	129
S_2 Jordanien	3	398	154	263	182	1	205	319	370	105	58	274	512	74	82
S_3 Palästina	87	3	0	0	910	0	69	0	0	931	266	653	0	79	2

Abbildung 5.18: Extremranganalyse der WPTO mit veränderten Kriterienausprägungen

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 5.18 visualisiert die Ergebnisse der Extremranganalyse mit veränderten Kriterienausprägungen auf Ebene der einzelnen Akteure. Die Eingangsdaten, d. h. die Entscheidungstabellen und weitere Parameter, sind identisch zu der in Abbildung 5.17 gezeigten Analyse. Die Abbildung verdeutlicht für jedes der drei Szenarien die nach den akteurspezifischen Nettoflüssen $\phi^{net,s}$ präferierten Alternativen mit den Eingangsdaten der Monte-Carlo-Simulation. Die Zahlenwerte in jeder Zelle geben an, in wie vielen der 1.000 Berechnungsläufe ein Akteur in einem Szenario die jeweilige Alternative präferiert. Eine dunklere Zellenfarbe indiziert zudem eine häufigere Präferenz über die Berechnungsläufe. Diese Art, die Ergebnisse der MAMCA zu visualisieren, ist eine Neuerung. Sie ergänzt die zuvor präsentierte Darstellung, da zusätzlich zu den insgesamt präferierten Alternativen eventuelle Divergenzen zwischen den Akteuren verdeutlicht werden. So präferiert der Akteur S_1 im ersten Szenario unter 735 von 1.000 Aggregationen mit unterschiedlichen Kriterienausprägungen die Alternative WPTO 2. Für die Szenarien ζ_2 und ζ_3 zeigen sich für diesen Akteur ähnliche Ergebnisse. Bei Akteur S_2 hat die Unsicherheit in den Kriterienausprägungen einen höheren Einfluss auf die insgesamt präferierte Alternative. Je nach Szenario wird entweder WPTO 2, WPTO 3 oder 4 am häufigsten dem ersten Rang zugeordnet. Bei Akteur S_3 ist die Präferenz stark abhängig vom Szenario. In den Szenarien ζ_1 und ζ_2 wird WPTO 5 eindeutig am häufigsten präferiert, während diese Alternative im Szenario ζ_3 nur noch in 2 Läufen den ersten Rang belegt und sonst die Alternative WPTO 2 oftmals präferiert wird.

5.4.2 Erstellung eines prospektiven Handlungsplans

Der Schwerpunkt der SALAM-Initiative lag auf der Entwicklung des regionalen Wasserversorgungssystems. Um das prognostizierte Süßwasserdefizit der Region bis in das Jahr 2050 zu decken, wurden verschiedene Lösungsansätze zur Erweiterung und für den Betrieb des regionalen Wasserressourcensystems erarbeitet. Der Forschungsansatz der SALAM-Initiative bestand dabei in der Konzeptionierung und dem Vergleich der Alternativen, um den beteiligten Akteuren der Region Entscheidungsunterstützung in Form von Handlungsempfehlungen zu bieten. Die Schritte der tatsächlichen Entscheidung für eine Handlungsalternative, deren Implementierung und die Kontrolle deren Konsequenzen waren nicht Bestandteil der SALAM-Initiative (vgl. Rusteberg et al. 2022b). In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der zuvor durchgeführten Aggregation und weiteren Analysen zusammengefasst und diskutiert, um die Stärken und Schwächen der Alternativen zu erörtern und Handlungsempfehlungen abzuleiten.

Die Ableitung von Handlungsempfehlungen ist in diesem Planungsstadium jedoch nur unter Vorbehalt möglich. Für das behandelte Entscheidungsproblem hat die Analyse gezeigt, dass die Bewertung sensitiv auf Änderungen in den Kriterienausprägungen und den Kriteriengewichten reagiert. Da die Aggregation des Entscheidungsmodells mit vorläufigen Daten aus einer frühen Planungsphase durchgeführt wurde, sind zusätzliche Daten aus späteren Phasen des Planungsprozesses erforderlich, um das erhaltene Präferenzmodell zu bestätigen, zu verfeinern und weitere Schlussfolgerungen daraus abzuleiten. Den Entscheidungstragenden wird daher ex-ante weitere Entscheidungsunterstützung geboten, auf welche sie in weiteren Phasen der Implementierung zurückgreifen können. Dies geschieht im Wesentlichen durch zwei Prozessschritte des in dieser Arbeit entwickelten MCDA Verfahrens (vgl. Abschnitt 4.3). Die Prozessschritte umfassen die Formulierung eines prospektiven Handlungsplans und Bereitstellung ergänzender digitale Werkzeuge und eine eventuelle Neubewertung und Adaptation der Handlungsstrategie. Ein prospektiver Handlungsplan formuliert über den Planungshorizont sequenzielle Implementierungsschritte und Maßnahmen, um die entwickelten und bewerteten Alternativen an externe Entwicklungen anpassen und gegebenenfalls neu bewerten zu können (vgl. Brans et al. 1998; Brans et al. 2002).

5.4.2.1 Diskussion der Ergebnisse und Ableitung von Handlungsempfehlungen

Auf Grundlage der durchgeführten Aggregation und Analyse wird ersichtlich dass die Alternativen WPTO 2 und WPTO 5 insgesamt am stärksten präferiert werden. Zudem zeigen sich leichte Unterschiede zwischen den Präferenzen der beteiligten Akteure und der Bewertung der Alternativen innerhalb der untersuchten Szenarien.

Das Konzept der Alternative WPTO 2 basiert auf einer Deckung der Süßwasserdefizite im Westjordanland aus einer Meerwasserentsalzungsanlage in Gaza, während das gesamte jordanische Süßwasserdefizit durch MWE am Roten Meer gedeckt wird. Das Konzept der Alternative WPTO 5 ist darauf ausgelegt, die techno-ökonomischen Vorteile einer grenzüberschreitenden Süßwasserversorgung zu maximieren. Durch die angestrebte Kostenreduktion werden zugleich einige als wichtig erachtete umweltbezogene Wirkungen, wie die spezifischen CO₂ Emissionen, verringert. Insgesamt werden in diesem Konzept vier Entsalzungsanlagen an verschiedenen Standorten integriert. Zudem kann durch Integration einer Wasserkraftanlage in diesem Konzept Energie zurückgewonnen und weitere Kosten eingespart werden.

In den Kriterienausprägungen wird ersichtlich, dass die Alternative WPTO 2 mit vergleichsweise hohen Kosten und negativen Umweltwirkungen verbunden ist, zugleich jedoch eine hohe gesellschaftliche und politische Akzeptanz erfährt. Die höheren Kosten und Umweltwirkungen dieser Alternative sind vor allem durch die Errichtung und den Betrieb der notwendigen Förderinfrastruktur bedingt. Zur Förderung des Wassers, sowohl von der Entsalzungsanlage Gaza in das nördliche Gebiet Palästinas, als auch von Akaba in die stark defizitären Gebiete im Norden Jordaniens ist aufgrund der Topographie ein erheblicher Energieaufwand notwendig. Insbesondere für den Akteur Jordanien ist dies mit hohen Kosten verbunden, was sich negativ auf die Gesamtbewertung auswirkt. Eine Betrachtung der Nettoflüsse je Akteur (Abbildung 5.9) zeigt, dass der Akteur Jordanien in zwei der drei untersuchten Szenarien die Alternative WPTO 3 am stärksten präferierte. Zugleich schnitt diese über alle Akteure und Szenarien insgesamt am schlechtesten ab. Diese auffällige Diskrepanz lässt sich dadurch erklären, dass die Alternative WPTO 3 mit vergleichsweise geringen spezifischen Wasserkosten für Jordanien verbunden ist, während durch die teilweise Versorgung über Akaba ein gewisser Autarkiegrad erhalten bleibt.

Die Präferenzrelationen sind sehr sensitiv hinsichtlich der ökonomischen und umweltbezogenen Kriterien (vgl. Abschnitt 5.4.1.1). Zusätzlich können Unsicherheiten in den Kriterienausprägungen eine hohe

Auswirkung auf die Ergebnisse der MCDA haben (vgl. Abschnitt 5.4.1.2) und erlauben an diesem Punkt der Analyse keine eindeutige Aussage über die Präferenz zwischen den Alternativen WPTO 2 und 5. Es erscheint daher sinnvoll, die Menge der Alternativen zunächst weiter einzuschränken und anschließend mit den Entscheidungstragenden anhand der im Rahmen dieser Analyse identifizierten Ansatzpunkte zu überarbeiten, um möglichst zeitnah eine Lösung umsetzen können. Konkret ist folgendes Vorgehen kurzfristig, d. h. über die nächsten Monate, zu empfehlen:

- Die Erarbeitung von konkreten Maßnahmen zur Umsetzung der grenzüberschreitenden Wasserinfrastrukturalternativen WPTO 2 und WPTO 5.
- Dies umfasst die Einholung von Finanzierungshilfen und Ausgestaltung von vertraglichen Vereinbarungen zwischen den Akteuren für grenzüberschreitende Lösungen, um die Zielsynergien hinsichtlich der ökonomischen und umweltbezogenen Ziele dieser Alternativen zu nutzen. Insbesondere sollten Betriebskonzepte und Abkommen erarbeitet werden, welche die Kostenvorteile grenzüberschreitender Lösungen zwischen Israel und Jordanien für alle Akteure akzeptabel allokalieren und die Versorgungssicherheit für Jordanien gewährleisten.
- Als Vorschlag wurde ein mögliches Wasser-Energie Abkommen zwischen Israel und Jordanien erarbeitet (Janowitz et al. 2022c). Das Abkommen sieht im Falle der grenzüberschreitenden Alternative WPTO 5 den monetär äquivalenten Austausch von jährlich 400 Millionen m³ in Haifa produziertem und nach Jordanien transferiertem Süßwasser mit rund 13.000 GWh elektrischer Energie aus PV-Anlagen im Süden Jordaniens vor.
- Ebenso wird empfohlen, detailliertere Machbarkeitsstudien für die Alternativen WPTO 2 und WPTO 5 sowie die Wasserkraftanlage am See Genezareth anzufertigen. Dazu gehören Einholung von Informationen zu Landnutzungsrechten, Bauzeiten und Vorbereitung von Ausschreibungen.
- Die Kostenschätzungen sollten anschließend anhand der zusätzlich verfügbaren Planungsunterlagen überarbeitet oder bestätigt werden, um die Machbarkeitsstudien abzuschließen.

5.4.2.2 Digitale Werkzeuge für Entscheidungstragende

Um den Entscheidungstragenden Unterstützungsmöglichkeiten zu bieten, auf die sie in weiteren Schritten, während und nach der Implementierung zurückgreifen können, wurden digitale Werkzeuge entwickelt. Diese ergänzen die in schriftlicher Form bereitgestellten Ergebnisse des Forschungsprojekts und erleichtern den Wissenstransfer. Die digitalen Werkzeuge stellen einerseits wichtige Ergebnisse der MCDA bereit und bieten darüber hinaus Webanwendungen für weitergehende Analysen, für Neubewertungen bei Vorliegen aktualisierter Eingangsdaten und die Möglichkeit zur Durchführung weiterer multikriterieller Analysen.

Innerhalb der SALAM-Initiative wurde vom Projektkonsortium das *SALAM Informations- und Expertensystem* (SALAM IES) entwickelt und den palästinensischen und jordanischen Stakeholdern im Rahmen einer Reihe von Tutorials im August 2022 übergeben. Das *SALAM IES* speichert Geodaten, hostet verschiedene Webanwendungen für wasserwirtschaftliche Planungsaufgaben und bietet Datenschnittstellen und Visualisierungen (De Bourgoing et al. 2022b). Es ist mit einer gültigen *ArcGis Online*-Lizenz unter <https://salam2-dss.uni-goettingen.de/> abrufbar.

Im Rahmen des *SALAM IES* wurde das *SALAM Economic Tool* vom Autor entwickelt (Schär und Geldermann 2022a). Das *Economic Tool* stellt Methoden zur Investitions- und Kostenschätzung für verschiedene Infrastrukturkomponenten des WEN als Software-Tool bereit. Es sind Berechnungsschemata

und Analysefunktionalitäten für die wirtschaftliche Bewertung von Anlagen zur MWE, Verteilnetzwerken und Wasserkraftvorhaben hinterlegt. Funktionalitäten umfassen unter anderem die Berechnung der Wasserkosten von Meerwasserentsalzungsanlagen, die Schätzung des Investitionsbedarfs und anfallender Kosten von Wasserkraftprojekten sowie von Transfernetzen. Das *Economic Tool* ist ebenfalls im Innovationsatlas Wasser des BMBF gelistet und abrufbar (BMBF 2023).

Für die prospektive Bewertung der betrachteten WEN Maßnahmen wurden weitere digitale Werkzeuge entwickelt. Sie sind ebenfalls Online abrufbar (Schär 2023), stellen die wesentlichen Elemente des vorgestellten MCDA Verfahrens zusammengefasst bereit und visualisieren diese:

- Die erstellten Wasserdefizitszenarien, räumlich aufgelöst nach Versorgungsgebieten, sind über die *Folium*-Bibliothek für Python²⁴ als interaktive Karte implementiert. Hierdurch können geographische Daten einem breiten Nutzerkreis ohne Notwendigkeit einer Lizenz oder weiterer technischer Voraussetzungen zugänglich gemacht werden. Die entwickelten und bewerteten Handlungsalternativen für grenzüberschreitende Wasserinfrastrukturkonzepte sind ebenfalls in die Darstellung integriert.
- Ebenso sind die Entscheidungstabellen bereitgestellt. Hierdurch können die als entscheidungsrelevant erachteten Kriterien und die Kriterienausprägungen der betrachteten Alternativen mit geringem Aufwand abgerufen und im Kontext der visualisierten Alternativen interaktiv betrachtet werden. Zudem sind die Erläuterungen und Gewichte der Kriterien eingebunden.
- Ein weiterer Bestandteil der digitalen Werkzeuge ist die Einbindung der zuvor vorgestellten Ergebnisse und Analysen der MCDA. Dies umfasst sowohl die erhaltenen Präferenzrelationen über alle Akteure als auch die akteurspezifischen Informationen. Zudem sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen und Robustheitsuntersuchungen eingebunden.

Mit Hilfe der *PROMETHEE-Cloud*, einer online abrufbaren Implementierung der PROMETHEE Methoden können, die Entscheidungstragenden zudem ergänzende Bewertungen replizieren, variable Eingangsdaten austesten und weitere Sensitivitätsanalysen durchführen (PROMETHEE-Cloud 2023).

5.4.2.3 Neubewertung und Adaptation

Die Umsetzung einer Handlungsalternative hat auch langfristig Auswirkungen und unterliegt sich ändernden Umweltbedingungen in allen Zieldimensionen, welche bei der Modellerstellung und Analyse nicht berücksichtigt wurden. Insbesondere bei Projekten mit einem langen Wirkungshorizont, wie in diesem Fallbeispiel bis zum Jahr 2050, ist die Behandlung dieses Aspektes im Rahmen der Entscheidungsunterstützung wichtig. Ergänzend zu den zuvor formulierten kurzfristigen Handlungsempfehlungen (vgl. Abschnitt 5.4.2.1) werden daher Leitlinien für die mittlere und lange Frist im Sinne eines prospektiven Handlungsplans formuliert. Dessen Umsetzung wird durch die zuvor beschriebenen digitalen Werkzeuge gestützt.

In der mittleren Frist (ca. 1-5 Jahre) sollte nach Abschluss der Machbarkeitsstudien zeitnah die erforderlichen Genehmigungsverfahren eingeleitet werden, um den Prozess der Ausschreibung und Vergabe anzustoßen und die Realisierung der gewählten Vorhaben zu beginnen. Es wird empfohlen, den privaten Sektor durch marktorientierte Ausschreibungsprogramme zu beteiligen, um den Wettbewerb zu

²⁴ <https://python-visualization.github.io/folium/latest/index.html> (letzter Zugriff: 16.11.2023)

fördern und das in dieser Studie angenommene Kostenniveau zu erreichen (Janowitz et al. 2022a). Konkret wird ein BOT-Betreibermodell²⁵ (engl. Build-Operate-Transfer) empfohlen, das für Wasserinfrastrukturprojekte dieser Größenordnung in der Region üblich ist. Um die Süßwasserdefizite in der Region decken zu können, sollte eine Inbetriebnahme innerhalb der mittleren Frist angestrebt werden.

Langfristig (ca. 5-25 Jahre) werden die Anlagen in den Betrieb genommen worden sein und einige der Entscheidungen, z. B. gewählte Standorte oder bereits installierte Infrastruktur, sind nur noch bedingt reversibel. Folgendes Vorgehen ist für diesen zeitlichen Horizont zu empfehlen:

- Beobachtung der Entwicklungen auf dem Energiegroßhandelsmarkt im Hinblick auf wesentliche Veränderungen der Energiebezugskosten und Abwägung möglicher Anpassungsoptionen, wie z. B. die Planung neuer Erzeugungsanlagen oder Energiespeicher.
- Insbesondere wird empfohlen, den Einsatz regenerativer Energien für Pumpstationen kontinuierlich zu prüfen, um möglichen Preiserhöhungen von Emissionszertifikaten entgegenzuwirken. Realisierung von regenerativen Energie- oder Energiespeicherprojekten, sofern möglich.
- Kontinuierliche Prüfung der Möglichkeiten zur Integration kleiner Wasserkraftanlagen in das Verteilnetz und Implementierung, sofern deren Wirtschaftlichkeit gegeben ist.
- Überprüfung der tatsächlichen Auswirkungen der implementierten Alternativen und Vergleich mit den ermittelten Kriterienausprägungen. Gegebenenfalls sollte die erstellte Bewertung aktualisiert werden, um den Effekt auf die ursprüngliche Rangordnung zu untersuchen.

Ein weiterer Punkt, der eine Neubewertung oder zusätzliche Maßnahmen erforderlich machen könnte, sind beobachtete Änderungen der Umweltbedingungen, die in der zuvor durchgeführten MCDA nicht durch Szenarien oder Sensitivitätsanalysen erfasst wurden. Hierzu sollten von den Entscheidungstragenden in fünfjährigen Zeitintervallen, beginnend im Jahr 2030 bis in das Jahr 2050 die Entwicklungen der kritischen Variablen beobachtet werden. Für das behandelte Entscheidungsproblem wurde mittels Ursache-Wirkungs-Diagramm die Rückkopplungsstruktur aus Bevölkerungswachstum, den Folgen des Klimawandels und den damit verbundenen wasser- und energiewirtschaftlichen Implikationen als besonders kritisch identifiziert und zur Erstellung der Wasserdefizitszenarien verwendet. Die innerhalb der Szenarien prognostizierten Wasserdefizite auf Ebene der Versorgungsgebiete signalisieren somit eine Abweichung von den zur multikriteriellen Bewertung herangezogenen Umweltbedingungen. Tabelle 5.18 zeigt die Wasserdefizite, aufgelöst nach Versorgungsgebiet, zu den Zeitpunkten der Neubewertung bis in das Jahr 2050. Insbesondere signalisieren wesentliche Überschreitungen der im Szenario ζ_2 angenommenen Werte und Unterschreitungen der im Szenario ζ_3 zusätzlichen Handlungsbedarf, da diese Szenarien die Schranken der modellierten Unsicherheit darstellen.

Die Adaptation der Infrastrukturkonzepte und deren Neubewertung nach PROMETHEE kann mit Hilfe der in Abschnitt 5.4.2.2 vorgestellten digitalen Werkzeuge durch die Entscheidungstragenden vorgenommen werden. Im Falle von Abweichungen in den prognostizierten Wasserdefiziten können mittels der im SALAM IES integrierten Funktionalitäten neue Konzepte für grenzüberschreitende Wasserinfrastrukturlösungen generiert werden. Dabei besteht die Möglichkeit die Süßwasserdefizite der Be-

²⁵ Bei einem BOT-Betreibermodell verpflichtet sich ein privater Projektträger die Umsetzung und den Betrieb eines Projektes in eigener Verantwortung zu übernehmen. Der Konzessionsgeber gibt im Gegenzug Abnahmegarantien zu vereinbarten Konditionen, um das wirtschaftliche Risiko des Projektträgers zu mindern. Nach vereinbarter Zeit werden die Anlagen an den Konzessionsgeber übereignet (vgl. z. B. Giesecke et al. 2014, S. 52).

darfsgebiete zu verändern, Kapazitätsgrenzen von Meerwasserentsalzungsanlagen festzulegen und bestimmte Standorte auszuschließen, um den veränderten Rahmenbedingungen zu entsprechen. Das *SALAM Economic Tool* bietet dabei Funktionalität zur Bestimmung der spezifischen Wasserkosten von Meerwasserentsalzungsanlagen, welche als Eingabedaten zur Planung des Verteilnetzwerkes benötigt werden. Die modifizierten Konzepte können anschließend in der *PROMETHEE-Cloud* Software neu bewertet werden. Ebenso können dort die Kriteriengewichte und die inter-kriteriellen Präferenzinformationen jederzeit geändert werden. So können sich im Laufe der Zeit ändernde Präferenzen in eine neue Bewertung einfließen.

Tabelle 5.18: Jährliche Süßwasserdefizite in den Bedarfsgebieten im Westjordanland und Jordanien in Millionen m³ pro Jahr [MCM/a]

Bedarfsgebiet	Szenario	Jährliches Süßwasserdefizit [MCM/a]				
		2030	2035	2040	2045	2050
Südliches Cluster	ζ ₁ - Referenzszenario	47,4	60,1	75,5	94,3	119,3
	ζ ₂ - Hohe Bedarfsentwicklung	68,5	112,3	167,5	237,1	328,0
	ζ ₃ - Konservative Bedarfsentwicklung	21,0	29,5	38,6	48,5	59,1
Mittleres Cluster	ζ ₁ - Referenzszenario	19,9	26,9	35,7	46,1	60,1
	ζ ₂ - Hohe Bedarfsentwicklung	31,7	55,7	85,8	123,7	173,0
	ζ ₃ - Konservative Bedarfsentwicklung	4,0	8,8	14,0	19,5	25,5
Nördliches Cluster	ζ ₁ - Referenzszenario	49,7	64,7	83,6	107,0	138,4
	ζ ₂ - Hohe Bedarfsentwicklung	71,9	120,0	180,7	257,2	357,1
	ζ ₃ - Konservative Bedarfsentwicklung	17,0	26,9	37,5	48,9	61,2
Amman	ζ ₁ - Referenzszenario	113,7	152,1	191,5	229,0	264,1
	ζ ₂ - Hohe Bedarfsentwicklung	127,9	238,6	358,5	500,7	636,7
	ζ ₃ - Konservative Bedarfsentwicklung	5,1	33,2	62,4	85,9	102,8
al-Balqa	ζ ₁ - Referenzszenario	21,2	25,4	29,9	34,6	39,7
	ζ ₂ - Hohe Bedarfsentwicklung	24,1	33,9	45,1	58,8	74,8
	ζ ₃ - Konservative Bedarfsentwicklung	12,1	14,4	16,9	19,1	21,3
Zarqa	ζ ₁ - Referenzszenario	73,1	87,1	101,3	115,9	130,5
	ζ ₂ - Hohe Bedarfsentwicklung	71,5	112,6	157,9	214,7	279,4
	ζ ₃ - Konservative Bedarfsentwicklung	40,7	48,2	55,9	62,6	67,8
Nördliches Cluster	ζ ₁ - Referenzszenario	65,6	100,1	135,3	169,9	206,0
	ζ ₂ - Hohe Bedarfsentwicklung	137,4	197,5	267,0	351,1	449,4
	ζ ₃ - Konservative Bedarfsentwicklung	8,2	28,9	50,1	67,8	83,6
Karak	ζ ₁ - Referenzszenario	3,3	12,6	22,4	33,0	46,1
	ζ ₂ - Hohe Bedarfsentwicklung	21,5	41,5	56,5	92,3	129,6
	ζ ₃ - Konservative Bedarfsentwicklung	-	-	-	-	-
at-Tafila	ζ ₁ - Referenzszenario	1,9	3,1	4,4	5,7	7,1
	ζ ₂ - Hohe Bedarfsentwicklung	3,2	6,1	9,5	13,4	17,8
	ζ ₃ - Konservative Bedarfsentwicklung	-	0,6	1,4	2,1	2,8
Ma'an	ζ ₁ - Referenzszenario	1,5	5,3	9,3	13,5	18,0
	ζ ₂ - Hohe Bedarfsentwicklung	7,7	16,0	23,3	37,0	51,8
	ζ ₃ - Konservative Bedarfsentwicklung	-	-	-	-	1,6
Akaba	ζ ₁ - Referenzszenario	-	-	-	-	-
	ζ ₂ - Hohe Bedarfsentwicklung	-	-	-	-	21,7
	ζ ₃ - Konservative Bedarfsentwicklung	-	-	-	-	-

5.5 Zusammenfassung

Die Fallstudie zur Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Behebung des Wasserdefizitproblems in Israel, Jordanien und Palästina demonstriert die Anwendbarkeit des in Kapitel 4 entwickelten MCDA Verfahrens auf Basis von MAMCA und PROMETHEE. Die Daten der Fallstudie stammen aus der SALAM-Initiative und wurden in enger Zusammenarbeit mit den technischen Experten und regionalen Partnern des Projektkonsortiums, den Entscheidungstragenden und weiteren Interessensgruppen aus Israel, Jordanien und Palästina erhoben.

Mit Hilfe von problemstrukturierenden Methoden wurden wesentliche wasser- und energiewirtschaftliche Wirkungszusammenhänge im vorliegenden Entscheidungskontext erfasst und die Entscheidungssituation konkretisiert. Über den Ansatz der Szenarioplanung wurden insgesamt drei Szenarien erstellt, um Unsicherheiten in der Planung zu berücksichtigen. Zur Erhebung von Zielsystemen und Generierung von Handlungsalternativen wurde eine hybride Vorgehensweise mit Präsenzworkshops und Online-Formaten gewählt. Die Kriterienausprägungen wurden mittels einer techno-ökonomischen Analyse bestimmt und von beteiligten Interessensgruppen in Befragungen erhoben. Die Alternativen zur Behebung des Wasserdefizitproblems in Israel, Jordanien und Palästina wurden anschließend hinsichtlich technischer, ökonomischer, umweltbezogener sowie sozio-politischer Kriterien multikriteriell nach MAMCA mit PROMETHEE als Aggregationsmethode bewertet. Im speziellen wurden fünf Alternativen für eine grenzüberschreitende Wasserbewirtschaftungsinfrastruktur (WPTO 1–WPTO 5) betrachtet.

Im Rahmen der Analyse wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um den Einfluss von Unsicherheit in den Eingangsdaten des Entscheidungsmodells, d. h. in den Präferenzinformationen, zu untersuchen. Zudem wurde der Einfluss von Unsicherheiten in den Kriterienausprägungen der als sensitiv ermittelten Kriterien untersucht und die Möglichkeit für Rangumkehr aufgezeigt. Insgesamt offenbarte sich eine heterogene Präferenzstruktur zwischen den beteiligten Akteuren, wobei die Alternativen WPTO 2 und WPTO 5 generell am besten bewertet wurden. Die erlangten Erkenntnisse wurden in einen prospektiven Handlungsplan überführt, welcher den Entscheidungstragenden sowohl kurz- als auch mittel- und langfristig Leitlinien bei der möglichen Implementierung von Alternativen bietet. Wesentliche prospektive Elemente neben diesen Leitlinien sind zudem die digitalen Werkzeuge, welche den Entscheidungstragenden ebenfalls zugänglich gemacht wurden. Diese stellen einerseits wichtige Ergebnisse der MCDA bereit und bieten andererseits Webanwendungen für weitergehende Untersuchungen, für Neubewertungen bei Vorliegen aktualisierter Eingangsdaten und die Möglichkeit zur Durchführung weiterer multikriterieller Analysen.

Die Entwicklung, Implementierung und Anwendung des MCDA Verfahrens zur Entwicklung und multikriteriellen Bewertung von Handlungsmaßnahmen im WEN ist eine Neuerung. Es zeigt erstmals auf, wie das Outranking Verfahren PROMETHEE mit problemstrukturierenden Methoden kombiniert werden kann, um Handlungsmaßnahmen im komplexen Entscheidungskontext des WEN zu entwickeln und hinsichtlich verschiedener Nachhaltigkeitsdimensionen zu bewerten, was bislang in der Literatur noch nicht untersucht wurde. Ebenso gibt es bislang noch kein MCDA Verfahren, welches Entscheidungstragenden im WEN die Möglichkeit einer separaten Präferenzmodellierung nach MAMCA ermöglicht. Zudem endet der Großteil der Studien zur multikriteriellen Bewertung unter Nachhaltigkeitszielen bei der Formulierung von kurzfristigen Handlungsempfehlungen. Die Entwicklung und Anwendung der prospektiven Elemente des vorgestellten MCDA Verfahrens stellt daher eine weitere Neuerung dar.

6 Diskussion und Ausblick

In diesem Kapitel werden in Abschnitt 6.1 die wichtigsten Erkenntnisse aus den vorhergehenden Kapiteln zusammengefasst. Die erlangten Erkenntnisse tragen zur Erreichung der eingangs definierten Zielsetzung und zur Beantwortung der formulierten Forschungsfragen bei. Die Beantwortung der Forschungsfragen in Abschnitt 6.2 ist ein weiterer Bestandteil dieses Kapitels. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 6.3 die methodischen und praktischen Schlussfolgerungen gezogen und die Übertragbarkeit der Erkenntnisse der Arbeit diskutiert. Außerdem werden mögliche Ansatzpunkte für weitere Forschungsarbeiten aufgezeigt.

6.1 Zusammenfassung

Trotz erheblicher Fortschritte in vielen Bereichen hat ein großer Teil der Weltbevölkerung weiterhin nur unzureichenden Zugang zu sauberem Wasser und einer sicheren Nahrungsmittelversorgung (UN 2023d). Gleichzeitig werden die natürlichen Ressourcen in vielen Regionen übernutzt und der Umstieg auf erneuerbare Energien erfolgt insgesamt nicht in dem Maße, wie es zur Erreichung der Klimaschutzziele notwendig wäre (IPCC 2023). Auch der Einfluss des Klimawandels auf die natürlichen Ressourcen, besonders in Form von Wasserknappheit in ariden und semiariden Regionen, wie dem Nahen Osten, wird voraussichtlich zunehmen (UN 2020). Ebenso steigt die Nachfrage nach Wasser, Energie und landwirtschaftlichen Produkten durch das Wachstum der Bevölkerung und einer wachsenden Mittelschicht mit veränderten Lebens- und Ernährungsgewohnheiten weltweit rapide an, so dass die landwirtschaftliche Produktion bis 2050 um etwa 70 % gesteigert werden muss (Hoff 2011). Die Kombination der oben beschriebenen Belastungen droht lokal die Stabilität sozial-ökologischer Systeme zu gefährden, z. B. durch Wasserknappheit oder Nahrungsmittelkrisen.

Die Herausforderung besteht darin, die langfristigen und globalen Ziele (z. B. internationale Klimaschutzabkommen) mit wirtschaftlichen Interessen und dem Erhalt lokaler Ökosysteme und gesellschaftlichen Anforderungen in Einklang zu bringen und potenzielle intersektorale Interdependenzen und Zielkonflikte bei der Entscheidungsfindung zu berücksichtigen (vgl. IEA 2017). Interdependenzen können z. B. darin bestehen, dass Maßnahmen im Energiesektor unter Berücksichtigung ihrer Auswirkungen auf die lokalen Wasserressourcen gestaltet werden. Zielkonflikte können auftreten, wenn Maßnahmen im Wassersektor, wie z. B. der verstärkte Einsatz von Entsalzungsverfahren, zugleich mit höheren Anforderungen an Energiesysteme und direkten negativen Auswirkungen auf lokale Ökosysteme verbunden sind. Ein integrierter Planungsansatz ist also im Hinblick auf die Pluralität der Ziele nachhaltiger Entwicklung (SDGs) vorteilhaft (Hoff 2011).

In Kapitel 1 wird das Ziel der Arbeit formuliert. Ziel ist die Erarbeitung eines Entscheidungsunterstützungsverfahrens, das die Verknüpfungen zwischen wasser- und energiewirtschaftlichen Maßnahmen berücksichtigt. Zu Erreichung des Ziels führt die Beantwortung von vier Forschungsfragen, welche ebenfalls in diesem Kapitel formuliert und in den nachfolgenden Kapiteln übergreifend beantwortet werden.

In Kapitel 2 werden die Verknüpfungen der Wasserversorgung und des Energiesektors betrachtet. Der Ansatz einer integrierten Planung wird auch als Wasser-Energie Nexus (WEN) bezeichnet. Angesichts der wachsenden Zahl von Regionen, die von Süßwasserknappheit betroffen sind, und der zunehmenden Dringlichkeit des Ausbaus erneuerbarer Energietechnologien stellt der Ansatz des WEN einen wichtigen Baustein zur Erreichung der international vereinbarten SDGs dar. Der Ansatz des WEN be-

steht darin, systemisches Denken in Planungs- und Entscheidungsprozessen zu fördern und Bewusstsein für die wichtigsten Wirkungszusammenhänge in einer heterogenen Gruppe von beteiligten Institutionen und Interessensgruppen zu schaffen. So kann er dazu beitragen, sektorübergreifende Synergien zu realisieren, die Ressourceneffizienz durch Vermeidung unerwünschter Wechselwirkungen zu erhöhen und den Weg zu einer höheren Versorgungssicherheit zu ebnen. Die Umsetzung einer solchen gemeinschaftlichen Planung erfordert jedoch Entscheidungsprozesse, welche sowohl Akteure unterschiedlicher politischer Institutionen als auch Interessensvertreter aus der Zivilgesellschaft einbinden. Einerseits geht es darum, sektorübergreifend kohärente Maßnahmen aus einer Vielzahl von Möglichkeiten zu entwickeln und aus technischer Perspektive aufeinander abzustimmen. Andererseits sind die entwickelten Maßnahmen hinsichtlich einer Vielzahl von Zielstellungen und Interessen zu beurteilen und konsensfähige und gesellschaftlich akzeptierte Maßnahmen zu identifizieren.

Aus diesem Grund wird in Kapitel 3 in die Verfahren der multikriteriellen Entscheidungsanalyse (MCDA) und in problemstrukturierende Methoden (PSM) eingeführt. MCDA Verfahren unterstützen Entscheidungstragende in komplexen Entscheidungssituationen, wie denen im WEN, durch Vorgabe einer Prozessstruktur zur systematischen Erfassung der wesentlichen Elemente von Entscheidungsprozessen und gestalten den Entscheidungsprozess transparent, nachvollziehbar und partizipativ. PSM bieten zusätzliche methodische Werkzeuge, wie Kreativitätstechniken, um die komplexen Zusammenhänge des WEN in den einzelnen Ablaufschritten der MCDA systematisch zu bewältigen. PSM können mit MCDA Verfahren kombiniert werden und tragen zu einem besseren Problemverständnis und einer umfassenden Strukturierung des Entscheidungsproblems bei. Damit sind MCDA Verfahren grundsätzlich geeignet, Entscheidungsprobleme im WEN methodisch zu adressieren. Sie bewerten, kategorisieren oder ordnen eine Menge von Handlungsalternativen schließlich modellgestützt, je nach konkret ausgewählter Aggregationsmethode.

Eine Klasse von Methoden, die häufig bei Umweltentscheidungsproblemen verwendet werden, sind die PROMETHEE Methoden. PROMETHEE Methoden zählen zu den Outranking Verfahren und basieren auf paarweisen Vergleichen von Alternativen. Sie sind besonders geeignet für die Problemstellungen des WEN, da sie in der Aggregationsprozedur Bewertungen in unterschiedlichen Maßeinheiten in dimensionslose Präferenzindikatoren überführen. So können die Alternativen hinsichtlich ökonomischer Kriterien in monetären Einheiten bewertet werden, umweltbezogene Wirkungen direkt aus öko-bilanziellen Bewertungen übernommen werden und Kriterien aus technischen oder gesellschaftlichen Zielstellungen in ihren ursprünglichen Maßeinheiten, ohne vorherige Transformation mit einhergehendem Informationsverlust, eingebracht werden. Zudem erfordert die Aggregationsprozedur der PROMETHEE Methoden vergleichsweise wenig Eingangsdaten seitens der Entscheidungstragenden und bietet gegenüber weiteren Outranking Verfahren eine bessere Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse.

Die Konsensfindung über alle eingebundenen institutionellen und zivilgesellschaftlichen Akteure kann aufgrund der Heterogenität ihrer Interessen und der Multidimensionalität der zur Bewertung herangezogenen Ziele selbst nach ausgedehnten Diskussions- und Verhandlungsprozessen mit Schwierigkeiten verbunden sein. Konfligierende Positionen sollten dabei jedoch nicht als Probleme betrachtet werden, die es zum Zwecke der Konsensfindung zu verdrängen gilt. Vielmehr sollten diese als Ansatzpunkte angesehen werden, um dahinterliegende Motivationen und Wertevorstellungen zu verstehen und angemessen in den Prozess der Konsensfindung einzubeziehen. Dabei empfiehlt sich für Entscheidungsprobleme im Kontext des WEN, das MCDA Verfahren nach der Multi-Actor Multi-Criteria Analysis (MAMCA) zu gestalten. MAMCA ermöglicht die Erweiterung von Aggregationsmethoden auf Gruppenentscheidungen mit heterogenen Akteuren, indem jedem Akteur die Möglichkeit gegeben wird, ein

individuelles Zielsystem und Präferenzmodell aufzustellen. Mit MAMCA lassen sich so zunächst widersprüchliche Ziele verschiedener Interessensgruppen modellieren und im Aggregationsprozess der MCDA berücksichtigen, was eine zusätzliche Ebene der Analyse schafft. Einerseits können, wie bei Aggregation ohne MAMCA üblich, Präferenzrelationen der Alternativen über alle Akteure aufgestellt werden. Andererseits können durch die Einbeziehung spezifischer Kriterienhierarchien und Präferenzinformationen in die Aggregation zusätzliche Informationen auf der Ebene einzelner Akteure gewonnen werden, z. B. stark abweichende Präferenzen eines Akteurs für eine bestimmte Alternative und die dafür verantwortlichen Kriterien. Diese Informationen eröffnen wichtige Startpunkte für die Verbesserung von Maßnahmen oder den Prozess der Konsensfindung.

In Kapitel 4 wird zunächst der aktuelle Stand der Forschung mittels einer strukturierten Literaturstudie aufgearbeitet. Diese zeigt, dass es bislang kein MCDA Verfahren gibt, welches die Vorteile von Outranking Verfahren für Entscheidungsprobleme im Kontext des WEN nutzt. Ferner werden die analytischen Herausforderungen aus der Kopplung von Wasserversorgung und dem Energiesektor und die Heterogenität der beteiligten Interessensgruppen bislang nur bedingt und fragmentiert in MCDA Verfahren berücksichtigt. Aus diesem Grund wird anschließend ein neues MCDA Verfahren entwickelt. Es verzahnt den Ablauf von PROMETHEE mit PSM, um intersektorale Beziehungen und Unsicherheiten bei der Entwicklung von Handlungsalternativen zu berücksichtigen und diese prospektiv zu bewerten. Zielsysteme und Präferenzinformationen werden für jede Interessensgruppe nach MAMCA separat erhoben. Auf diese Weise ist es jedem Akteur möglich ein eigenes Zielsystem festzulegen und die erlangten Ergebnisse bieten zusätzliche Analysemöglichkeiten, um die Konsensfindung anzustoßen. Das neu entwickelte Verfahren wurde mittels der Programmiersprache Python implementiert und um Funktionalitäten für Sensitivitäts- und Robustheitsanalysen, ergänzt. Diese Funktionalitäten umfassen einerseits die in PROMETHEE verfügbaren Sensitivitätsanalysen und andererseits neuartige Visualisierungen für Robustheitsuntersuchungen über Monte-Carlo-Simulationen.

Das Vorgehen wird in Kapitel 5 anhand des Fallbeispiels aufgezeigt. Das Fallbeispiel betrachtet die Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Behebung des Wasserdefizitproblems in Israel, Jordanien und Palästina. Insbesondere werden fünf Alternativen für grenzüberschreitende Wasserbewirtschaftungsinfrastruktur in drei Szenarien analysiert. Auf Basis der Ergebnisse wird ein prospektiver Handlungsplan für die Entscheidungstragenden erstellt. Der Handlungsplan wird um weitere digitale Werkzeuge ergänzt, welche nach Implementierung einer Alternative Unterstützung für die mittlere und lange Frist bietet.

6.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist die Entwicklung eines MCDA Verfahrens, das Entscheidungstragende bei strategischen Entscheidungen im WEN unterstützt. Es wird den spezifischen Anforderungen des WEN gerecht und unterstützt Entscheidungstragende sowohl bei der Entwicklung von Handlungsmaßnahmen als auch bei deren Bewertung und der Ermittlung präferierter Maßnahmen. Es ist zugeschnitten auf das Wasserdefizitproblem im Nahen Osten, aber auch für andere Fragestellungen des WEN anwendbar. Hierzu werden in dieser Arbeit vier Forschungsfragen formuliert, die aufgrund der Erkenntnisse der vorangegangenen Kapitel wie folgt beantwortet werden können.

Forschungsfrage 1: Welche wesentlichen intersektoralen Beziehungen existieren zwischen der Wasserversorgung und dem Energiesektor und wie können diese methodisch bei der Entwicklung und multikriteriellen Bewertung von Handlungsmaßnahmen mittels MCDA Verfahren berücksichtigt werden?

Ein Grundgedanke des WEN besteht in der Überwindung isolierter Herangehensweisen in Planungsfragen der Wasser- und Energieversorgung. Hierzu werden in dieser Arbeit zunächst die bestehenden Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen energiewirtschaftlichen Wertschöpfungsketten und den Prozessen der Wasserversorgung erarbeitet (vgl. Abschnitte 2.4 und 2.5). Zur analytischen Aufarbeitung dieser wechselseitigen Beziehungen in einem konkreten Entscheidungsproblem sind PSM geeignet. Durch Kombination von PSM mit MCDA Verfahren können qualitative Ursache-Wirkungsdiagramme (engl. causal-loop diagrams, CLD) entwickelt werden, welche zur Klärung komplexer Entscheidungskontexte, wie denen im WEN, beitragen (vgl. Abschnitt 3.4.3). Ebenso macht die Integration von CLD in den Prozess einer MCDA besonders wichtige intersektorale Zusammenhänge sichtbar und sensibilisiert Entscheidungstragende für diese (vgl. Abschnitt 4.3.1). Anhand des Fallbeispiels zur Entwicklung und Bewertung von WEN Maßnahmen im Nahen Osten wird zudem ersichtlich, wie die mittels CLD als besonders wichtig identifizierten intersektoralen Beziehungen zur Erstellung von Szenarien herangezogen werden können (vgl. Abschnitt 5.2.3.1) und die Grundlage für die Entwicklung, Bewertung und spätere Neubewertung von Alternativen bilden (vgl. Abschnitt 5.4.2.3).

Forschungsfrage 2: Welche Quellen für Unsicherheiten bestehen bei Entscheidungsproblemen im WEN und wie können diese im Zuge der multikriteriellen Bewertung verarbeitet und bei der Formulierung von Handlungsempfehlungen an Entscheidungstragende kommuniziert werden?

Entscheidungsprobleme in komplexen Entscheidungskontexten, wie der Entwicklung von Infrastrukturlösungen im Bereich der Wasserversorgung und Energiewirtschaft, sind oftmals mit Unsicherheiten aus mehreren Quellen behaftet. So bestehen Unsicherheiten hinsichtlich der vollständigen Erfassung aller Interessensgruppen, der betrachteten Handlungsalternativen und deren Konsequenzen. Ebenso herrscht Unsicherheit hinsichtlich der Entwicklung externer Umweltbedingungen und Einflussfaktoren (vgl. Abschnitt 3.3.3.4). Im Rahmen der multikriteriellen Bewertung kann die Präferenzenerhebung mit Unsicherheiten durch unvollständige Informationen, Stochastizität oder Mehrdeutigkeit behaftet sein (vgl. Abschnitt 3.3.3.2). Um Unsicherheiten methodisch zu adressieren, wird im in dieser Arbeit entwickelten MCDA Verfahren auf die Szenarioplanung und Strategietabellen zurückgegriffen (vgl. Abschnitt 4.3.2). Die Anwendung dieses Verfahrens auf das Fallbeispiel in Kapitel 5 verdeutlicht den komplementären Charakter der Szenarioplanung mit den PROMETHEE Methoden zur Bearbeitung kontextueller Unsicherheiten von Entscheidungsproblemen im WEN. Die PROMETHEE Methoden bieten zudem mittels verschiedener Sensitivitäts- und Robustheitsanalysen Möglichkeiten, Unsicherheiten in den Präferenzinformationen und Konsequenzen der Alternativen zu analysieren und für Entscheidungstragende nachvollziehbar visuell aufzubereiten (vgl. Abschnitt 5.4.1). Die Implementierung von Monte-Carlo-Simulationen ermöglicht eine Analyse von Unsicherheiten in den Kriterienausprägungen und Präferenzinformationen und eine intuitiv nachvollziehbare Darstellung von Robustheitsanalysen.

Forschungsfrage 3: Wie kann dem Phänomen der Pfadabhängigkeit bei Entscheidungsproblemen des WEN vorbeugend, d. h. prospektiv, im Prozess der Entscheidungsunterstützung mittels MCDA Verfahren begegnet werden?

Gegenwärtig zu treffende Entscheidungen mit langem Wirkungshorizont können zukünftige Entscheidungen beeinflussen und werden zugleich von Entscheidungen der Vergangenheit beeinflusst, d. h. es besteht Pfadabhängigkeit. In bestehenden MCDA Verfahren zur Bewertung von Maßnahmen mit langem Wirkungshorizont im WEN bleiben Pfadabhängigkeiten weitestgehend unberücksichtigt (vgl. Abschnitt 4.2.2.4.). Eine Analyse der Fachliteratur der präskriptiven Entscheidungstheorie zeigt, dass Strategietabellen aufgrund ihres iterativen und explorativen Charakters ein geeignetes methodisches Werkzeug zur Entwicklung von Handlungsalternativen bei Vorliegen von Pfadabhängigkeit sein können

(vgl. Abschnitt 3.4.3). Im entwickelten MCDA dieser Arbeit werden Strategietabellen mit der Szenarioplanung kombiniert, um Pfadabhängigkeit bereits in der Phase der Problemstrukturierung zu berücksichtigen und das Bewusstsein der Entscheidungstragenden für mögliche Lock-in-Effekte zu schärfen (vgl. Abschnitt 4.3.2). Darüber hinaus begegnet das vorgestellte MCDA Verfahren Pfadabhängigkeiten durch Erstellung eines prospektiven Handlungsplans für Entscheidungstragende. Ein prospektiver Handlungsplan formuliert über den Planungshorizont sequenzielle Implementierungsschritte und Maßnahmen, um die Alternativen an externe Entwicklungen anpassen zu können. Er stellt, mit Hilfe ergänzend bereitgestellter digitaler Werkzeuge, somit ex-post Unterstützung zur Adaptation bereits umgesetzter Maßnahmen bereit und erlaubt deren Neubewertung anhand von aktualisierten Eingangsdaten (vgl. Abschnitt 5.4.2).

Forschungsfrage 4: Wie kann im Rahmen der Entscheidungsunterstützung ein gemeinsames Verständnis des Entscheidungsproblems bei allen beteiligten Akteuren geschaffen werden und wie können Interessen aller beteiligten Akteure erfasst und berücksichtigt werden, um die Akzeptanz getroffener Entscheidungen zu fördern?

Im Kontext des WEN ist die Entscheidungsfindung oftmals auf einen Konsens von Akteuren mit heterogenen Interessen angewiesen, wie die Situation im Nahen Osten verdeutlicht (vgl. Abschnitt 1.1). Die aktive Partizipation heterogener Interessensgruppen an allen Phasen der MCDA ist ein Schlüsselfaktor zur Schaffung eines gemeinsamen Problemverständnis und eine wesentliche Grundlage für den Prozess der Konsensfindung (vgl. Abschnitt 3.5). Im vorgestellten MCDA Verfahren werden hierzu interaktive Verfahren, wie z. B. das von Simos zur Identifikation von Zielen und Erhebung von Präferenzinformationen, eingesetzt und in interaktive Online- und Präsenzworkshops eingebettet (vgl. Abschnitt 4.3.3). Die Bildung des Präferenzmodells nach MAMCA ermöglicht es zudem explizit, widersprüchliche Ziele verschiedener Akteure in der Modellbildung und Bewertung zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 3.5.1). Anhand eines konkreten Fallbeispiels wird aufgezeigt, an welchen Stellen des MCDA Verfahrens die Wahl einer geeigneten Interaktionsform eine effektive und aufwandseffiziente Partizipation – während aller Phasen der MCDA – ermöglicht (vgl. Abschnitt 5.2.1.1). Darüber hinaus zeigt das Fallbeispiel, wie die akteursspezifische Erhebung von Präferenzen nach MAMCA die Identifikation der Kriterien ermöglicht, die zu unterschiedlichen Präferenzen führen (vgl. Abschnitt 5.3.2.2). Hieraus ergeben sich essentielle Ansatzpunkte Erarbeitung konsensfähiger Alternativen.

6.3 Schlussfolgerungen und weiterer Forschungsbedarf

Im Anschluss an die Beantwortung der Forschungsfragen wird in diesem Abschnitt der wissenschaftliche Erkenntnisgewinn herausgestellt. Zudem wird die Übertragbarkeit der erlangten Erkenntnisse auf weitere Anwendungsfälle diskutiert und mögliche Anwenderkreise des neu entwickelten Verfahrens herausgestellt. Ebenso werden Anknüpfungspunkte für weitere Forschungsarbeiten aufgezeigt.

Ausgangspunkt zur Entwicklung des MCDA Verfahrens stellte die Erschließung der spezifischen Herausforderungen der Entscheidungsfindung im Kontext des WEN dar (vgl. Abschnitt 4.1). Das Verfahren basiert auf den PROMETHEE Methoden und begegnet diesen Herausforderungen methodisch. Es integriert Ursache-Wirkungs-Diagramme in die Phase Problemstrukturierung, um für das Entscheidungsproblem wichtige intersektorale Beziehungen offenzulegen und externe Einflussfaktoren zu identifizieren. Die aus den Ursache-Wirkungs-Diagrammen gewonnenen Erkenntnisse werden zudem für die Erstellung von Szenarien genutzt. Damit wird eine Bandbreite an potentiellen Entwicklungspfaden abgedeckt, um Unsicherheiten bei der Gestaltung von Alternativen zu berücksichtigen. Weitere Quellen

von Unsicherheiten in den Eingangsdaten der MCDA werden im Rahmen der Sensitivitäts- und Robustheitsanalyse berücksichtigt. Insgesamt ermöglicht die Verzahnung der Szenarioplanung mit den Sensitivitätsanalysen der PROMETHEE Methoden und der Monte-Carlo-Simulation es, den Einfluss aller wesentlichen Unsicherheitsquellen auf das Ergebnis der MCDA zu untersuchen. Die Variation der Kriteriengewichte und Kriterienausprägungen über Monte-Carlo-Simulationen machen den vergleichsweise stärkeren Einfluss von Unsicherheiten in den Kriterienausprägungen auf das Ergebnis sichtbar. Dies verdeutlicht den Einfluss der Datenqualität auf die Bewertung der Alternativen, da insbesondere in frühen Planungsphasen die Kriterienausprägungen von Infrastrukturprojekten mit wesentlichen Unsicherheiten behaftet sein können.

Eine weitere Herausforderungen besteht darin, dass Planungsvorhaben im WEN oftmals einen langen Wirkungshorizont haben, was das Risiko für Pfadabhängigkeiten erhöht. Um Pfadabhängigkeiten bei der Entwicklung von Alternativen methodisch zu begegnen, greift das vorgestellte Verfahren auf Strategietabellen zurück. Die Strategietabellen strukturieren die komplexen Entscheidungssituationen in besser handhabbare Teilprobleme, wie eine bestimmte wasserwirtschaftliche, energiewirtschaftliche oder umweltbezogene Fragestellung. Insbesondere bei Entscheidungsproblemen des WEN bieten sich Strategietabellen an, da sie ein interaktives Werkzeug zur Schaffung eines gemeinsamen Problemverständnisses der beteiligten Personen und Institutionen mit unterschiedlichen fachlichen Hintergründen sind. Durch bewusste Kombination der Elemente einer Strategietabelle lassen sich außerdem auf einfache Weise Handlungsalternativen generieren, welche die Breite zur Verfügung stehender Möglichkeiten abdecken. Die Erstellung eines prospektiven Handlungsplans mit einer Reihe an digitalen Werkzeugen für Entscheidungstragende hilft zudem dabei, das Bewusstsein für die Auswirkungen von Pfadabhängigkeiten, d. h. Lock-in Effekten, zu schärfen und dynamisch auf diese zu reagieren (s. Abschnitt 6.2).

Zudem ergeben sich Herausforderungen bei der Wahl einer geeigneten Aggregationsmethode. Die in Abschnitt 3.2 grundsätzlich vorgestellten MCDA Verfahren bewerten eine Menge Alternativen in der Regel anhand einer einzigen Menge von Kriterien und einem einzigen Datensatz an Präferenzinformationen. Auch die Aggregationsprozedur nach PROMETHEE erfordert die einstimmige Einigung auf einen Vektor entscheidungsrelevanter Kriterien mit korrespondierendem Gewichtungsvektor und eindeutigen Präferenzfunktionen und -schwellenparametern. Dies kann in Entscheidungsproblemen des WEN mit Herausforderungen verbunden sein, da verschiedene politische, privatwirtschaftliche und zivilgesellschaftliche Akteure mit unterschiedlichen Perspektiven, Zielen und Interessen beteiligt sind. Das in Kapitel 5 vorgestellte Fallbeispiel des Nahen Ostens weist diese Herausforderung ebenfalls auf. Es besteht das Risiko, bereits in einem frühen Schritt der MCDA die aktive Teilhabe wichtiger Akteure zu verlieren, da diese ihre Interessen nicht angemessen berücksichtigt sehen. Dies kann die Tragfähigkeit und Akzeptanz von Maßnahmen in der Phase der Implementierung gefährden. Aus diesem Grund erweitert das in dieser Arbeit entwickelte MCDA Verfahren die Aggregationsmethodik von PROMETHEE nach MAMCA. So werden Kriterien, Präferenzfunktionen, Schwellenparameter und Kriteriengewichtungen für jede Interessensgruppe separat erhoben, was deren Teilhabe am gesamten Prozess fördert und zusätzliche Einsichten in der Analyse schafft (vgl. Abschnitt 5.3.2).

In der wissenschaftlichen Literatur werden diese Herausforderungen der multikriteriellen Entscheidungsanalyse im WEN bislang nur bruchstückhaft und isoliert voneinander betrachtet (vgl. Abschnitt 4.2). In dieser Arbeit werden sie erstmal gänzlich berücksichtigt, um die integrierte Planung einer nachhaltigen Wasser- und Energieversorgung zu unterstützen. Aus diesen Gründen stellt das entwickelte

und vorgestellte MCDA Verfahren zur Entwicklung und multikriteriellen Bewertung von Handlungsmaßnahmen im WEN eine Neuerung dar.

Ebenso endet ein Großteil der Studien zur multikriteriellen Bewertung von Handlungsmaßnahmen im WEN bei der Formulierung von kurzfristigen Handlungsempfehlungen. Die Entwicklung und im Fallbeispiel aufgezeigte Anwendung der prospektiven Elemente des MCDA Verfahrens dieser Arbeit stellt daher eine weitere Neuerung zur mittel- und langfristigen Unterstützung von Entscheidungstragenden dar (vgl. Abschnitt 5.4).

Die Ermöglichung einer aktiven Beteiligung der Akteure des WEN durch verschiedene Formen der Interaktion über den gesamten Prozess der MCDA, d. h. von der Problemdefinition über die Modellbildung bis hin zur Ergebnisanalyse und deren Visualisierung, mittels MAMCA ist ein weiterer Erkenntnisbeitrag (vgl. Abschnitt 4.2.2.4).

Das Verfahren zeigt zudem auf, wie PROMETHEE mit problemstrukturierenden Methoden kombiniert werden kann, um Handlungsmaßnahmen im komplexen Entscheidungskontext des WEN zu entwickeln und hinsichtlich verschiedener Nachhaltigkeitsdimensionen zu bewerten. Dies wurde bislang in der Literatur noch nicht untersucht und stellt eine Neuerung dar. Bislang werden im Wesentlichen klassische MADM Verfahren der amerikanischen Schule für Entscheidungsprobleme im WEN verwendet, was unter Nachhaltigkeitszielen zu ungewünschter Kompensation führen kann. Durch die Verwendung des Outranking Verfahrens PROMETHEE wird in dieser Arbeit daher erstmals eine Möglichkeit aufgezeigt, Kompensation bei der Bewertung von WEN Maßnahmen zu reduzieren (vgl. Abschnitt 4.3).

Zur Demonstration der Anwendbarkeit wird das Verfahren auf eine Fallstudie zur Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen des WEN im Nahen Osten angewendet. Anhand von fünf grenzüberschreitenden Wasserbewirtschaftungsinfrastrukturkonzepten (engl. water production and transfer options, WPTO) wird aufgezeigt, wie die Phasen der Problemstrukturierung, Modellbildung und prospektiven Analyse konkret ausgestaltet werden können, um die Entscheidungen von Wasser- und Energieplanern sowie politischen Entscheidern zu unterstützen. Problemstrukturierende Methoden, wie die Szenarioplanung und Strategietabellen, helfen bei der Entwicklung von Alternativen. Durch ergänzende methodische Werkzeuge, z. B. techno-ökonomische Analysen zur Bestimmung der spezifischen Wasserkosten, wurde zudem gezeigt, wie Kriterienausprägungen von Infrastrukturmaßnahmen im WEN auch in frühen Planungsphasen zielspezifisch ermittelbar sind.

Als Ergebnis wurden insgesamt zwei weitestgehend gleichstark präferierte Alternativen über die drei betrachteten Gruppen von Akteuren und drei verschiedene Entwicklungsszenarien ermittelt. Mittels der Analysemöglichkeiten, die durch Verwendung von MAMCA und PROMETHEE im vorgestellten Verfahren entstehen, wurden Unterschiede zwischen den Präferenzen der beteiligten Akteure sichtbar gemacht. Während eine Alternative mit vergleichsweise hohen Kosten und negativen Umweltwirkungen verbunden ist, erfährt sie zugleich eine höhere gesellschaftliche und politische Akzeptanz seitens eines Akteurs. Die zweite, insgesamt ähnlich stark präferierte Alternative, ist darauf ausgelegt, die techno-ökonomischen Vorteile einer grenzüberschreitenden Süßwasserversorgung zu maximieren und wird von den beiden weiteren Akteuren stärker präferiert. Zudem kann eine neue Wasserkraftanlage ökonomisch vorteilhaft in dieses Konzept integriert werden. Dies führt über alle Szenarien und Akteure zu einer insgesamt ähnlichen Bewertung dieser beiden Alternativen.

Der besondere praktische Nutzen dieses Verfahrens, im Vergleich zu bereits bekannten Entscheidungsunterstützungsverfahren, besteht also darin, dass die gewonnenen Informationen zur zielgerichteten

Weiterentwicklung der Alternativen oder der Erarbeitung ergänzender Maßnahmen zur Konsensfindung genutzt werden können. Als konkrete Möglichkeit für das aufgezeigte Fallbeispiel des WEN wurde ein ergänzendes Wasser-Energie-Tauschabkommen zwischen den beteiligten Akteuren konzipiert. Die Fallstudie demonstriert die praktische Anwendbarkeit des in Abschnitt 4.3 entwickelten Verfahrens. Ebenso ist es, nach geeigneten Anpassungen, auch auf weitere Problemstellungen im WEN und darüber hinaus übertragbar. Die Übertragbarkeit ist möglich, da es, wie oben gezeigt, einerseits systematisch die spezifischen Anforderungen an MCDA Verfahren im WEN adressiert und andererseits flexibel in der Ausgestaltung ist. Durch die Empfehlung konkreter PSM und deren Einbettung in das Ablaufschema von MAMCA und PROMETHEE gibt das Verfahren potenziellen Anwendern dabei einen konkreten Handlungsablauf mit etablierten methodischen Konzepten vor (vgl. Abbildung 4.4).

Die Erkenntnisse dieser Arbeit bieten zudem Anknüpfungspunkte für weitere Forschungsarbeiten. Dieser bezieht sich einerseits auf mögliche methodische Erweiterungen des in Kapitel 4 entwickelten Verfahrens sowie andererseits auf den in Kapitel 5 präsentierten Anwendungsfall.

Im Fallbeispiel wurden Kriterienausprägungen der spezifischen CO₂ Emissionen anhand des prognostizierten Energiebedarfs der Entsalzung und Förderung und einem regionalen Strommix ermittelt. Weitere umweltbezogene Wirkungen wurden über ein qualitatives Proxy-Kriterium berücksichtigt und über eine Punkteskala quantifiziert (vgl. Abschnitt 5.2.4.2). Darüber hinausgehend können in weiteren Arbeiten ökobilanzielle Bewertungen zur Bestimmung des Treibhauspotenzials und der weiteren Umweltwirkungen der betrachteten Infrastrukturkonzepte erstellt werden. Die Ökobilanz (engl. life cycle assessment, LCA) quantifiziert die Umweltwirkungen eines Produktsystems, einer Dienstleistung oder eines Prozesses über ihren gesamten Lebenszyklus und ist ein verbreitetes Umweltanalyseinstrument zur Entscheidungsunterstützung (Frischknecht 2020). Ein Überblick über LCA für die MWE findet sich bei Lee und Jepson (2021), während Muñoz et al. (2010) aufzeigen, wie wasserwirtschaftliche Versorgungskonzepte mittels LCA hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen analysiert werden können. Auch für Entscheidungsprobleme des WEN werden bereits vereinzelt LCA eingesetzt (vgl. Aberilla et al. 2020).

Im Prozessschritt der Präferenzenerhebung ergeben sich ebenfalls Anknüpfungspunkte. Im Anwendungsfall wurde Simos' Methode zur Erhebung von Kriteriengewichten verwendet. Die Erhebung wurde über hybride Workshopformate, d. h. in Präsenzworkshops sowie Online, durchgeführt. Hieraus ergeben sich zwei wesentliche Ausgangspunkte für weitere Forschungsarbeiten. Einerseits zeigte die Analyse (vgl. Abschnitt 5.4.1.1), dass die Kriteriengewichte mitunter einen großen Einfluss auf die ermittelten Präferenzrelationen haben. Zur Umsetzung von Entscheidungen mit großer Tragweite, wie im dargestellten Fallbeispiel, ist es daher wichtig, eine Erhebungsmethode zu verwenden, welche die Kriteriengewichte zuverlässig ermittelt (Siskos und Tsotsolas 2015). Es ist daher zu validieren, ob die erhobenen Kriteriengewichte repräsentativ sind und ob die Verwendung anderer Erhebungsmethoden einen Einfluss auf die erhaltenen Präferenzrelationen haben kann (Lienert et al. 2016). Andererseits ergeben sich Möglichkeiten hinsichtlich der Online durchgeführten Erhebungen. Diese sind bislang nur wenig verbreitet und werden in der Literatur mitunter kritisch rezipiert, da sie Raum für Missverständnisse und Verzerrungen bei den Entscheidungstragenden schaffen können (Aubert und Lienert 2019; Marttunen und Hämäläinen 2008). Die gezielte Ausgestaltung von Präferenzenerhebungen im Onlineformat zur Vermeidung von ungewünschten Verhaltenseffekten und zur Förderung des Problemverständnisses für komplexe Entscheidungsprobleme mit hoher Tragweite, wie denen im Fallbeispiel und WEN, sollte daher weiter untersucht werden (vgl. Aubert et al. 2023; Aubert et al. 2020).

Mögliche methodische Erweiterungen des vorgestellten Verfahrens bestehen hinsichtlich der zur Entwicklung von Handlungsalternativen verwendeten Strategietabellen. Darin werden Alternativen durch

iterative Auswahl kompatibler Teilentscheidungen über verschiedene Entscheidungsfelder generiert. Das genaue Vorgehen zur Auswahl dieser Teilentscheidungen, um zu einer gewünschten Menge von Alternativen zu gelangen, ist in der Literatur bislang jedoch nicht geklärt (Siebert und Keeney 2015; Gregory et al. 2012a). Zudem ist auch dieser Prozess anfällig für kognitive Verzerrungen und ungewünschte Verhaltenseffekte (vgl. z. B. Montibeller und Von Winterfeldt 2015). Beispielsweise kann die Generierung und Wahl von Elementen in der Strategietabelle durch das vorhandene Wissen der beteiligten Akteure limitiert sein. Darüber hinaus kann der Kontext, in dem die Auswahl stattfindet, z. B. anonym oder in einer Gruppe, das Ergebnis beeinflussen. Weitere Forschungsarbeiten könnten diese Aspekte untersuchen und das Vorgehen im Schritt der Erstellung von Alternativen mittels Strategietabellen zu konkretisieren.

Darüber hinaus kann die Wahl einer anderen Aggregationsprozedur zur Auswahl und Bewertung der erstellten Maßnahmen untersucht werden. Bislang wird, wie im Fallbeispiel exemplarisch aufgezeigt, für jedes Entscheidungsfeld der Strategietabelle eine Menge von Alternativen generiert und separat aggregiert (vgl. Abschnitt 5.2.3.2). Die Menge an insgesamt umzusetzenden Maßnahmen im Kontext des WEN besteht in der Regel jedoch aus einer Reihe von Maßnahmen aus verschiedenen Entscheidungsfeldern, welche in ihrer Gesamtheit zu betrachten sind (Howlett und Mukherjee 2023; Hoff et al. 2019). Das vorgestellte MCDA Verfahren könnte deshalb um Möglichkeiten erweitert werden, ein solches Bündel von WEN Maßnahmen mittels PROMETHEE multikriteriell bewerten zu können. Hierzu bieten sich z. B. die Ansätze der Portfolio-Entscheidungsanalyse (engl. Portfolio Decision Analysis, PDA) an (vgl. z. B. Salo et al. 2011). Ein Vorgehen zur Erstellung von Maßnahmenportfolios für wasserwirtschaftliche Entscheidungsprobleme wird in Ferretti et al. (2019) vorgestellt. Eine Methode zur Bewertung von Portfolios von Nachhaltigkeitsmaßnahmen mittels PROMETHEE wird in Pohl (2023) vorgestellt. Der Ansatzpunkt für weitere Forschung besteht also darin, dieses Vorgehen für den Problemkontext des WEN zu formalisieren.

Weiterer Forschungsbedarf besteht ebenso hinsichtlich des Vorgehens zur Erhebung der Präferenzinformationen und der Generierung von Alternativen. Hier sollten verhaltenstheoretische Aspekte und eventuelle Unsicherheiten untersucht werden. Sie sind nach Möglichkeit durch Entwicklung entsprechender Verfahrensabläufe (engl. *debiasing measures*) zu vermeiden (vgl. z. B. Hämäläinen und Lahtinen 2016; Ferretti et al. 2023). Ebenso kann es sinnvoll sein, den Einfluss dieser Aspekte auf die Bewertung zu identifizieren und diesen für Entscheidungstragende sichtbar zu machen.

In dieser Arbeit wird ein neues MCDA Verfahren zur Entwicklung und prospektiven Bewertung von Handlungsalternativen im WEN mittels PROMETHEE entwickelt. Es berücksichtigt die Herausforderungen der multikriteriellen Entscheidungsanalyse im WEN erstmalig gänzlich, um die integrierte Planung einer nachhaltigen Wasser- und Energieversorgung zu unterstützen. Damit erweitert es die bestehenden Verfahren der präskriptiven Entscheidungstheorie, welche ein Teilgebiet des Operations Research ist. Die Aggregationsmethodik nach MAMCA und PROMETHEE und die Analysefunktionen wurden mittels der Programmiersprache Python implementiert und an einem umfangreichen Fallbeispiel zur Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen des WEN im Nahen Osten angewandt und validiert. Das Fallbeispiel entstammt der SALAM-Initiative, die verschiedene Maßnahmen zur Behebung des Wasserdefizitproblems in Israel, Jordanien und Palästina anhand der Präferenzen der Entscheidungstragenden und Interessensgruppen der Region bewertet. Die Bewertung unterstützt die politischen Entscheidungstragenden bei der Auswahl und Umsetzung ausgewählter Maßnahmen und bietet zudem Planern der Wasser- und Energieversorgung in der Region Ansatzpunkte in den nachfolgenden Planungsphasen. Das vorgestellte MCDA Verfahren kann jedoch auch allgemein sowohl von Planern in

der Wasser- und Energiewirtschaft als auch von politischen Entscheidungstragenden und Institutionen verwendet werden.

Anhang A

Tabelle A.1: Publikationen zur Entscheidungsfindung im Bereich des WEN im weiteren Sinne

Autoren/ Autorinnen	Titel	Fachzeitschrift	Jahr	Verwendete Methoden	DOI
Aberilla et al.	An integrated sustainability assessment of synergistic supply of energy and water in remote communities	Sustainable Production and Consumption	2020	Techno-ökonomische Analyse, LCA, SLCA, MCDA	10.1016/j.spc.2020.01.003
Ahmadali-pour et al.	Multi-criteria evaluation of CMIP5 GCMs for climate change impact analysis	Theoretical and Applied Climatology	2017	Univariate und Bivariate statistische Analyse	10.1007/s00704-015-1695-4
Al-Fadhli et al.	Simultaneous optimization of power generation and desalination systems: a general approach with applications to Kuwait	Clean Technologies and Environmental Policy	2022	Simulation, Mathematische Programmierung	10.1007/s10098-022-02303-3
Almulla et al.	From participatory process to robust decision-making: An Agriculture-water-energy nexus analysis for the Souss-Massa basin in Morocco	Energy for Sustainable Development	2022	UNECE Nexus Methode, GIS, WEAP	10.1016/j.esd.2022.08.009
Anderson et al.	An integrated modeling framework for crop and biofuel systems using the DSSAT and GREET models	Environmental Modelling and Software	2018	Simulation, LCA	10.1016/j.envsoft.2018.07.004
Araya et al.	Use of real options to enhance water-energy nexus in mine tailings management	Applied Energy	2021	Techno-ökonomische Analyse, Monte-Carlo Simulation	10.1016/j.apenergy.2021.117626
Arfelli et al.	Nexus analysis and life cycle assessment of regional water supply systems: A case study from Italy	Resources, Conservation and Recycling	2022	LCA	10.1016/j.resconrec.2022.106446
Bailey et al.	The impact of advanced treatment technologies on the energy use in satellite water reuse plants	Water	2020	Material- und Energieflussanalyse	10.3390/w12020366
Basheer und Elagib	Sensitivity of Water-Energy Nexus to dam operation: A Water-Energy Productivity concept	Science of the Total Environment	2018	Simulation	10.1016/j.scitotenv.2017.10.228
Bertone et al.	Guidelines, barriers and strategies for energy and water retrofits of public buildings	Journal of Cleaner Production	2018	Szenarioplanung, Interviews	10.1016/j.jclepro.2017.11.065
Bórquez und Fuster	Energy and water policies in Chile, two different endings with implications in the water-energy nexus	Energies	2021	Leitfadeninterviews	10.3390/en14113286

Autoren/ Autorinnen	Titel	Fachzeitschrift	Jahr	Verwendete Methoden	DOI
Brazeau und Edwards	Water and energy savings from on-demand and hot water recirculating systems	Journal of Green Building	2013	Feldstudie	10.3992/jgb.8.1.75
Brik, Guerrah und Atia	Water-energy nexus: A systematic analysis and evaluation of a center-pivot irrigation system	Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects	2022	Feldstudie, Modellierung	10.1080/15567036.2022.2120929
Cantoni	Fighting Science with Science: Counter-Expertise Production in Anti-Shale Gas Mobilizations in France and Polen	NTM International Journal of History and Ethics of Natural Sciences, Technology and Medicine	2022	Leitfadeninterviews	10.1007/s00048-022-00342-x
Chen et al.	Regional-scale water-energy nexus management by a mixed Possibilistic-Flexible robust nonlinear programming model	Journal of Hydrology	2021	Mathematische Programmierung, Robuste Optimierung, Fuzzylogik	10.1016/j.jhydrol.2021.126852
Chenoweth und Al-Masri	The impact of adopting a water-energy nexus approach in Jordan on transboundary management	Environmental Science and Policy	2021	Leitfadeninterviews, Literaturüberblick	10.1016/j.envsci.2021.01.006
Cooke et al.	On the sustainability of inland fisheries: Finding a future for the forgotten	Ambio	2016	- (Perspektivartikel)	10.1007/s13280-016-0787-4
Dadfar et al.	Storage ponds application for flood control, hydropower generation and water supply	International Review of Civil Engineering	2019	Technische Analyse	10.15866/irece.v10i4.17133
Daneshvar et al.	Risk-Oriented Operational Model for Fully Renewable Cooperative Prosumers in a Modern Water-Energy Nexus Structure	IEEE Transactions on Sustainable Energy	2023	Mathematische Programmierung, Simulation	10.1109/TSSTE.2023.3287768
De und Majumder	Allocation of energy in surface water treatment plants for maximum energy conservation	Environment, Development and Sustainability	2020	Metaheuristische Algorithmen, MCDA	10.1007/s10668-019-00349-w
Engström et al.	Connecting the resource nexus to basic urban service provision – with a focus on water-energy interactions in New York City	Sustainable Cities and Society	2017	Techno-ökonomische Analyse, Szenarioplanung	10.1016/j.scs.2017.02.007
Erguvan et al.	Modelling of a novel near zero energy for a wastewater treatment plant with OXY-Biogas power cycle	Energy Conversion and Management	2022	Mathematische Programmierung	10.1016/j.enconman.2022.115926

Autoren/ Autorinnen	Titel	Fachzeitschrift	Jahr	Verwendete Methoden	DOI
Ferraz de Campos et al.	Hybrid power generation for increasing water and energy securities during drought: Exploring local and regional effects in a semi-arid basin	Journal of Environmental Management	2021	Mathematische Programmierung, Simulation, Szenarioplanung	10.1016/j.jenvman.2021.112989
Gao et al.	Comprehensive evaluation on energy-water saving effects in iron and steel industry	Science of the Total Environment	2019	Material- und Energieflussanalyse, Techno-ökonomische Analyse	10.1016/j.scitotenv.2019.03.101
Gao et al.	Chance-constrained operation of the water-energy nexus with conflicting objectives	IET Energy Systems Integration	2021	Mathematische Programmierung	10.1049/esi2.12016
Ghodsvali et al.	An online serious game for decision-making on food-water-energy nexus policy	Sustainable Cities and Society	2022	Mathematische Programmierung, Spieltheorie, Lernspiele	10.1016/j.scs.2022.104220
Ghodsvali et al.	An integrated decision support system for the urban food-water-energy nexus: Methodology, modification, and model formulation	Computers, Environment and Urban Systems	2023	Mathematische Programmierung, Spieltheorie, Szenarioplanung	10.1016/j.compenvurbsys.2023.101940
González Perea et al.	New memory-based hybrid model for middle-term water demand forecasting in irrigated areas	Agricultural Water Management	2023	Künstliche neuronale Netze, Fuzzylogik, Metaheuristische Algorithmen	10.1016/j.agwat.2023.108367
Hensengerth	Where is the power? Transnational networks, authority and the dispute over the Xayaburi Dam on the Lower Mekong Mainstream	Water International	2015	Literaturgestützte Analyse und Diskussion	10.1080/02508060.2015.1088334
Holding et al.	Enhancing water security in a rapidly developing shale gas region	Journal of Hydrology: Regional Studies	2017	Literaturüberblick	10.1016/j.ejrh.2015.09.005
Howarth und Monasterolo	Opportunities for knowledge co-production across the energy-food-water nexus: Making interdisciplinary approaches work for better climate decision making	Environmental Science and Policy	2017	Literaturüberblick, Experteninterviews, Qualitative Workshops	10.1016/j.envsci.2017.05.019
Huang et al.	Balancing the water-energy dilemma in nexus system planning with bi-level and multi-uncertainty	Energy	2023	Mathematische Programmierung, Klimamodellierung	10.1016/j.energy.2023.127720
Ishimatsu et al.	Desalination network model driven decision support system: A case study of Saudi Arabia	Desalination	2017	Mathematische Programmierung, Graphentheorie, GIS	10.1016/j.desal.2017.09.009

Autoren/ Autorinnen	Titel	Fachzeitschrift	Jahr	Verwendete Methoden	DOI
Ji et al.	Multi-stage stochastic fuzzy random programming for food-water-energy nexus management under uncertainties	Resources, Conservation and Recycling	2020	Mathematische Programmierung, Stochastische Programmierung, Fuzzylogik	10.1016/j.resconrec.2019.104665
Jornada und Leon	Robustness methodology to aid multiobjective decision making in the electricity generation capacity expansion problem to minimize cost and water withdrawal	Applied Energy	2016	Mathematische Programmierung, Robuste Optimierung	10.1016/j.apenergy.2015.10.157
Kehrein et al.	A techno-economic analysis of membrane-based advanced treatment processes for the reuse of municipal wastewater	Water Reuse	2021	Techno-ökonomische Analyse	10.2166/wrd.2021.016
Kenway et al.	Dynamic simulation of showers to understand water-related energy in households	Energy and Buildings	2019	Mathematische Programmierung, Material- und Energieflussanalyse	10.1016/j.enbuild.2019.03.008
Khatavkar und Mays	Real-Time Operation of Water-Supply Canal Systems under Limited Electrical Power and/or Water Availability	Journal of Water Resources Planning and Management	2020	Mathematische Programmierung	10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001191
Khayatnezhad et al.	Integrated modeling of food–water–energy nexus for maximizing water productivity	Water Supply	2023	Mathematische Programmierung,	10.2166/ws.2023.038
Kiziltan	Water-energy nexus of Turkey’s municipalities: Evidence from spatial panel data analysis	Energy	2021	Räumliche ökonomische Modellierung	10.1016/j.energy.2021.120347
Koh et al.	Hard-coupling water and power system models increases the complementarity of renewable energy sources	Applied Energy	2022	Mathematische Programmierung, Zeitreihenanalyse	10.1016/j.apenergy.2022.119386
Komendantova et al.	Water-energy nexus: Addressing stakeholder preferences in Jordan	Sustainability	2020	MCDA	10.3390/su12156168
Lee et al.	Water-energy nexus for multi-criteria decision making in water resource management: A case study of Choshui river basin in Taiwan	Water	2018	MCDA	10.3390/w10121740
Liu et al.	Optimisation of water-energy nexus based on its diagram in cascade reservoir system	Journal of Hydrology	2019	Mathematische Programmierung, Metaheuristische Algorithmen	10.1016/j.jhydrol.2018.12.010

Autoren/ Autorinnen	Titel	Fachzeitschrift	Jahr	Verwendete Methoden	DOI
Lohrmann et al.	Global and regional models for identification of cooling technology in thermal power generation for water demand estimations in water-energy nexus studies	Journal of Cleaner Production	2022	Maschinelles Lernen, Sortieralgorithmen	10.1016/j.jclepro.2022.134842
Ma et al.	Water-energy nexus under uncertainty: Development of a hierarchical decision-making model	Journal of Hydrology	2020	Stochastische Programmierung	10.1016/j.jhydrol.2020.125297
Mayor et al.	An expert outlook on water security and water for energy trends to 2030-2050	Water Policy	2016	Delphi-Befragung	10.2166/wp.2015.196
McCallum et al.	Developing food, water and energy nexus workflows	International Journal of Digital Earth	2020	Multivariate statistische Analyse, Simulation	10.1080/17538947.2019.1626921
McEvoy und Wilder	Discourse and desalination: Potential impacts of proposed climate change adaptation interventions in the Arizona-Sonora border region	Global Environmental Change	2012	Literaturstudie, Risikoanalyse	10.1016/j.gloenvcha.2011.11.001
Moreno et al.	Optimisation of the design of pressurised irrigation systems for irregular shaped plots	Biosystems Engineering	2016	Mathematische Programmierung	10.1016/j.biosystemseng.2016.10.005
Mroue et al.	Energy Portfolio Assessment Tool (EPAT): Sustainable energy planning using the WEF nexus approach – Texas case	Science of the Total Environment	2019	Material- und Energieflussanalyse, CO ₂ -Bilanzierung	10.1016/j.scitotenv.2018.08.135
Nakhaei et al.	A novel framework for technical performance evaluation of water distribution networks based on the water-energy nexus concept	Energy Conversion and Management	2022	Modellierung, Simulation, Künstliche neuronale Netze	10.1016/j.enconman.2022.116422
Nakhaei et al.	A smart Sustainable decision Support system for water management of power plants in water stress regions	Expert Systems with Applications	2023	Entscheidungsbaumalgorithmen, MCDA	10.1016/j.eswa.2023.120752
Ng et al.	An agent-based model of farmer decision-making and water quality impacts at the watershed scale under markets for carbon allowances and a second-generation bio-fuel crop	Water Resources Research	2011	Agentenbasierte Simulation, Hydro-ökonomische Modellierung	10.1029/2011WR010399
Papapostolou et al.	Sustainable water supply systems for the islands: The integration with the energy problem	Renewable Energy	2020	Mathematische Programmierung	10.1016/j.renene.2019.07.130

Autoren/ Autorinnen	Titel	Fachzeitschrift	Jahr	Verwendete Methoden	DOI
Parkinson et al.	A multi-criteria model analysis framework for assessing integrated water-energy system transformation pathways	Applied Energy	2018	Mathematische Programmierung, MCDA	10.1016/j.apenergy.2016.12.142
Perrone et al.	Gaining perspective on the water-energy nexus at the community scale	Environmental Science and Technology	2011	Material- und Energieflussanalyse	10.1021/es103230n
Peterson et al.	Material and energy flow analysis of craft brewing: A case study at a California microbrewery	Frontiers in Sustainable Food Systems	2022	Material- und Energieflussanalyse	10.3389/fsufs.2022.1028520
Ramírez et al.	Decision-support framework for the environmental assessment of water treatment systems	Journal of Cleaner Production	2019	Material- und Energieflussanalyse, Szenarioplanung	10.1016/j.jclepro.2019.03.319
Ranzani et al.	Hydropower future: Between climate change, renewable deployment, carbon and fuel prices	Water	2018	Hydro-ökonomische Modellierung, Szenarioplanung	10.3390/w10091197
Rasul	Managing the food, water, and energy nexus for achieving the Sustainable Development Goals in South Asia	Environmental Development	2016	- (Perspektivartikel)	10.1016/j.envdev.2015.12.001
Rasul und Neupane	Improving Policy Coordination Across the Water, Energy, and Food, Sectors in South Asia: A Framework	Frontiers in Sustainable Food Systems	2021	Literaturstudie	10.3389/fsufs.2021.602475
Saucedo-Ramírez et al.	Optimization of water allocation networks in highly engineered basins: The case of Guandu River basin, Rio de Janeiro State, Brasilien	Journal of Cleaner Production	2022	Mathematische Programmierung	10.1016/j.jclepro.2022.131787
Scott et al.	Policy and institutional dimensions of the water-energy nexus	Energy Policy	2011	Literaturstudie, Politikanalyse	10.1016/j.enpol.2011.08.013
Shirkey et al.	An environmental and societal analysis of the us electrical energy industry based on the water–energy nexus	Energies	2021	Material- und Energieflussanalyse, Techno-ökonomische Analyse	10.3390/en14092633
Shmelev und Shmeleva	Global urban sustainability assessment: A multidimensional approach	Sustainable Development	2018	Regressionsanalyse, MCDA	10.1002/sd.1887
Siddiqi et al.	Bridging decision networks for integrated water and energy planning	Energy Strategy Reviews	2013	Quantitative Datenanalyse, Stakeholderanalyse	10.1016/j.esr.2013.02.003
Siems und Sahin	Energy intensity of residential rainwater tank systems: Exploring the economic and environmental impacts	Journal of Cleaner Production	2016	Monitoringstudie	10.1016/j.jclepro.2015.11.020

Autoren/ Autorinnen	Titel	Fachzeitschrift	Jahr	Verwendete Methoden	DOI
Singh und Colosi	Water–energy sustainability synergies and health benefits as means to motivate potable reuse of coalbed methane-produced waters	Ambio	2019	- (Perspektivartikel)	10.1007/s13280-018-1098-8
Skourtos et al.	A combined probabilistic framework to support investment appraisal under uncertainty in desalination projects: An application to Kuwait's water/energy nexus	Water Science and Technology: Water Supply	2021	Techno-ökonomische Analyse, Monte-Carlo Simulation	10.2166/ws.2020.278
Sousa und Meireles	Dynamic simulation of the energy consumption and carbon emissions for domestic hot water production in a touristic region	Journal of Cleaner Production	2022	Dynamische Simulationsmodellierung	10.1016/j.jclepro.2022.131828
Stokes et al.	Save water to save carbon and money: Developing abatement costs for expanded greenhouse gas reduction portfolios	Environmental Science and Technology	2014	Systemdynamische Simulation	10.1021/es503588e
Tariq et al.	Artificial intelligence assisted technoeconomic optimization scenarios of hybrid energy systems for water management of an isolated community	Sustainable Energy Technologies and Assessments	2021	Mathematische Programmierung, Genetische Algorithmen	10.1016/j.seta.2021.101561
Terrapon-Pfaff et al.	Localizing the water-energy nexus: The relationship between solar thermal power plants and future developments in local water demand	Sustainability	2021	Qualitative Workshops, Szenarioplanung, MCDA	10.3390/su13010108
Velázquez et al.	Rethinking the Concepts of Virtual Water and Water Footprint in Relation to the Production-Consumption Binomial and the Water-Energy Nexus	Water Resources Management	2011	Literaturstudie	10.1007/s11269-010-9724-7
Wang et al.	Extended water-energy nexus contribution to environmentally-related sustainable development goals	Renewable and Sustainable Energy Reviews	2021	Literaturstudie	10.1016/j.rser.2021.111485
Wang et al.	System nexus consolidates coupling of regional water and energy efficiencies	Energy	2022	Data Envelopment Analysis (DEA)	10.1016/j.energy.2022.124631
Wells et al.	The impacts of tourism development on perceptions and practices of sustainable wastewater management on the Placencia Peninsula, Belize	Journal of Cleaner Production	2016	Feldstudie, Leitfadenerinterviews, Fragebogenstudie	10.1016/j.jclepro.2014.08.050

Autoren/ Autorinnen	Titel	Fachzeitschrift	Jahr	Verwendete Methoden	DOI
Wu et al.	Sustainability assessment of urban water planning using a multicriteria analytical tool - A case study in Ningbo, China	Water Policy	2017	Kostenrechnung, MCDA	10.2166/wp.2016.241
Wu et al.	Sustainable regional water allocation under water-energy nexus: A chance-constrained possibilistic mean-variance multi-objective programming	Journal of Cleaner Production	2021	Ökonometrische Modellierung, Mathematische Programmierung, Fuzzylogik	10.1016/j.jclepro.2021.127934
Yimere und Assefa	Assessment of the water-energy nexus under future climate change in the Nile river basin	Climate	2021	Mathematische Programmierung, Szenarioplanung	10.3390/CLI9050084
Yu et al.	Water management for industrial development, energy conservation, and subjective attitudes: A comprehensive risk-oriented model to explore the tolerance of unbalanced allocation problem	Journal of Water and Climate Change	2022	Stochastische Programmierung	10.2166/wcc.2021.377
Yuan et al.	Understanding synergies and trade-offs between water and energy production at landfill sites	Science of the Total Environment	2019	Molekularbiologische Analyse	10.1016/j.scitotenv.2019.06.075
Zhang et al.	Resource nexus for sustainable development: Status quo and prospect	Chinese Science Bulletin	2021	Regressionsanalyse	10.1360/TB-2020-1193
Zhang et al.	Dual risk-aversion programming for regional industrial structure adjustment with water-energy nexus: A case study of Tianjin, China	Journal of Environmental Management	2022	Stochastische Programmierung	10.1016/j.jenvman.2022.115644
Zheng et al.	Synergic management of crop planting structure and biomass utilization pathways under a food-energy-water nexus perspective	Journal of Cleaner Production	2022	Mathematische Programmierung, Fuzzylogik	10.1016/j.jclepro.2021.130314
Zhou et al.	Intertwined impacts of water, energy development, and carbon emissions in China	Applied Energy	2019	Integrierte Bewertung, Szenarioplanung	10.1016/j.apenergy.2018.12.085
Zhou et al.	Capturing the co-benefits of energy efficiency in China – A perspective from the water-energy nexus	Resources, Conservation and Recycling	2018	Ökonomische Simulationsmodellierung	10.1016/j.resconrec.2018.01.019
Zimoch et al.	Sustainable water supply systems management for energy efficiency: A case study	Energies	2021	Hydro-ökonomische Modellierung, GIS, CO ₂ -Bilanzierung	10.3390/en14165101

Tabelle A.2: Publikationen zu multikriteriellen Entscheidungsunterstützungsverfahren im WEN

Nr.	Autorinnen / Autoren (Jahr)	Titel	Dokumententyp	Name der Zeitschrift / Konferenz	Verwendete Methoden
1	De und Majumder (2020)	Allocation of energy in surface water treatment plants for maximum energy conservation	Fachartikel	Environment, Development and Sustainability	Metaheuristische Optimierungsalgorithmen, AHP
2	Komendantova et al. (2020)	Water-energy nexus: Addressing stakeholder preferences in Jordan	Fachartikel	Sustainability	DecideIT software tool, basierend auf der CAR Methode
3	Lee et al. (2018)	Water-energy nexus for multi-criteria decision making in water resource management: A case study of Choshui river basin in Taiwan	Fachartikel	Water	MCDCA mit einfachem additivem Modell (SAW)
4	Marcella et al. (2020)	Development of an energy sustainability plan for the metropolitan water district of Southern California	Konferenzbeitrag	93rd Water Environment Federation Technical Exhibition and Conference 2020	Szenarioplanung, MCDCA mit einfachem additivem Modell (SAW)
5	Nakhaei et al. (2023)	A smart sustainable decision support system for water management of power plants in water stress regions	Fachartikel	Expert Systems with Applications	Modellierung, Simulation, Künstliche neuronale Netze, TOPSIS, AHP, SAW
6	Navarro und Van Nooijen (2022)	Managing water and energy on small islands study case Caye Chapel	Konferenzbeitrag	IFAC-PapersOnLine	Simulation, MAVT
7	Parkinson et al. (2018)	A multi-criteria model analysis framework for assessing integrated water-energy system transformation pathways	Fachartikel	Applied Energy	Mathematische Optimierung, Mehrzielprogrammierung
8	Saucedo-Ramírez et al. (2022)	Optimization of water allocation networks in highly engineered basins: The case of Guandu River basin, Rio de Janeiro State, Brazil	Fachartikel	Journal of Cleaner Production	Szenarioplanung, Mehrzielprogrammierung
9	Sivakumar und Ramezaniapour (2015)	Sustainable solar powered vacuum membrane distillation for water treatment	Konferenzbeitrag	International Conference on Technologies for Sustainable Development	AHP
10	Terrapon-Pfaff et al. (2020)	Localizing the water-energy nexus: The relationship between solar thermal power plants and future developments in local water demand	Fachartikel	Sustainability	Qualitative Workshops, Szenarioplanung, MAVT
11	Wu et al. (2017)	Sustainability assessment of urban water planning using a multicriteria analytical tool - A case study in Ningbo, China	Fachartikel	Water Policy	Kostenrechnung, AHP

Anhang B

Tabelle B.1: Alternativen zur MWE am Mittelmeer und am Roten Meer (fortlaufend)

Bezeichnung	Beschreibung
Haifa küstennah (SWD I1)	Die Küstenlinie wird durch Aufschüttung landeinwärts verlängert. Die MWE-Anlage wird auf dem aufgeschütteten Land errichtet und durch Wellenbrecher geschützt. Im Vergleich zu den anderen Alternativen werden aufgrund der geringeren Wassertiefe weniger Unterwasserleitungen und Aufschüttmaterial benötigt. Dafür kann es zu Beeinträchtigungen der Küstenökosysteme kommen und es sind Veränderungen der Küstenzirkulation und der Sedimentdynamik zu erwarten.
Haifa 1 km offshore (SWD I2)	Die MWE-Anlage wird auf einer künstlichen Insel, 1 km vor der Küste von Schawe Zion bei Haifa in einer Wassertiefe von -12 m, errichtet. Die Lebensdauer der künstlichen Insel wird auf 50 Jahre geschätzt. Dieses Konzept beeinflusst die Wasserzirkulation an der Küste weniger, es sind jedoch Auswirkungen auf den Sedimenttransport zu erwarten, die zu einer Veränderung des Küstenprofils führen können.
Haifa 5 km offshore (SWD I3)	Die MWE-Anlage wird auf einer künstlichen Insel, 5 km vor der Küste von Schawe Zion bei Haifa in einer Wassertiefe von -30 m, errichtet. Die Lebensdauer der künstlichen Insel wird auf 50 Jahre geschätzt. Im Vergleich zu den anderen Alternativen werden aufgrund der größeren Wassertiefe mehr Unterwasserleitungen und Aufschüttmaterial benötigt. Die Auswirkungen auf die Wasserzirkulation an der Küste sind aufgrund der größeren Entfernung von der Küstenlinie geringer. Die Auswirkungen der Soleeinkleitung auf die Küstenökosysteme sind aufgrund der stärkeren Zirkulation und Durchmischung geringer. EE wie (PV, Wind, Wellenenergie) können direkt vor Ort genutzt werden.
Netanja an der Küste (SWD I4)	Die MWE-Anlage wird entlang der bestehenden Küstenlinie bei Netanja errichtet. Hierdurch sind ist, gegenüber den anderen Alternativen, mit weniger Materialaufwand bei zusätzlichen Kosten für Grund und Boden zu rechnen.
Netanja 1 km offshore (SWD I5)	Die MWE-Anlage wird auf einer künstlichen Insel, 1 km vor der Küste von Netanja in einer Wassertiefe von -14 m, errichtet. Sonst analog zu Alternative SWD I2.
Netanja 2,5 km offshore (SWD I6)	Die MWE-Anlage wird auf einer künstlichen Insel, 2,5 km vor der Küste von Netanja in einer Wassertiefe von -30 m, errichtet. Sonst analog zu Alternative SWD I3.
Akaba Hafen (SWD J1)	Bau einer neuen MWE-Anlage mit einem hybriden Konzept, auf der Basis von Umkehrosmose (engl. reverse osmosis, RO) mit Multi-Effekt-Destillation, im Hafen von Akaba. Die elektrische Energie wird während der Sonnenstunden aus PV-Anlagen erzeugt und ein Anschluss an das bestehende GuD-Kraftwerk in Akaba sichert die elektrische Energieversorgung während der Nacht. Die benötigte thermische Energie für die Destillation wird ebenfalls durch das GuD-Kraftwerk bereitgestellt. Die Sole wird in das Rote Meer eingeleitet.
Wadi Araba und Akaba (SWD J2)	Eine neu errichtete RO-Entsalzungsanlage produziert 160 MCM/a Süßwasser in Akaba. Weitere 40 MCM/a werden in einer neuen, hybriden Entsalzungsanlage im Wadi Araba produziert. Die Kombination aus RO und Multi-Effekt-Destillation am Standort im Wadi Araba führt zu einer hohen Energieeffizienz, erfordert jedoch eine Vorbehandlung des Zulaufwassers in Akaba, um Kalkverbindungen wie Kalzium, Magnesium sowie Chloride und Sulfat zu aus dem Zulaufwasser zu entfernen. Die Sole wird zurück ins Rote Meer geleitet. Die Aufteilung der Wasserproduktionskapazitäten zwischen Akaba und dem Wadi Araba ermöglicht es, einen höheren Anteil erneuerbarer Energien unter geringen Mehrkosten einzubinden. Die elektrische Energie wird während der Sonnenstunden hauptsächlich durch PV erzeugt, während eine CSP-Anlage die Energieversorgung während der Nacht sicherstellt. Die Abwärme der CSP wird in den thermischen Entsalzungsprozessen im Wadi Araba genutzt.
Akaba 100 % EE (SWD J3)	200 MCM/a Süßwasser werden in einer RO-Anlage im Hafen von Akaba erzeugt. Die elektrische Energie wird während der Sonnenstunden durch PV-Anlagen generiert und in Salzsammel-Batterien gespeichert, um auch nachts Energie bereitzustellen. Die Sole wird in das Rote Meer geleitet.

Bezeichnung	Beschreibung
Totes Meer und Akaba (SWD J4)	Eine RO-Anlage produziert 160 MCM/a Süßwasser in Akaba. Zusätzlich werden 40 MCM/a in der Nähe des Toten Meeres produziert. Dies erfordert jedoch eine Vorbehandlung des Zulaufwassers in Akaba, um Kalkverbindungen wie Calcium, Magnesium sowie Chloride und Sulfate zu entfernen. Die Sole hat dann eine ähnliche Zusammensetzung wie das Wasser des Toten Meeres und kann in dieses eingeleitet werden, um zu dessen Rehabilitation beizutragen. Elektrische Energie wird während der Sonnenstunden durch PV-Anlagen generiert und überschüssige Energie in Salzschnmelze-Batterien gespeichert, um nachts Energie bereitzustellen und die Anlagenverfügbarkeit zu gewährleisten.

Quelle: Eigene Darstellung nach Janowitz et al. (2022a); Janowitz et al. (2022b); Yüce und Janowitz (2022b, 2022a).

Tabelle B.2: Übersicht der befragten Personen zur Erhebung von Kriterienausprägungen

Position	Institution
Consultant	ATEEC
Chief Technology Officer	EWRE
Associate Professor	Hashemite University of Jordan
Director of Water Information Department	HEC
Director	HSI
Manager, Water and Climate Change	International Union for Conservation of Nature (IUCN)
Researcher	Jordan University of Science and Technology
Director	JVA
Secretary General	JVA
International Projects Coordinator	MEK
Senior	Ministry of Planning and International Cooperation
Geologist	MWI
Director, Drought Management Governance Unit	MWI
Secretary General	MWI
Secretary General Advisor	MWI
Secretary General	MWI
Strategic Planning Expert	MWI
Director of Environment and Climate Change	MWI
Engineer	MWI
Head of water information system and national water budget	MWI
General Director	PHG
Head of Water and Environment Centre	Royal Scientific Society Jordan
Professor	UAJ
Associate Professor	UAJ
Professor	UAJ
Professor	UAJ
Assistant Professor	UAJ
Director of Groundwater Basins	WAJ
Director, Water Quality Resources Protection Department	WAJ
Deputy Director General	Water Authority Israel
Assistant General For Strategic Planning	Water Authority of Jordan (WAJ)
Researcher	Water, Energy and Environment Center Jordan

Anhang C

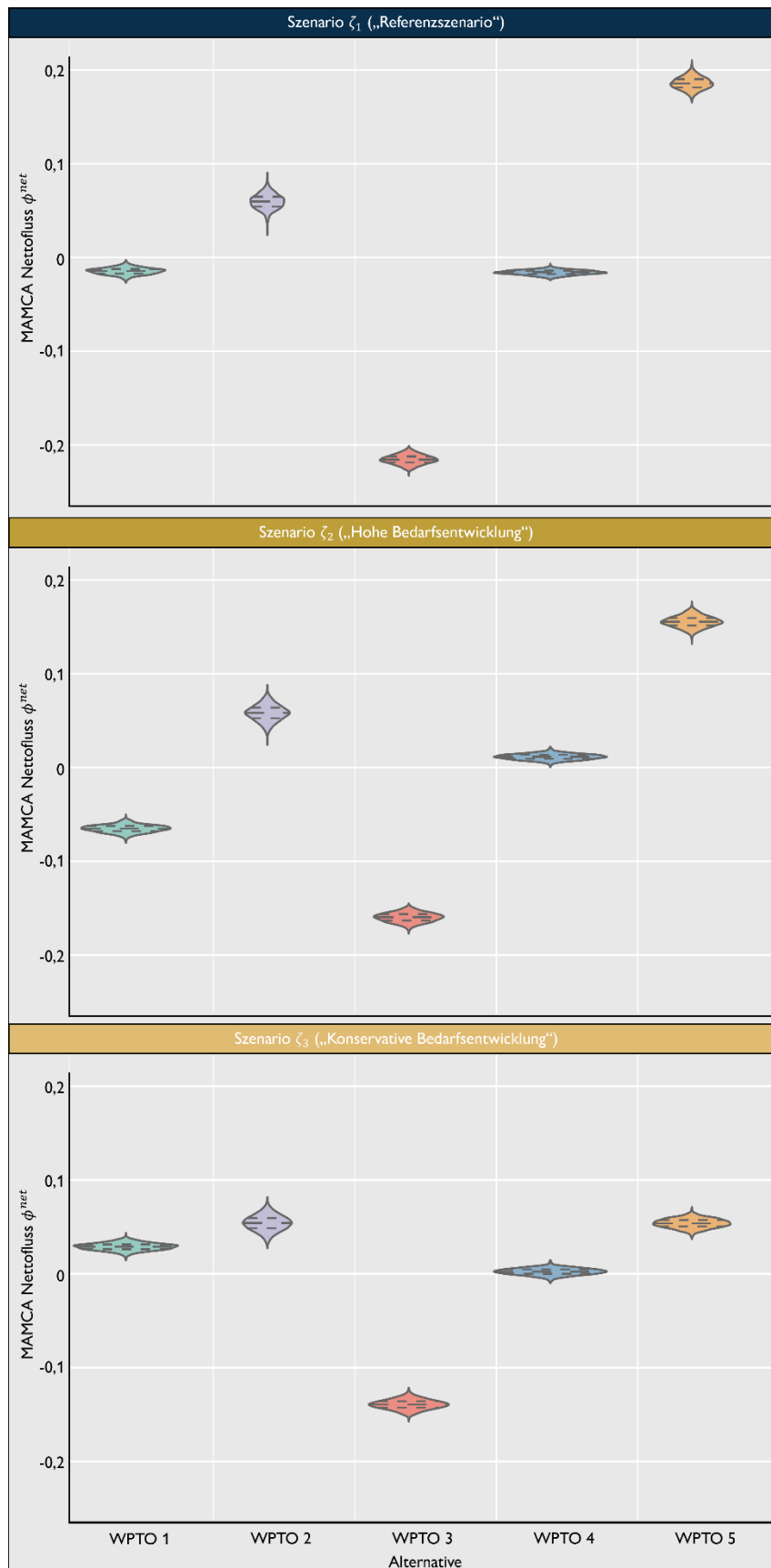


Abbildung C.1: Bewertung nach MAMCA-PROMETHEE mit veränderten Kriteriengewichten

Literatur

- Aberilla, J. M.; Gallego-Schmid, A.; Stamford, L.; Azapagic, A. (2020). An integrated sustainability assessment of synergistic supply of energy and water in remote communities. *Sustainable Production and Consumption*, 22, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.01.003>.
- Abu-Taleb, M. F.; Mareschal, B. (1995). Water resources planning in the Middle East: application of the PROMETHEE V multicriteria method. *European Journal of Operational Research*, 81(3), 500-511. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)00007-Y](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00007-Y).
- Abuabara, L.; Paucar-Caceres, A. (2021). Surveying applications of strategic options development and analysis (SODA) from 1989 to 2018. *European Journal of Operational Research*, 292(3), 1051-1065. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.11.032>.
- Ackermann, F.; Eden, C. (2020). Strategic options development and analysis. *Systems approaches to making change: A practical guide*, 139-199. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-7472-1_4.
- ADB. (2013). *Thinking about water differently: Managing the water-food-energy nexus*. Asian Development Bank.
- Agarwal, A.; de los Angeles, M. S.; Bhatia, R.; Chéret, I.; Davila-Poblete, S.; Falkenmark, M.; Villarreal, F. G.; Jönch-Clausen, T.; Kadi, M. A.; Kindler, J. (2000). *Integrated water resources management*. Global Water Partnership, Stockholm.
- Al-Omari, A. S.; Al-Karablieh, E. K.; Al-Houri, Z. M.; Salman, A. Z.; Al-Weshah, R. A. (2015). Irrigation water management in the Jordan Valley under water scarcity. *Fresenius Environ Bull*, 24(4), 1176-1188.
- Al-Saidi, M.; Elagib, N. A. (2017). Towards understanding the integrative approach of the water, energy and food nexus. *Science of the Total Environment*, 574, 1131-1139. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.046>.
- Albrecht, T. R.; Crotoft, A.; Scott, C. A. (2018). The Water-Energy-Food Nexus: A systematic review of methods for nexus assessment. *Environmental Research Letters*, 13(4), 043002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa9c6>.
- Allan, J. A. (2003). Virtual water-the water, food, and trade nexus. Useful concept or misleading metaphor? *Water international*, 28(1), 106-113. <https://doi.org/10.1080/02508060.2003.9724812>.
- Allouche, J.; Middleton, C.; Gyawali, D. (2015). Technical veil, hidden politics: Interrogating the power linkages behind the nexus. *Water Alternatives*, 8(1).
- Almeida-Dias, J.; Figueira, J. R.; Roy, B. (2010). Electre Tri-C: A multiple criteria sorting method based on characteristic reference actions. *European Journal of Operational Research*, 204(3), 565-580. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.10.018>.
- Almeida Dias, J. (2011). *Multiple criteria decision aiding for sorting problems: Concepts, methodologies, and applications* Paris.
- Anderson, R. M.; Clemen, R. (2013). Toward an improved methodology to construct and reconcile decision analytic preference judgments. *Decision analysis*, 10(2), 121-134. <https://doi.org/10.1287/deca.2013.0268>.
- Andrews-Speed, P.; Bleischwitz, R.; Boersma, T.; Johnson, C.; Kemp, G.; VanDeveer, S. D. (2012). The global resource nexus: the struggles for land, energy, food, water, and minerals.
- Angilella, S.; Corrente, S.; Greco, S. (2015). Stochastic multiobjective acceptability analysis for the Choquet integral preference model and the scale construction problem. *European Journal of Operational Research*, 240(1), 172-182. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.06.031>.
- Arthur, W. B. (1989). Competing technologies, increasing returns, and lock-in by historical events. *The economic journal*, 99(394), 116-131. <https://doi.org/10.2307/2234208>.
- Ascough, J.; Maier, H.; Ravalico, J.; Strudley, M. (2008). Future research challenges for incorporation of uncertainty in environmental and ecological decision-making. *Ecological modelling*, 219(3-4), 383-399. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.07.015>.

- Aubert, A. H.; Esculier, F.; Lienert, J. (2020). Recommendations for online elicitation of swing weights from citizens in environmental decision-making. *Operations research perspectives*, 7, 100156. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2020.100156>
- Aubert, A. H.; Lienert, J. (2019). Gamified online survey to elicit citizens' preferences and enhance learning for environmental decisions. *Environmental Modelling & Software*, 111, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.09.013>.
- Aubert, A. H.; Schmid, S.; Lienert, J. (2023). Can online interfaces enhance learning for public decision-making? Eliciting citizens' preferences for multicriteria decision analysis. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.10.031>.
- Bana e Costa, C. A. (2001). The use of multi-criteria decision analysis to support the search for less conflicting policy options in a multi-actor context: case study. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 10(2), 111-125. <https://doi.org/10.1002/mcda.292>.
- Bana e Costa, C. A.; Ensslin, L.; Cornêa, É. C.; Vansnick, J.-C. (1999). Decision support systems in action: integrated application in a multicriteria decision aid process. *European Journal of Operational Research*, 113(2), 315-335. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00219-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00219-7).
- Bana e Costa, C. A.; Lourenço, J. C.; Oliveira, M. D.; Bana e Costa, J. C. (2014). A socio-technical approach for group decision support in public strategic planning: the Pernambuco PPA case. *Group Decision and Negotiation*, 23(1), 5-29. <https://doi.org/10.1007/s10726-012-9326-2>.
- Bana e Costa, C. A.; Pirlot, M. (1997). Thoughts on the future of the multicriteria field: Basic convictions and outline for a general methodology. *Multicriteria Analysis: Proceedings of the XIth International Conference on MCDM*, 1-6 August 1994, Coimbra, Portugal, https://doi.org/10.1007/978-3-642-60667-0_53.
- Bana e Costa, C. A.; Stewart, T. J.; Vansnick, J.-C. (1997). Multicriteria decision analysis: Some thoughts based on the tutorial and discussion sessions of the ESIGMA meetings. *European Journal of Operational Research*, 99(1), 28-37. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00380-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00380-3).
- Banville, C.; Landry, M.; Martel, J. M.; Boulaire, C. (1998). A stakeholder approach to MCDA. *Systems Research and Behavioral Science: The Official Journal of the International Federation for Systems Research*, 15(1), 15-32. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1743\(199801/02\)15:1<15::AID-SRES179>3.0.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1743(199801/02)15:1<15::AID-SRES179>3.0.CO;2-B).
- Barbier, E. B. (1987). The concept of sustainable economic development. *Environmental conservation*, 14(2), 101-110. <https://doi.org/10.1017/S0376892900011449>.
- Bauer, D.; Philbrick, M.; Vallario, B.; Battey, H.; Clement, Z.; Fields, F. (2014). The water-energy nexus: Challenges and opportunities. *US Department of Energy*.
- Baur, A.; Fritsch, P.; Hoch, W.; Merkl, G.; Rautenberg, J.; Weiß, M.; Wricke, B. (2019). *Mutschmann/Stimmelmayer Taschenbuch der Wasserversorgung*. 17. Auflage. Springer-Verlag, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-23222-1>.
- Behzadian, M.; Kazemzadeh, R. B.; Albadvi, A.; Aghdasi, M. (2010). PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 200(1), 198-215. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.021>.
- Bell, M. L.; Hobbs, B. F.; Elliott, E. M.; Ellis, H.; Robinson, Z. (2001). An evaluation of multi-criteria methods in integrated assessment of climate policy. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 10(5), 229-256. <https://doi.org/10.1002/mcda.305>.
- Belton, V.; Ackermann, F.; Shepherd, I. (1997). Integrated support from problem structuring through to alternative evaluation using COPE and VISA. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 6(3), 115-130. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1360\(199705\)6:3<115::AID-MCDA140>3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1360(199705)6:3<115::AID-MCDA140>3.0.CO;2-I).
- Belton, V.; Stewart, T. (2002). *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1495-4>.
- Belton, V.; Stewart, T. (2010). Problem structuring and multiple criteria decision analysis. *Trends in multiple criteria decision analysis*, 209-239. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5904-1_8.
- Benson, D.; Gain, A. K.; Rouillard, J. J. (2015). Water governance in a comparative perspective: from IWRM to a 'nexus' approach? *Water Alternatives*, 8(1), 756-773.

- Berkhout, F. (2002). Technological regimes, path dependency and the environment. *Global Environmental Change*, 12(1), 1-4. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(01\)00025-5](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(01)00025-5).
- Bertsch, V. (2008). *Uncertainty handling in multi-attribute decision support for industrial risk management*.
- Bertsch, V.; Fichtner, W. (2016). A participatory multi-criteria approach for power generation and transmission planning. *Annals of Operations Research*, 245, 177-207. <https://doi.org/10.1007/s10479-015-1791-y>.
- Beutler, P.; Lienert, J. (2020). Zukünftige Abwasserentsorgung im ländlichen Raum. Technischer Bericht zur Entscheidungsunterstützung für die Gemeinde. *Dübendorf, Switzerland*. https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag%3A19287/datastream/PDF/download/Beutler-2019-Zuk%C3%BCnftige_Abwasserentsorgung_im_l%C3%A4ndlichen_Raum-%28published_version%29.pdf
- BFE. (2004). SVGW: Energie in der Wasserversorgung. *Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches*.
- Biggs, E. M.; Bruce, E.; Boruff, B.; Duncan, J. M.; Horsley, J.; Pauli, N.; McNeill, K.; Neef, A.; Van Ogtrop, F.; Curnow, J. (2015). Sustainable development and the water–energy–food nexus: A perspective on livelihoods. *Environmental Science & Policy*, 54, 389-397. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.002>.
- Bijl, D. L.; Bogaart, P. W.; Kram, T.; de Vries, B. J.; van Vuuren, D. P. (2016). Long-term water demand for electricity, industry and households. *Environmental Science & Policy*, 55, 75-86. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.09.005>.
- Bizikova, L.; Krmar, E. (2015). Integrated scenario planning and multi-criteria decision analysis framework with application to forest planning. *Open Journal of Forestry*, 5(02), 139. <https://doi.org/10.4236/ojf.2015.52014>.
- Bizikova, L.; Roy, D.; Swanson, D.; Venema, H. D.; McCandless, M. (2013). *The water-energy-food security nexus: Towards a practical planning and decision-support framework for landscape investment and risk management*. International Institute for Sustainable Development Winnipeg.
- BMBF (2023). *Innovationsatlas Wasser: Tool zur Investitions- und Kostenschätzung für die Wasserinfrastruktur*. Bundesministerium für Bildung und Forschung. Abrufbar unter: <https://www.innovationsatlas-wasser.de/de/produkte/tool-zur-investitions-und-kostenschaetzung-fuer-die-wasserinfrastruktur> (letzter Zugriff: 13.11.2023).
- BMZ (2023a). *Die globalen Ziele für nachhaltige Entwicklung*. Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung. Abrufbar unter: <https://www.bmz.de/de/agenda-2030/> (letzter Zugriff: 15.01.2023).
- BMZ (2023b). *Globale Partnerschaft*. Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung. Abrufbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/nachhaltigkeitspolitik/globale-partnerschaften-1140096> (letzter Zugriff: 15.02.2023).
- BMZ (2023c). *Integriertes Wasserressourcenmanagement und Nexus-Ansatz*. Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung. Abrufbar unter: <https://www.bmz.de/de/themen/wasser/wasserpolitik/integriertes-wasserressourcenmanagement-und-nexus-ansatz-20636> (letzter Zugriff: 26.01.2023).
- BMZ (2023d). *SDG 6: Sauberes Wasser und Sanitär-einrichtungen - Unterziele*. Global Policy Forum, Bonn. Abrufbar unter: <https://www.bmz.de/resource/blob/84214/01b-sdg-06-unterziele.pdf> (letzter Zugriff: 15.01.2023).
- BMZ (2023e). *SDG 7: Bezahlbare und saubere Energie - Unterziele*. Global Policy Forum, Bonn. Abrufbar unter: <https://www.bmz.de/resource/blob/83902/01b-sdg-07-unterziele.pdf> (letzter Zugriff: 15.01.2023).
- BMZ (2023f). *SDG 13: Maßnahmen zum Klimaschutz - Unterziele*. Global Policy Forum, Bonn. Abrufbar unter: <https://www.bmz.de/resource/blob/86222/01b-sdg-13-unterziele.pdf> (letzter Zugriff: 15.01.2023).
- Bonner, B. L.; Baumann, M. R.; Dalal, R. S. (2002). The effects of member expertise on group decision-making and performance. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 88(2), 719-736. [https://doi.org/10.1016/S0749-5978\(02\)00010-9](https://doi.org/10.1016/S0749-5978(02)00010-9).

- Borcherding, K.; von Winterfeldt, D. (1988). The effect of varying value trees on multiattribute evaluations. *Acta Psychologica*, 68(1-3), 153-170. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(88\)90052-2](https://doi.org/10.1016/0001-6918(88)90052-2).
- Boretti, A.; Rosa, L. (2019). Reassessing the projections of the world water development report. *NPJ Clean Water*, 2(1), 1-6. <https://doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9>.
- Bormann, H.; Gramlich, E.; Müller, F.; Schröder, M.; Vodegel, S.; Sievers, M. (2019). *Keine Energie ohne Wasser: Zukunftsszenarien und Empfehlungen für die Weiterentwicklung der Wasserwirtschaft unter gravierend veränderten energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen: Abschlussbericht*. Clausthaler Umwelttechnik, Forschungszentrum der Technischen Universität Clausthal. Abrufbar unter: https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-32804_01-Hauptbericht.pdf (letzter Zugriff: 05.10.2023).
- Bouyssou, D. (1989). Modelling inaccurate determination, uncertainty, imprecision using multiple criteria. Improving Decision Making in Organisations: Proceedings of the Eighth International Conference on Multiple Criteria Decision Making, https://doi.org/10.1007/978-3-642-49298-3_8.
- Bouyssou, D. (1990). Building criteria: a prerequisite for MCDA. In: *Readings in multiple criteria decision aid* (pp. 58-80). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-75935-2_4.
- Bouyssou, D. (2000). *Evaluation and decision models: a critical perspective*. Vol. 32. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1593-7>.
- Bouyssou, D.; Marchant, T.; Pirlot, M.; Tsoukias, A.; Vincke, P. (2006). *Evaluation and decision models with multiple criteria: Stepping stones for the analyst*. Vol. 86. Springer Science & Business Media.
- Bouyssou, D.; Pirlot, M. (2016). Conjoint measurement tools for MCDM: A brief introduction. *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*, 97-151. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_4.
- Brans, J.-P.; De Smet, Y. (2016). PROMETHEE methods. *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*, 187-219. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_6.
- Brans, J.-P.; Kunsch, P. L.; Mareschal, B. (2002). Management of the Future: A System dynamics and MCDA approach. *Aiding Decisions with Multiple Criteria: Essays in Honor of Bernard Roy*, 483-502. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0843-4_21.
- Brans, J.-P.; Mareschal, B. (1995). The PROMETHEE VI procedure: how to differentiate hard from soft multicriteria problems. *Journal of Decision Systems*, 4(3), 213-223. <https://doi.org/10.1080/12460125.1995.10511652>.
- Brans, J.-P.; Vincke, P.; Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research*, 24(2), 228-238. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(86\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(86)90044-5).
- Brans, J. P.; Macharis, C.; Kunsch, P. L.; Chevalier, A.; Schwaninger, M. (1998). Combining multicriteria decision aid and system dynamics for the control of socio-economic processes. An iterative real-time procedure. *European Journal of Operational Research*, 109(2), 428-441. [https://doi.org/10.1016/s0377-2217\(98\)00068-x](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(98)00068-x).
- Brans, J. P.; Mareschal, B. (1990). The PROMETHEE methods for MCDM; the PROMCALC, GAIA and BANKADVISER software. In: *Readings in multiple criteria decision aid* (pp. 216-252). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-75935-2_10.
- Brans, J. P.; Mareschal, B. (1992). PROMETHEE V: MCDM problems with segmentation constraints. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 30(2), 85-96. <https://doi.org/10.1080/03155986.1992.11732186>.
- Brown, G. O. (2003). The history of the Darcy-Weisbach equation for pipe flow resistance. *Environmental and water resources history*, 34-43. [https://doi.org/10.1061/40650\(2003\)4](https://doi.org/10.1061/40650(2003)4)
- Brown, K.; Adger, W. N.; Tompkins, E.; Bacon, P.; Shim, D.; Young, K. (2001). Trade-off analysis for marine protected area management. *Ecological economics*, 37(3), 417-434. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(00\)00293-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(00)00293-7).
- Brugha, R.; Varvasovszky, Z. (2000). Stakeholder analysis: a review. *Health policy and planning*, 15(3), 239-246. <https://doi.org/10.1093/heapol/15.3.239>.
- Bryson, J. M.; Ackermann, F.; Eden, C.; Finn, C. B. (2004). *Visible thinking: Unlocking causal mapping for practical business results*. John Wiley & Sons Inc.

- Buchanan, J. T.; Henig, E. J.; Henig, M. I. (1998). Objectivity and subjectivity in the decision making process. *Annals of Operations Research*, 80(0), 333-345. <https://doi.org/10.1023/A:1018980318183>.
- Burek, P.; Satoh, Y.; Fischer, G.; Kahil, M. T.; Scherzer, A.; Tramberend, S.; Nava, L.; Wada, Y.; Eisner, S.; Flörke, M. (2016). Water futures and solution-fast track initiative.
- Burgman, M. (2005). *Risks and decisions for conservation and environmental management*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511614279>.
- Cairns, R.; Krzywoszynska, A. (2016). Anatomy of a buzzword: The emergence of 'the water-energy-food nexus' in UK natural resource debates. *Environmental Science & Policy*, 64, 164-170. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.07.007>.
- Caissie, D. (2006). The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater biology*, 51(8), 1389-1406. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x>.
- Campos, A. C. S. M.; Mareschal, B.; de Almeida, A. T. (2015). Fuzzy FlowSort: An integration of the FlowSort method and Fuzzy Set Theory for decision making on the basis of inaccurate quantitative data. *Information sciences*, 293, 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.09.024>.
- Cegan, J. C.; Fillion, A. M.; Keisler, J. M.; Linkov, I. (2017). Trends and applications of multi-criteria decision analysis in environmental sciences: literature review. *Environment Systems and Decisions*, 37, 123-133. <https://doi.org/10.1007/s10669-017-9642-9>.
- Charnes, A.; Cooper, W. W.; Ferguson, R. O. (1955). Optimal estimation of executive compensation by linear programming. *Management science*, 1(2), 138-151. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1.2.138>.
- Choo, E. U.; Schoner, B.; Wedley, W. C. (1999). Interpretation of criteria weights in multicriteria decision making. *Computers & Industrial Engineering*, 37(3), 527-541. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(00\)00019-X](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(00)00019-X).
- Choudhury, A.; Shankar, R.; Tiwari, M. (2006). Consensus-based intelligent group decision-making model for the selection of advanced technology. *Decision support systems*, 42(3), 1776-1799. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2005.05.001>.
- Cinelli, M. (2017). The art of supporting decision-making. *Exchanges: The Interdisciplinary Research Journal*, 4(2), 298-308. <https://doi.org/10.31273/eirj.v4i2.166>.
- Cinelli, M.; Coles, S. R.; Kirwan, K. (2014). Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. *Ecological Indicators*, 46, 138-148. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.06.011>.
- Cinelli, M.; Kadziński, M.; Gonzalez, M.; Słowiński, R. (2020). How to support the application of multiple criteria decision analysis? Let us start with a comprehensive taxonomy. *Omega*, 96, 102261. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2020.102261>.
- Cinelli, M.; Kadziński, M.; Miebs, G.; Gonzalez, M.; Słowiński, R. (2022). Recommending multiple criteria decision analysis methods with a new taxonomy-based decision support system. *European Journal of Operational Research*, 302(2), 633-651. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.01.011>.
- Clark, C. W. (1990). Mathematical bioeconomics. *Mathematical Problems in Biology: Victoria Conference*, https://doi.org/10.1007/978-3-642-45455-4_3.
- Clean Energy Ministerial (2010). *Summary Fact Sheet*. Abrufbar unter: <https://www.cleanenergyministerial.org/sites/default/files/2018-07/CEM1%20Summary%20Fact%20Sheet> (letzter Zugriff: 07.02.2023).
- Clean Energy Ministerial (2023). *Energy-Water-Food-Nexus*. Abrufbar unter: <https://www.cleanenergyministerial.org/resources-cesc/energy-water-food-nexus/> (letzter Zugriff: 07.02.2023).
- Clemen, R. T.; Reilly, T. (2013). *Making Hard Decisions with DecisionTools*. 3. Auflage. Cengage Learning, Mason, OH, USA.
- Coch, L.; French, John RP. (1948). Overcoming resistance to change. *Human relations*, 1(4), 512-532. <https://doi.org/10.1177/001872674800100408>.
- Corrente, S.; Figueira, J. R.; Greco, S. (2014). The SMAA-PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research*, 239(2), 514-522. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.05.026>.

- Corrente, S.; Greco, S.; Leonardi, F.; Słowiński, R. (2021). The hierarchical SMAA-PROMETHEE method applied to assess the sustainability of European cities. *Applied Intelligence*, 51(9), 6430-6448. <https://doi.org/10.1007/s10489-021-02384-5>.
- Corrente, S.; Greco, S.; Słowiński, R. (2016). Multiple criteria hierarchy process for ELECTRE Tri methods. *European Journal of Operational Research*, 252(1), 191-203. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.053>.
- Crouch, M. L.; Jacobs, H. E.; Speight, V. L. (2021). Defining domestic water consumption based on personal water use activities. *AQUA – Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 70(7), 1002-1011. <https://doi.org/10.2166/aqua.2021.056>.
- Cuozzo, V. (2014). Integrated assessment for a sustainable valorization project. *Italian Journal of Regional Science*, 13(1). <https://doi.org/10.3280/SCRE2014-S01004>.
- Daher, B. T.; Mohtar, R. H. (2015). Water-energy-food (WEF) Nexus Tool 2.0: guiding integrative resource planning and decision-making. *Water international*, 40(5-6), 748-771. <https://doi.org/10.1080/02508060.2015.1074148>.
- Daher, B. T.; Mohtar, R. H. (2018). Water-energy-food (WEF) Nexus Tool 2.0: guiding integrative resource planning and decision-making. In: *Sustainability in the Water Energy Food Nexus* (pp. 36-59). Routledge. <https://doi.org/10.1080/02508060.2015.1074148>.
- Danielson, M.; Ekenberg, L. (2016). The CAR method for using preference strength in multi-criteria decision making. *Group Decision and Negotiation*, 25, 775-797.
- Danielson, M.; Ekenberg, L.; Johansson, J.; Larsson, A. (2003). The DecideIT Decision Tool. ISIPTA, Dantzig, G. (1963). *Linear programming and extensions*. Princeton university press. <https://doi.org/10.1515/9781400884179>.
- Dawes, R. M.; Corrigan, B. (1974). Linear models in decision making. *Psychological bulletin*, 81(2), 95. <https://doi.org/10.1037/h0037613>.
- de Almeida, A. T.; de Almeida, J. A.; Costa, A. P. C. S.; de Almeida-Filho, A. T. (2016). A new method for elicitation of criteria weights in additive models: Flexible and interactive tradeoff. *European Journal of Operational Research*, 250(1), 179-191. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.058>.
- De Bourgoing, P.; Nussbaum, P.; Rusteberg, B.; Sauter, M. (2022a). *The SALAM Initiative: Transboundary Strategies for the Resolution of the Water Deficit Problem in the Middle East, Key products-Policy briefs*. https://salam2.uni-goettingen.de/wp-content/uploads/2022/08/SALAM_Brochure.pdf
- De Bourgoing, P.; Souza da Silva, G.; Zintel, L.; Rusteberg, B. (2022b). SALAM Information and Expert System. In: P. de Bourgoing, P. Nussbaum, B. Rusteberg, & M. Sauter (Hrsg.), *The SALAM Initiative: Transboundary Strategies for the Resolution of the Water Deficit Problem in the Middle East, Key products-Policy briefs*.
- De Laurentiis, V.; Hunt, D. V.; Rogers, C. D. (2016). Overcoming food security challenges within an energy/water/food nexus (EWFN) approach. *Sustainability*, 8(1), 95. <https://doi.org/10.3390/su8010095>.
- De, P.; Majumder, M. (2020). Allocation of energy in surface water treatment plants for maximum energy conservation. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 3347-3370. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00349-w>.
- Destatis (2023). *Online Plattform: Indikatoren der UN-Nachhaltigkeitsziele*. Statistisches Bundesamt. Abrufbar unter: https://sdg-indikatoren.de/about_platform/ (letzter Zugriff: 17.01.2023).
- Diakoulaki, D.; Antunes, C. H.; Gomes Martins, A. (2005). MCDA and energy planning. *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*, 859-890. https://doi.org/10.1007/0-387-23081-5_21.
- Dias, L. C.; Freire, F.; Geldermann, J. (2019). Perspectives on multi-criteria decision analysis and life-cycle assessment. *New Perspectives in Multiple Criteria Decision Making: Innovative Applications and Case Studies*, 315-329. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11482-4_12.
- Dias, L. C.; Henggeler Antunes, C.; Rios Insua, D. (2012). Dealing with uncertainty in decision support systems: recent trends (2000–2011). *Intelligent Decision Technologies*, 6(4), 245-264. <https://doi.org/10.3233/IDT-2012-0141>.

- Doan, N. A. V.; De Smet, Y. (2018). An alternative weight sensitivity analysis for PROMETHEE II rankings. *Omega*, 80, 166-174. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.08.017>.
- Dodgson, J. S.; Spackman, M.; Pearman, A.; Phillips, L. D. (2009). Multi-criteria analysis: a manual.
- Droogers, P.; Immerzeel, W.; Terink, W.; Hoogeveen, J.; Bierkens, M.; Van Beek, L.; Debele, B. (2012). Water resources trends in Middle East and North Africa towards 2050. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3101-3114. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3101-2012>.
- Durbach, I.; Stewart, T. J. (2003). Integrating scenario planning and goal programming. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 12(4-5), 261-271. <https://doi.org/10.1002/mcda.362>.
- DVGW. (2010). Handbuch Energieeffizienz: Energieeinsparung in der Wasserversorgung.
- Dyer, J. S. (2016). Multiattribute Utility Theory (MAUT). In: (pp. 285-314). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4>.
- Eden, C. (1987). Problem solving or problem finishing. In: *New directions in management science* (pp. 97-107).
- Eden, C. (1992). On the nature of cognitive maps. *Journal of management studies*, 29(3), 261-265. <https://doi.org/10.1111/j.1467-6486.1992.tb00664.x>.
- Eden, C.; Ackermann, F. (1998). *Making strategy: The journey of strategic management*. Sage. <https://doi.org/10.4135/9781446217153>.
- Eden, C.; Ackermann, F. (2001). SODA—the principles. *Rational analysis for a problematic world revisited*, 21-41.
- Eden, C.; Ackermann, F. (2004). Use of 'Soft OR' models by clients: what do they want from them. *Systems modelling: theory and practice*. Wiley, Chichester, 146-163.
- Eden, C.; Ackermann, F. (2006). Where next for problem structuring methods. *Journal of the Operational Research Society*, 57(7), 766-768. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602090>.
- Eden, C.; Ackermann, F. (2021). Modelling stakeholder dynamics for supporting group decision and negotiation: theory to practice. *Group Decision and Negotiation*, 30(5), 1001-1025. <https://doi.org/10.1007/s10726-021-09745-y>.
- Edwards, W. (1977). How to use multiattribute utility measurement for social decisionmaking. *IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics*, 7(5), 326-340. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1977.4309720>.
- Edwards, W.; Barron, F. H. (1994). SMARTS and SMARTER: Improved simple methods for multiattribute utility measurement. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 60(3), 306-325. <https://doi.org/10.1006/obhd.1994.1087>.
- Ehrgott, M.; Gandibleux, X. (2006). Multiple criteria optimization: state of the art annotated bibliographic surveys. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2004.08.004>.
- Ehrgott, M.; Ruzika, S. (2008). Improved ϵ -constraint method for multiobjective programming. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 138(3), 375-396. <https://doi.org/10.1007/s10957-008-9394-2>.
- EIA (2023). *Jordan - Energy sector analysis*. <https://www.eia.gov/international/overview/country/JOR>
- Eigner-Thiel, S.; Schmehl, M.; Ibendorf, J.; Geldermann, J. (2013). Assessment of different bioenergy concepts in terms of sustainable development. In: H. Ruppert, M. Kappas, & J. Ibendorf (Hrsg.), *Sustainable Bioenergy Production-An Integrated Approach* (pp. 339-384). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6642-6_12.
- Eisenführ, F.; Weber, M.; Langer, T. (2010). *Rationales Entscheiden*. 5. Auflage. Springer, Heidelberg.
- Eke, J.; Yusuf, A.; Giwa, A.; Sodiq, A. (2020). The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity. *Desalination*, 495, 114633. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114633>.
- Elsawah, S.; Bakhanova, E.; Hämäläinen, R. P.; Voinov, A. (2023). A Competency Framework for Participatory Modeling. *Group Decision and Negotiation*, 32(3), 569-601. <https://doi.org/10.1007/s10726-023-09818-0>.
- Endo, A.; Burnett, K.; Orencio, P. M.; Kumazawa, T.; Wada, C. A.; Ishii, A.; Tsurita, I.; Taniguchi, M. (2015). Methods of the water-energy-food nexus. *Water*, 7(10), 5806-5830. <https://doi.org/10.3390/w7105806>.

- Endo, A.; Tsurita, I.; Burnett, K.; Orencio, P. M. (2017). A review of the current state of research on the water, energy, and food nexus. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 11, 20-30. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.010>.
- Engin, A.; Vetschera, R. (2017). Information representation in decision making: The impact of cognitive style and depletion effects. *Decision support systems*, 103, 94-103. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2017.09.007>.
- Ensslin, L.; Dutra, A.; Ensslin, S. R. (2000). MCDA: a constructivist approach to the management of human resources at a governmental agency. *International Transactions in Operational Research*, 7(1), 79-100. <https://doi.org/10.1111/j.1475-3995.2000.tb00186.x>.
- European Report on Development. (2012). *Confronting scarcity: Managing water, energy and land for inclusive and sustainable growth*. European Commission, Overseas Development Institute (ODI), European Centre for Development Policy Management (ECDPM), German Development Institute (GDI/DIE), Brussels, Belgium.
- FAO (2023). *Diagnostic Tools for Investment (DTI) in water for agriculture and energy*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Abruflbar unter: <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/diagnostic-tools-for-investment/en/> (letzter Zugriff: 01.09.2023).
- Ferretti, V.; Montibeller, G.; von Winterfeldt, D. (2023). Testing the effectiveness of debiasing techniques to reduce overprecision in the elicitation of subjective continuous probability distributions. *European Journal of Operational Research*, 304(2), 661-675. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.04.008>.
- Ferretti, V.; Pluchinotta, I.; Tsoukiàs, A. (2019). Studying the generation of alternatives in public policy making processes. *European Journal of Operational Research*, 273(1), 353-363. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.07.054>.
- Figueira, J.; Roy, B. (2002). Determining the weights of criteria in the ELECTRE type methods with a revised Simos' procedure. *European Journal of Operational Research*, 139(2), 317-326. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00370-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00370-8).
- Figueira, J. R.; Greco, S.; Roy, B.; Słowiński, R. (2010). ELECTRE methods: Main features and recent developments. *Handbook of multicriteria analysis*, 51-89. https://doi.org/10.1007/978-3-540-92828-7_3.
- Figueira, J. R.; Mousseau, V.; Roy, B. (2016). ELECTRE methods. *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*, 155-185. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_5.
- Fishburn, P. C. (1979). *Utility theory for decision making*. Krieger NY.
- Fisher, R.; Ury, W. L.; Patton, B. (2011). *Getting to yes: Negotiating agreement without giving in*. Penguin.
- Foran, T. (2015). Node and regime: Interdisciplinary analysis of water-energy-food nexus in the Mekong region. *Water Alternatives*, 8(1).
- Francis, A. (2015). *Jordan's refugee crisis*. Vol. 21. JSTOR. <http://www.jstor.com/stable/resrep12890>
- Franco, L. A. (2013). Rethinking Soft OR interventions: Models as boundary objects. *European Journal of Operational Research*, 231(3), 720-733. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.06.033>.
- Franco, L. A.; Rouwette, E. A. (2022). Problem structuring methods: Taking stock and looking ahead. In: *The Palgrave Handbook of Operations Research* (pp. 735-780). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96935-6_23.
- French, S. (1995). Uncertainty and imprecision: Modelling and analysis. *Journal of the Operational Research Society*, 46(1), 70-79. <https://doi.org/10.1057/jors.1995.8>.
- French, S. (2000). Decision support, data assimilation and uncertainty handling within RODOS. *RODOS: Decision Support System for Off-Site Nuclear Emergency Management in Europe*. Luxembourg: EUR, 19144.
- French, S.; Geldermann, J. (2005). The varied contexts of environmental decision problems and their implications for decision support. *Environmental Science & Policy*, 8(4), 378-391. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2005.04.008>.
- French, S.; Maule, J.; Papamichail, N. (2009). *Decision behaviour, analysis and support*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511609947>.

- Friend, J. (2010). The strategic choice approach. *Wiley encyclopedia of operations research and management science*. <https://doi.org/10.1002/9780470400531.eorms0971>.
- Frischknecht, R. (2020). *Lehrbuch der Ökobilanzierung*. Springer Spektrum, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54763-2>.
- Funtowicz, S. O.; Ravetz, J. R. (1990). *Uncertainty and quality in science for policy*. Vol. 15. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-0621-1>.
- Gain, A. K.; Rouillard, J. J.; Benson, D. (2013). Can integrated water resources management increase adaptive capacity to climate change adaptation? A critical review. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2013.54A003>.
- Gallagher, L.; Dalton, J.; Bréthaut, C.; Allan, T.; Bellfield, H.; Crilly, D.; Cross, K.; Gyawali, D.; Klein, D.; Laine, S. (2016). The critical role of risk in setting directions for water, food and energy policy and research. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 23, 12-16. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2016.10.002>.
- Garcia, D. J.; You, F. (2016). The water-energy-food nexus and process systems engineering: A new focus. *Computers & Chemical Engineering*, 91, 49-67. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.03.003>.
- Gari, S. R.; Newton, A.; Icely, J. D. (2015). A review of the application and evolution of the DPSIR framework with an emphasis on coastal social-ecological systems. *Ocean & Coastal Management*, 103, 63-77. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.11.013>.
- Gausemeier, J.; Fink, A.; Schlake, O. (1998). Scenario management: An approach to develop future potentials. *Technological Forecasting and Social Change*, 59(2), 111-130. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(97\)00166-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(97)00166-2).
- Geldermann, J.; Rentz, O. (2004). The reference installation approach for the techno-economic assessment of emission abatement options and the determination of BAT according to the IPPC-directive. *Journal of Cleaner Production*, 12(4), 389-402. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(03\)00032-5](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(03)00032-5).
- Geldermann, J.; Schöbel, A. (2011). On the similarities of some multi-criteria decision analysis methods. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 18(3-4), 219-230. <https://doi.org/10.1002/mcda.468>.
- Geldermann, J.; Spengler, T.; Rentz, O. (2000). Fuzzy outranking for environmental assessment. Case study: iron and steel making industry. *Fuzzy sets and systems*, 115(1), 45-65. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(99\)00021-4](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(99)00021-4).
- Geldermann, J.; Treitz, M.; Bertsch, V.; Rentz, O. (2005). Moderated decision support and countermeasure planning for off-site emergency management. In: *Energy and Environment* (pp. 63-80). Springer. https://doi.org/10.1007/0-387-25352-1_3.
- Geldermann, J.; Zhang, K.; Rentz, O. (2003). Sensitivitätsanalysen für das Outranking-Verfahren PROMETHEE. *Multi-Criteria-und Fuzzy-Systeme in Theorie und Praxis: Lösungsansätze für Entscheidungsprobleme mit komplexen Zielsystemen*, 127-151. https://doi.org/10.1007/978-3-322-81539-2_7.
- Ghodsvali, M.; Dane, G.; de Vries, B. (2023). An integrated decision support system for the urban food-water-energy nexus: methodology, modification, and model formulation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 100, 101940. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2023.101940>.
- Ghodsvali, M.; Krishnamurthy, S.; de Vries, B. (2019). Review of transdisciplinary approaches to food-water-energy nexus: A guide towards sustainable development. *Environmental Science & Policy*, 101, 266-278. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.09.003>.
- Giampietro, M.; Bukkens, S. G. (2015). Analogy between Sudoku and the multi-scale integrated analysis of societal metabolism. *Ecological Informatics*, 26, 18-28. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2014.07.007>.
- Giampietro, M.; Mayumi, K.; Ramos-Martin, J. (2009). Multi-scale integrated analysis of societal and ecosystem metabolism (MuSIASEM): Theoretical concepts and basic rationale. *Energy*, 34(3), 313-322. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.07.020>.

- Giampietro, M.; Mayumi, K.; Şorman, A. (2013). *Energy analysis for a sustainable future: multi-scale integrated analysis of societal and ecosystem metabolism*. Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9780203107997>.
- Giesecke, J.; Heimerl, S.; Mosonyi, E. (2014). *Wasserkraftanlagen: Planung, Bau und Betrieb*. 6. Auflage. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Gleick, P. H. (1996). Basic water requirements for human activities: Meeting basic needs. *Water international*, 21(2), 83-92. <https://doi.org/10.1080/02508069608686494>.
- Gomes Júnior, A. d. A.; Schramm, V. B. (2022). Problem structuring methods: a review of advances over the last decade. *Systemic Practice and Action Research*, 35(1), 55-88.
<https://doi.org/10.1007/s11213-021-09560-1>.
- Goodwin, P.; Wright, G. (2014). *Decision analysis for management judgment*. John Wiley & Sons.
- Govindan, K.; Kadziński, M.; Ehling, R.; Miebs, G. (2019). Selection of a sustainable third-party reverse logistics provider based on the robustness analysis of an outranking graph kernel conducted with ELECTRE I and SMAA. *Omega*, 85, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.05.007>.
- Grabisch, M.; Labreuche, C. (2016). Fuzzy measures and integrals in MCDA. *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*, 553-603. https://doi.org/10.1007/0-387-23081-5_14.
- Greco, S.; Figueira, J.; Ehrgott, M. (2016). *Multiple criteria decision analysis*. Vol. 37. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4>.
- Greco, S.; Ishizaka, A.; Tasiou, M.; Torrisi, G. (2019). On the methodological framework of composite indices: A review of the issues of weighting, aggregation, and robustness. *Social indicators research*, 141, 61-94. <https://doi.org/10.1007/s11205-017-1832-9>.
- Greening, L. A.; Bernow, S. (2004). Design of coordinated energy and environmental policies: use of multi-criteria decision-making. *Energy Policy*, 32(6), 721-735.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.08.017>.
- Gregory, R.; Failing, L.; Harstone, M.; Long, G.; McDaniels, T.; Ohlson, D. (2012a). *Structured decision making: a practical guide to environmental management choices*. John Wiley & Sons.
<https://doi.org/10.1002/9781444398557>.
- Gregory, R.; Long, G.; Colligan, M.; Geiger, J. G.; Laser, M. (2012b). When experts disagree (and better science won't help much): using structured deliberations to support endangered species recovery planning. *Journal of Environmental Management*, 105, 30-43.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.03.001>.
- Gregory, R.; McDaniels, T.; Fields, D. (2001). Decision aiding, not dispute resolution: creating insights through structured environmental decisions. *Journal of Policy Analysis and Management: The Journal of the Association for Public Policy Analysis and Management*, 20(3), 415-432.
<https://doi.org/10.1002/pam.1001>.
- Grigg, N. S. (2019). IWRM and the nexus approach: versatile concepts for water resources education. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 166(1), 24-34. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2019.03299.x>.
- Grimble, R.; Wellard, K. (1997). Stakeholder methodologies in natural resource management: a review of principles, contexts, experiences and opportunities. *Agricultural systems*, 55(2), 173-193.
[https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(97\)00006-1](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(97)00006-1).
- Groothuis-Oudshoorn, C. G.; Broekhuizen, H.; van Til, J. (2017). Dealing with uncertainty in the analysis and reporting of MCDA. *Multi-criteria decision analysis to support healthcare decisions*, 67-85. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47540-0_5.
- Grunwald, A.; Kopfmüller, J. (2022). *Nachhaltigkeit*. Vol. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. Campus Verlag, Frankfurt / New York. https://doi.org/10.1007/978-3-658-29210-2_57.
- Gude, V. G.; Nirmalakhandan, N.; Deng, S. (2011). Desalination using solar energy: Towards sustainability. *Energy*, 36(1), 78-85. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.11.008>.
- Guitouni, A.; Martel, J.-M. (1998). Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. *European Journal of Operational Research*, 109(2), 501-521. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00073-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00073-3).
- GWJ (2020). *Global Water Intelligence DesalData - Desalination plants*. <https://www.desaldata.com/>

- Haag, F.; Aubert, A. H.; Lienert, J. (2022). ValueDecisions, a web app to support decisions with conflicting objectives, multiple stakeholders, and uncertainty. *Environmental Modelling & Software*, 150, 105361. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105361>.
- Haag, F.; Lienert, J.; Schuwirth, N.; Reichert, P. (2019a). Identifying non-additive multi-attribute value functions based on uncertain indifference statements. *Omega*, 85, 49-67. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.05.011>.
- Haag, F.; Zürcher, S.; Lienert, J. (2019b). Enhancing the elicitation of diverse decision objectives for public planning. *European Journal of Operational Research*, 279(3), 912-928. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.06.002>.
- Hadavi, S.; Macharis, C.; Van Raemdonck, K. (2018). The multi-actor multi-criteria analysis (mamca) tool: Methodological adaptations and visualizations. *Advanced concepts, methodologies and Technologies for Transportation and Logistics*, https://doi.org/10.1007/978-3-319-57105-8_2.
- Hajkovicz, S.; Collins, K. (2007). A review of multiple criteria analysis for water resource planning and management. *Water Resources Management*, 21, 1553-1566. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9112-5>.
- Haklay, M.; Weber, P. (2008). Openstreetmap: User-generated street maps. *IEEE Pervasive computing*, 7(4), 12-18. <https://doi.org/10.1109/MPRV.2008.80>.
- Hämäläinen, R. P. (2015). Behavioural issues in environmental modelling—The missing perspective. *Environmental Modelling & Software*, 73, 244-253. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.08.019>.
- Hämäläinen, R. P.; Alaja, S. (2008). The threat of weighting biases in environmental decision analysis. *Ecological economics*, 68(1-2), 556-569. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.05.025>.
- Hämäläinen, R. P.; Lahtinen, T. J. (2016). Path dependence in operational research—how the modeling process can influence the results. *Operations research perspectives*, 3, 14-20. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2016.03.001>.
- Hämäläinen, R. P.; Mustajoki, J.; Marttunen, M. (2010). Web-based decision support: creating a culture of applying multi-criteria decision analysis and web-supported participation in environmental decision making. *e-Democracy: A Group Decision and Negotiation Perspective*, 201-221. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9045-4_12.
- Hamiche, A. M.; Stambouli, A. B.; Flazi, S. (2016). A review of the water-energy nexus. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 319-331. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.020>.
- Hammond, J. S.; Keeney, R. L.; Raiffa, H. (1998). Even swaps: A rational method for making trade-offs. *Harvard business review*, 76, 137-150.
- Haralambopoulos, D. A.; Polatidis, H. (2007). Renewable energy systems: A societal and technological platform. *Renewable energy*, 32(2), 329-341. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.02.016>.
- Haraldsson, H. V. (2004). *Introduction to system thinking and causal loop diagrams*. Department of chemical engineering, Lund University Lund, Sweden.
- Hartmann, S.; Martini, C.; Sprenger, J. (2009). Consensual decision-making among epistemic peers. *Episteme*, 6(2), 110-129. <https://doi.org/10.3366/E1742360009000598>.
- Hauff, V.; Brundtland, G. H. (1987). *Unsere gemeinsame Zukunft: Der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung*. Greven, Germany. Abrufbar unter: (letzter
- Hoff, H. (2011). Understanding the Nexus; Background paper for the Bonn 2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus. In: Sweden: Stockholm Environment Institute. <https://policycommons.net/artifacts/1359033/understanding-the-nexus/1972269/>
- Hoff, H.; Alrahaife, S. A.; El Hajj, R.; Lohr, K.; Mengoub, F. E.; Farajalla, N.; Fritzsche, K.; Jobbins, G.; Özerol, G.; Schultz, R. (2019). A nexus approach for the MENA region— from concept to knowledge to action. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 48.
- Hokkanen, J.; Lahdelma, R.; Miettinen, K.; Salminen, P. (1998). Determining the implementation order of a general plan by using a multicriteria method. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 7(5), 273-284. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1360\(199809\)7:5<273::AID-MCDA198>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1360(199809)7:5<273::AID-MCDA198>3.0.CO;2-1).
- Howard, R. A. (1988). Decision analysis: Practice and promise. *Management science*, 34(6), 679-695. <https://doi.org/10.1287/mnsc.34.6.679>.

- Howarth, C.; Monasterolo, I. (2016). Understanding barriers to decision making in the UK energy-food-water nexus: The added value of interdisciplinary approaches. *Environmental Science & Policy*, 61, 53-60. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.03.014>.
- Howells, M.; Hermann, S.; Welsch, M.; Bazilian, M.; Segerström, R.; Alfstad, T.; Gielen, D.; Rogner, H.; Fischer, G.; Van Velthuizen, H. (2013). Integrated analysis of climate change, land-use, energy and water strategies. *Nature Climate Change*, 3(7), 621-626. <https://doi.org/10.1038/nclimate1789>.
- Howlett, M.; Mukherjee, I. (2023). *Routledge handbook of policy design*. Routledge.
- Huang, H. (2023). Stakeholder involvement in decision making: the development of a mass participation tool. *4OR: A Quarterly Journal of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10288-023-00533-9>.
- Huang, H.; De Smet, Y.; Macharis, C.; Doan, N. A. V. (2021a). Collaborative decision-making in sustainable mobility: identifying possible consensuses in the multi-actor multi-criteria analysis based on inverse mixed-integer linear optimization. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 28(1), 64-74. <https://doi.org/10.1080/13504509.2020.1795005>.
- Huang, H.; Mommens, K.; Lebeau, P.; Macharis, C. (2021b). The multi-actor multi-criteria analysis (MAMCA) for mass-participation decision making. International conference on decision support system technology, https://doi.org/10.1007/978-3-030-73976-8_1.
- Huang, I. B.; Keisler, J.; Linkov, I. (2011). Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. *Science of the Total Environment*, 409(19), 3578-3594. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.022>.
- Hussein, H.; Natta, A.; Yehya, A. A. K.; Hamadna, B. (2020). Syrian refugees, water scarcity, and dynamic policies: how do the new refugee discourses impact water governance debates in Lebanon and Jordan? *Water*, 12(2), 325. <https://doi.org/10.3390/w12020325>.
- Hussey, K.; Pittock, J. (2012). The Energy–Water Nexus: Managing the Links between Energy and Water for a Sustainable Future. *Ecology and Society*, 17(1). <https://doi.org/10.5751/es-04641-170131>.
- Hwang, C.-L.; Lin, M.-J. (2012). *Group decision making under multiple criteria: methods and applications*. Vol. 281. Springer Science & Business Media.
- Hwang, C.-L.; Masud, A. S. M. (2012). *Multiple objective decision making—methods and applications: a state-of-the-art survey*. Vol. 164. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-45511-7>.
- IEA (2012). *World Energy Outlook 2012*. International Energy Agency, Paris, France. Abrufbar unter: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2012> (letzter Zugriff: 05.10.2023).
- IEA (2017). *Water-Energy Nexus*. International Energy Agency, Paris, France. Abrufbar unter: <https://www.iea.org/reports/water-energy-nexus> (letzter Zugriff: 05.10.2023).
- IEA (2018). *World Energy Outlook 2018*. International Energy Agency, Paris, France. Abrufbar unter: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018> (letzter Zugriff: 05.10.2023).
- IEA (2022a). *Energy Supply in Israel and Jordan*. <https://www.iea.org/countries>
- IEA (2022b). *World Energy Outlook 2022*. International Energy Agency, Paris, France. Abrufbar unter: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022> (letzter Zugriff: 05.10.2023).
- Ijzerman, M. J.; Van Til, J. A.; Bridges, J. F. (2012). A comparison of analytic hierarchy process and conjoint analysis methods in assessing treatment alternatives for stroke rehabilitation. *The Patient-Patient-Centered Outcomes Research*, 5, 45-56. <https://doi.org/10.2165/11587140-000000000-00000>.
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- IRENA (2015). *Renewable Energy in the Water, Energy & Food Nexus*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Abrufbar unter: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_Water_Energy_Food_Nexus_2015.pdf (letzter Zugriff: 05.10.2023).

- Jacquet-Lagrange, E.; Siskos, J. (1982). Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making, the UTA method. *European Journal of Operational Research*, 10(2), 151-164. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(82\)90155-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(82)90155-2).
- Janowitz, D.; Groche, S.; Yüce, S.; Melin, T.; Wintgens, T. (2022a). Can Large-Scale Offshore Membrane Desalination Cost-Effectively and Ecologically Address Water Scarcity in the Middle East? *Membranes*, 12(3), 323. <https://doi.org/10.3390/membranes12030323>.
- Janowitz, D.; Schmitt, J.; Yüce, S. (2022b). Innovative Konzepte zur großskaligen Meerwasserentsalzung im Nahen Osten. *WasserWirtschaft*(7-8).
- Janowitz, D.; Yüce, S.; Margheri, M.; Yakhoul, H.; Bensabat, J.; Rusteberg, B.; Sauter, M. (2022c). Innovative Water-Energy SWAP Concept between Israel and Jordan. In: P. de Bourgoing, P. Nussbaum, B. Rusteberg, & M. Sauter (Hrsg.), *The SALAM Initiative: Transboundary Strategies for the Resolution of the Water Deficit Problem in the Middle East, Key products-Policy briefs*.
- Jungermann, H.; Pfister, H.-R.; Fischer, K. (2010). *Die psychologie der entscheidung*. Vol. 3. Spektrum, Akad. Verlag. <https://doi.org/978-3-82742386-3>.
- Kabak, Ö.; Ervural, B. (2017). Multiple attribute group decision making: A generic conceptual framework and a classification scheme. *Knowledge-Based Systems*, 123, 13-30. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2017.02.011>.
- Kadziński, M.; Greco, S.; Słowiński, R. (2012). Extreme ranking analysis in robust ordinal regression. *Omega*, 40(4), 488-501. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2011.09.003>.
- Kahneman, D.; Slovic, P.; Tversky, A. (1982). *Judgment under uncertainty: Heuristics and biases*. Cambridge university press.
- Kahraman, C.; Onar, S. C.; Oztaysi, B. (2015). Fuzzy multicriteria decision-making: a literature review. *International journal of computational intelligence systems*, 8(4), 637-666. <https://doi.org/10.1080/18756891.2015.1046325>.
- Karvetski, C. W.; Lambert, J. H.; Keisler, J. M.; Linkov, I. (2010). Integration of decision analysis and scenario planning for coastal engineering and climate change. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 41(1), 63-73. <https://doi.org/10.1109/TSMCA.2010.2055154>.
- Karvetski, C. W.; Lambert, J. H.; Linkov, I. (2011). Scenario and multiple criteria decision analysis for energy and environmental security of military and industrial installations. *Integrated environmental assessment and management*, 7(2), 228-236. <https://doi.org/10.1002/ieam.137>.
- Katsikopoulos, K. V.; Durbach, I. N.; Stewart, T. J. (2018). When should we use simple decision models? A synthesis of various research strands. *Omega*, 81, 17-25.
- Keefer, D. L.; Kirkwood, C. W.; Corner, J. L. (2004). Perspective on decision analysis applications, 1990-2001. *Decision analysis*, 1(1), 4-22. <https://doi.org/10.1287/deca.1030.0004>.
- Keeney, R. L. (1976). A group preference axiomatization with cardinal utility. *Management science*, 23(2), 140-145. <https://doi.org/10.1287/mnsc.23.2.140>.
- Keeney, R. L. (1992). *Value-focused thinking: A path to creative decisionmaking*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Keeney, R. L. (1994). Creativity in decision making with value-focused thinking. *Sloan Management Review*, 35, 33-33.
- Keeney, R. L. (2007). *Developing objectives and attributes*. Citeseer. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511611308.008>.
- Keeney, R. L.; Gregory, R. S. (2005). Selecting attributes to measure the achievement of objectives. *Operations research*, 53(1), 1-11. <https://doi.org/10.1287/opre.1040.0158>.
- Keeney, R. L.; Raiffa, H. (1972). A critique of formal analysis in public decision making. *Analysis of public systems*, 64-74.
- Keeney, R. L.; Raiffa, H. (1993). *Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs*. Cambridge university press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139174084>.
- Keskinen, M.; Belinskij, A.; Sojamo, S.; Honkonen, T.; Munia, H.; Ahopelto, L.; Dubrovin, T.; Marttunen, M.; Koljonen, S.; Heiskanen, A.-S. (2021). Handbook on Water Allocation in Transboundary Context.

- Khurelbaatar, G.; Sanne, M.; Müller, R. A.; Van Afferden, M. (2022). Regional Wastewater Infrastructure Development Strategies for Jordan and Palestine. In: P. de Bourgoing, P. Nussbaum, B. Rusteberg, & M. Sauter (Hrsg.), *The SALAM Initiative: Transboundary Strategies for the Resolution of the Water Deficit Problem in the Middle East, Key products-Policy briefs*.
- Kiker, G. A.; Bridges, T. S.; Varghese, A.; Seager, T. P.; Linkov, I. (2005). Application of multicriteria decision analysis in environmental decision making. *Integrated environmental assessment and management: An international journal*, 1(2), 95-108. https://doi.org/10.1897/IEAM_2004a-015.1.
- Kilgour, D. M.; Chen, Y.; Hipel, K. W. (2010). Multiple criteria approaches to group decision and negotiation. *Trends in multiple criteria decision analysis*, 317-338. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5904-1_11.
- Kirk, E. A.; Reeves, A. D.; Blackstock, K. L. (2007). Path dependency and the implementation of environmental regulation. *Environment and Planning C: Government and Policy*, 25(2), 250-268. <https://doi.org/10.1068/c0512j>.
- Kirkwood, C. W. (1992). An overview of methods for applied decision analysis. *Interfaces*, 22(6), 28-39. <https://doi.org/10.1287/inte.22.6.28>.
- Kirkwood, C. W. (1997). *Strategic decision making*. Wadsworth Publ. Co.
- Klein, M.; Theobald, S. (2022a). Large-Scale Hydropower Plant at Lake Tiberias in the Context of Transboundary Water Transfer. In: P. de Bourgoing, P. Nussbaum, B. Rusteberg, & M. Sauter (Hrsg.), *The SALAM Initiative: Transboundary Strategies for the Resolution of the Water Deficit Problem in the Middle East, Key products-Policy briefs*.
- Klein, M.; Theobald, S. (2022b). Multipurpose Management Tool of Lake Tiberias and the Lower Jordan Valley. In: P. de Bourgoing, P. Nussbaum, B. Rusteberg, & M. Sauter (Hrsg.), *The SALAM Initiative: Transboundary Strategies for the Resolution of the Water Deficit Problem in the Middle East, Key products-Policy briefs*.
- Klein, M.; Theobald, S. (2022c). Wasserkraftnutzung am See Genezareth im Zusammenspiel mit Meerwasserentsalzung und Solarenergie. *WasserWirtschaft*(7-8).
- Köksalan, M.; Wallenius, J.; Zionts, S. (2016). An early history of multiple criteria decision making. *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*, 3-17. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_1.
- Komendantova, N.; Marashdeh, L.; Ekenberg, L.; Danielson, M.; Dettner, F.; Hilpert, S.; Wingenbach, C.; Hassouneh, K.; Al-Salaymeh, A. (2020). Water-Energy Nexus: Addressing Stakeholder Preferences in Jordan. *Sustainability*, 12(15), 6168. <https://doi.org/10.3390/su12156168>.
- Korhonen, P. J.; Malo, P.; Pajala, T.; Ravaja, N.; Somervuori, O.; Wallenius, J. (2018). Context matters: The impact of product type, emotional attachment and information overload on choice quality. *European Journal of Operational Research*, 264(1), 270-279. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.06.060>.
- Kourouma, D.; Waub, J. (2004). L'utilisation de l'analyse multicritère en ÉES du secteur de l'énergie: comparaison d'options énergétiques dans l'étude de cas de la Guinée maritime. Actes du 9ème Colloque international des spécialistes francophones en évaluation d'impacts: De l'évaluation environnementale à l'évaluation du développement durable, Ouagadougou, 20-25 Septembre.
- Kurian, M. (2017). The water-energy-food nexus: trade-offs, thresholds and transdisciplinary approaches to sustainable development. *Environmental Science & Policy*, 68, 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.11.006>.
- Lahdelma, R.; Hokkanen, J.; Salminen, P. (1998). SMAA-stochastic multiobjective acceptability analysis. *European Journal of Operational Research*, 106(1), 137-143. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00163-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00163-X).
- Langer, A.; Rogowski, W. (2009). Deskriptive Entscheidungstheorie. *Theorien und Methoden der Betriebswirtschaft. Handbuch für Wissenschaftler und Studierende*, 1, 177-192. <https://doi.org/10.15358/9783800644377>.
- Larkin, A.; Hoolohan, C.; McLachlan, C. (2020). Embracing context and complexity to address environmental challenges in the water-energy-food nexus. *Futures*, 123, 102612. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2020.102612>.

- Lattemann, S.; Höpner, T. (2008). Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination*, 220(1-3), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.03.009>.
- Laux, H.; Gillenkirch, R. M.; Schenk-Mathes, H. Y. (2005). *Entscheidungstheorie*. Vol. 4. Springer.
- Lee, K.; Jepson, W. (2021). Environmental impact of desalination: A systematic review of Life Cycle Assessment. *Desalination*, 509, 115066. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115066>.
- Lee, M.; Yu, C.-Y.; Chiang, P.-C.; Hou, C.-H. (2018). Water–energy nexus for multi-criteria decision making in water resource management: a case study of Choshui River Basin in Taiwan. *Water*, 10(12), 1740.
- Lemoine, F. G.; Kenyon, S.; Factor, J.; Trimmer, R.; Pavlis, N.; Chinn, D.; Cox, C.; Klosko, S.; Luthcke, S.; Torrence, M. (1998). The NASA GSFC and NIMA joint geopotential model. In.
- Lerche, N. (2016). *Die Integration der Prospect Theory in PROMETHEE am Beispiel der Nachhaltigkeitsbewertung von Konzepten zur energetischen Nutzung von Biomasse*. Cuvillier Verlag.
- Lienert, J.; Duygan, M.; Zheng, J. (2016). Preference stability over time with multiple elicitation methods to support wastewater infrastructure decision-making. *European Journal of Operational Research*, 253(3), 746-760. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.010>.
- Lienert, J.; Scholten, L.; Egger, C.; Maurer, M. (2015). Structured decision-making for sustainable water infrastructure planning and four future scenarios. *EURO Journal on Decision Processes*, 3(1-2), 107-140. <https://doi.org/10.1007/s40070-014-0030-0>.
- Linkov, I.; Moberg, E.; Trump, B. D.; Yatsalo, B.; Keisler, J. M. (2020). *Multi-criteria decision analysis: case studies in engineering and the environment*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429326448>.
- Linkov, I.; Varghese, A.; Jamil, S.; Seager, T. P.; Kiker, G.; Bridges, T. (2004). Multi-criteria decision analysis: a framework for structuring remedial decisions at contaminated sites. In: *Comparative risk assessment and environmental decision making* (pp. 15-54). Springer. <https://doi.org/10.1007/1-4020-2243-3>.
- Luck, M.; Landis, M.; Gassert, F. (2015). *Aqueduct water stress projections: decadal projections of water supply and demand using CMIP5 GCMs*. Abrufbar unter: <https://depts.washington.edu/iconics/research/aqueduct/> (letzter Zugriff: 21.11.2023).
- Lühn, T.; Schmidtman, G.; Geldermann, J. (2018). Identification of sustainable expansion alternatives for heterogeneous grid topologies. *International Journal of Energy Sector Management*, 12(1), 44-66. <https://doi.org/10.1108/ijesm-08-2015-0004>.
- Macharis, C.; Bernardini, A. (2015). Reviewing the use of Multi-Criteria Decision Analysis for the evaluation of transport projects: Time for a multi-actor approach. *Transport policy*, 37, 177-186. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.11.002>.
- Macharis, C.; Brans, J.-P.; Mareschal, B. (1998). The GDSS PROMETHEE procedure. *Journal of Decision Systems*, 7(4), 283-307.
- Macharis, C.; De Witte, A.; Ampe, J. (2009). The multi-actor, multi-criteria analysis methodology (MAMCA) for the evaluation of transport projects: Theory and practice. *Journal of Advanced transportation*, 43(2), 183-202. <https://doi.org/10.1002/atr.5670430206>.
- Macharis, C.; De Witte, A.; Turcksin, L. (2010). The Multi-Actor Multi-Criteria Analysis (MAMCA) application in the Flemish long-term decision making process on mobility and logistics. *Transport policy*, 17(5), 303-311. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.02.004>.
- Macharis, C.; Mareschal, B.; Waub, J. P.; Milan, L. (2015). PROMETHEE–GDSS revisited: applications so far and new developments. *International Journal of Multicriteria Decision Making*, 5(1-2), 129-151. <https://doi.org/10.1504/IJMCDM.2015.067941>.
- Macharis, C.; Turcksin, L.; Lebeau, K. (2012). Multi actor multi criteria analysis (MAMCA) as a tool to support sustainable decisions: State of use. *Decision support systems*, 54(1), 610-620. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.08.008>.
- Madlener, R.; Kowalski, K.; Stagl, S. (2007). New ways for the integrated appraisal of national energy scenarios: The case of renewable energy use in Austria. *Energy Policy*, 35(12), 6060-6074. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.08.015>.
- Mahoney, J. (2000). Path dependence in historical sociology. *Theory and society*, 29(4), 507-548. <https://doi.org/10.1023/A:1007113830879>.

- Marcella, K.; Cherchi, C.; Sun, Y.; de Lamare, G.; Nguyen, H.; Bailey, S. (2020). Development of an Energy Sustainability Plan for the Metropolitan Water District of Southern California. WEFTEC 2020,
- March, H. (2015). The politics, geography, and economics of desalination: A critical review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(3), 231-243. <https://doi.org/10.1002/wat2.1073>.
- Marcomini, A.; Suter II, G. W.; Critto, A. (2008). *Decision support systems for risk-based management of contaminated sites*. Vol. 763. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09722-0>.
- Mareschal, B. (1988). Weight stability intervals in multicriteria decision aid. *European Journal of Operational Research*, 33(1), 54-64. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(88\)90254-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(88)90254-8).
- Mareschal, B.; Brans, J.-P. (1988). Geometrical representations for MCDA. *European Journal of Operational Research*, 34(1), 69-77. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(88\)90456-0](https://doi.org/10.1016/0377-2217(88)90456-0).
- Mareschal, B.; De Smet, Y. (2009). Visual PROMETHEE: Developments of the PROMETHEE & GAIA multicriteria decision aid methods. 2009 IEEE International conference on industrial engineering and engineering management, <https://doi.org/10.1109/IEEM.2009.5373124>.
- Martel, J.-M.; Roy, B. (2005). Analyse de la signifiante de diverses procédures d'agrégation multicritère. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 43(3), 221-245. <https://doi.org/10.1080/03155986.2005.11732726>.
- Martin-Nagle, R.; Howard, E.; Wiltse, A.; Duncan, D. (2012). Bonn 2011 Conference "The Water, Energy and Food Security Nexus" —Solutions for the Green Economy, 16-18 November 2011. Conference Synopsis. *Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU), Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ); OOSKA news Inc.* https://uploads.water-energy-food.org/resources/bonn2011_nexusynopsis.pdf
- Martin, N. J.; Onge, B. S.; Waaub, J.-P. (1999). An integrated decision aid system for the development of Saint Charles River alluvial plain, Quebec, Canada. *International Journal of Environment and Pollution*, 12(2-3), 264-279. <https://doi.org/10.1504/IJEP.1999.002296>.
- Marttunen, M.; Belton, V.; Lienert, J. (2018). Are objectives hierarchy related biases observed in practice? A meta-analysis of environmental and energy applications of Multi-Criteria Decision Analysis. *European Journal of Operational Research*, 265(1), 178-194. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.02.038>.
- Marttunen, M.; Hämäläinen, R. P. (2008). The decision analysis interview approach in the collaborative management of a large regulated water course. *Environmental management*, 42, 1026-1042. <https://doi.org/10.1007/s00267-008-9200-9>.
- Marttunen, M.; Lienert, J.; Belton, V. (2017). Structuring problems for Multi-Criteria Decision Analysis in practice: A literature review of method combinations. *European Journal of Operational Research*, 263(1), 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.041>.
- Marttunen, M.; Mustajoki, J.; Dufva, M.; Karjalainen, T. (2015). How to design and realize participation of stakeholders in MCDA processes? A framework for selecting an appropriate approach. *EURO Journal on Decision Processes*, 3(1-2), 187-214. <https://doi.org/10.1007/s40070-013-0016-3>.
- Mason, R. O.; Mitroff, I. I. (1981). *Challenging strategic planning assumptions: Theory, cases, and techniques*. John Wiley & Sons Inc.
- Mauser, W.; Klepper, G.; Rice, M.; Schmalzbauer, B. S.; Hackmann, H.; Leemans, R.; Moore, H. (2013). Transdisciplinary global change research: the co-creation of knowledge for sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(3-4), 420-431. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.07.001>.
- Mavrotas, G.; Makryvelios, E. (2021). Combining multiple criteria analysis, mathematical programming and Monte Carlo simulation to tackle uncertainty in Research and Development project portfolio selection: A case study from Greece. *European Journal of Operational Research*, 291(2), 794-806. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.09.051>.
- McCalla, A. (1997). The water, food, and trade nexus. Paper delivered at MENA-MED Conference convened by the World Bank in Marrakesh,

- Mezher, T.; Fath, H.; Abbas, Z.; Khaled, A. (2011). Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies. *Desalination*, 266(1-3), 263-273. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.08.035>.
- Michaels, S. (2009). Matching knowledge brokering strategies to environmental policy problems and settings. *Environmental Science & Policy*, 12(7), 994-1011. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.05.002>.
- Middleton, C.; Allouche, J.; Gyawali, D.; Allen, S. (2015). The Rise and Implications of the Water-Energy-Food Nexus in Southeast Asia through an Environmental Justice Lens. *Water Alternatives*, 8(1).
- Miettinen, K.; Hakanen, J.; Podkopaev, D. (2016). Interactive nonlinear multiobjective optimization methods. *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*, 927-976. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_22.
- Mingers, J.; Brocklesby, J. (1997). Multimethodology: Towards a framework for mixing methodologies. *Omega*, 25(5), 489-509. [https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(97\)00018-2](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(97)00018-2).
- Mitroff, I. I.; Emshoff, J. R. (1979). On strategic assumption-making: A dialectical approach to policy and planning. *Academy of management Review*, 4(1), 1-12. <https://doi.org/10.5465/amr.1979.4289165>.
- Mohtar, R. H. (2022). The WEF Nexus Journey. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 183. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.820305>.
- Montibeller, G.; Gummer, H.; Tumidei, D. (2006). Combining scenario planning and multi-criteria decision analysis in practice. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 14(1-3), 5-20. <https://doi.org/10.1002/mcda.403>.
- Montibeller, G.; Von Winterfeldt, D. (2015). Cognitive and motivational biases in decision and risk analysis. *Risk analysis*, 35(7), 1230-1251. <https://doi.org/10.1111/risa.12360>.
- Moretti, S.; Öztürk, M.; Tsoukiàs, A. (2016). Preference modelling. *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*, 43-95. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_3.
- Morton, A.; Fasolo, B. (2009). Behavioural decision theory for multi-criteria decision analysis: a guided tour. *Journal of the Operational Research Society*, 60, 268-275. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602550>.
- Munda, G. (2003). Multicriteria assessment. *International Society for Ecological Economics*. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00369-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00369-2).
- Munda, G. (2004). Social multi-criteria evaluation: Methodological foundations and operational consequences. *European Journal of Operational Research*, 158(3), 662-677. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00369-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00369-2).
- Munda, G. (2008). *Social multi-criteria evaluation for a sustainable economy*. Vol. 17. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-73703-2>.
- Munda, G. (2016). Multiple criteria decision analysis and sustainable development. *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*, 1235-1267. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_27
- Muñoz, I.; Milà-i-Canals, L.; Fernández-Alba, A. R. (2010). Life cycle assessment of water supply plans in Mediterranean Spain: The Ebro river transfer versus the AGUA Programme. *Journal of Industrial Ecology*, 14(6), 902-918. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2010.00271.x>.
- MWI (2023). *National Water Strategy 2023-2040 Summary*. The Ministry of Water and Irrigation of the Hashemite Kingdom of Jordan. Abrufbar unter: https://www.mwi.gov.jo/EBV4.0/Root_Storage/AR/EB_Ticker/National_Water_Strategy_2023-2040_Summary-English_-ver2.pdf (letzter Zugriff: 10.08.2022).
- Nakhaei, M.; Ahmadi, A.; Gheibi, M.; Chahkandi, B.; Hajiaghahi-Keshteli, M.; Behzadian, K. (2023). A Smart Sustainable Decision Support System for Water Management of Power Plants in Water Stress Regions. *Expert Systems with Applications*, 120752.
- Nassrullah, H.; Anis, S. F.; Hashaikeh, R.; Hilal, N. (2020). Energy for desalination: A state-of-the-art review. *Desalination*, 491, 114569. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114569>.
- Navarro, F. J. C.; Van Nooijen, R. (2022). Managing Water and Energy on Small Islands Study Case Caye Chapel. *IFAC-PapersOnLine*, 55(5), 102-107.

- Nemery, P.; Campos, A. C. S. M.; Mareschal, B.; de Almeida, A. T. (2015). Addendum on: " Fuzzy FlowSort: An integration of the FlowSort method and Fuzzy Set Theory for decision making on the basis of inaccurate quantitative data". *Inf. Sci.*, 315, 54-55.
<https://doi.org/10.1016/j.ins.2015.04.021>.
- NewMed Energy (2023). *Leviathan Natural Gas Field*. NewMed Energy Israel. Abrufbar unter: <https://newmedenergy.com/operations/leviathan/> (letzter Zugriff: 21.11.2023).
- Nordström, E.-M.; Eriksson, L. O.; Öhman, K. (2010). Integrating multiple criteria decision analysis in participatory forest planning: Experience from a case study in northern Sweden. *Forest policy and economics*, 12(8), 562-574. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2010.07.006>.
- Nowack, M.; Günther, E. (2009). Szenarioplanung im integrierten Wasserressourcenmanagement. *uwf UmweltWirtschaftsForum*, 17, 251-255. <https://doi.org/10.1007/s00550-009-0146-z>.
- Nutt, P. C. (2004). Expanding the search for alternatives during strategic decision-making. *Academy of Management Perspectives*, 18(4), 13-28. <https://doi.org/10.5465/ame.2004.15268668>.
- Oberschmidt, J.; Geldermann, J.; Ludwig, J.; Schmehl, M. (2010). Modified PROMETHEE approach for assessing energy technologies. *International Journal of Energy Sector Management*, 4(2), 183-212. <https://doi.org/10.1108/17506221080000394>.
- OECD (1993). *Core set of indicators for environmental performance review: A synthesis report by the group on the state of the environment*. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris. Abrufbar unter: [https://one.oecd.org/document/OCDE/GD\(93\)179/En/pdf](https://one.oecd.org/document/OCDE/GD(93)179/En/pdf) (letzter Zugriff: 21.11.2023).
- Opricovic, S. (1990). Programski paket VIKOR za visekriterijumsko kompromisno rangiranje. 17th International symposium on operational research SYM-OP-IS,
- Opricovic, S.; Tzeng, G.-H. (2007). Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. *European Journal of Operational Research*, 178(2), 514-529.
- Pandey, V. P.; Shrestha, S. (2017). Evolution of the nexus as a policy and development discourse. *Water-Energy-Food Nexus: Principles and Practices*, 11-20. <https://doi.org/10.1002/9781119243175.ch2>.
- Papamichail, K. N.; Alves, G.; French, S.; Yang, J.; Snowdon, R. (2007). Facilitation practices in decision workshops. *Journal of the Operational Research Society*, 58, 614-632. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602373>.
- Parkinson, S. C.; Makowski, M.; Krey, V.; Sedraoui, K.; Almasoud, A. H.; Djilali, N. (2018). A multi-criteria model analysis framework for assessing integrated water-energy system transformation pathways. *Applied Energy*, 210, 477-486. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.142>.
- Parnell, G. S.; Hughes, D. W.; Burk, R. C.; Driscoll, P. J.; Kucik, P. D.; Morales, B. L.; Nunn, L. R. (2013). Invited review—Survey of value-focused thinking: Applications, research developments and areas for future research. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 20(1-2), 49-60. <https://doi.org/10.1002/mcda.1483>.
- Passet, R. (1995). *L'économique et le vivant*. Economica, France. <https://doi.org/10.3917/econo.passe.1996.01>.
- PCBS (2016). *Needed, Supply and Consumed Quantities, Population and Deficit in Domestic Supply in the West Bank*. Palestinian Central Bureau of Statistics. Abrufbar unter: https://www.pcbs.gov.ps/Portals/_Rainbow/Documents/water-E9-2016.html (letzter Zugriff: 09 December 2021).
- Pelissari, R.; Oliveira, M. C.; Abackerli, A. J.; Ben-Amor, S.; Assumpção, M. R. P. (2021). Techniques to model uncertain input data of multi-criteria decision-making problems: a literature review. *International Transactions in Operational Research*, 28(2), 523-559. <https://doi.org/10.1111/itor.12598>.
- Pérez, I. J.; Cabrerizo, F. J.; Alonso, S.; Herrera-Viedma, E. (2013). A new consensus model for group decision making problems with non-homogeneous experts. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 44(4), 494-498. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2013.2259155>.

- Petkov, D.; Petkova, O.; Andrew, T.; Nepal, T. (2007). Mixing multiple criteria decision making with soft systems thinking techniques for decision support in complex situations. *Decision support systems*, 43(4), 1615-1629. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2006.03.006>.
- Pittock, J.; Orr, S.; Stevens, L.; Aheeyar, M.; Smith, M. (2015). Tackling trade-offs in the nexus of water, energy and food. *Aquatic Procedia*, 5, 58-68. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.10.008>.
- Plath, M.; Wichmann, K. (2009). Energieverbrauch der deutschen Wasserversorgung. *DVGW Energie Wasser Praxis* (7/8), 54-55.
- PNIPH (2015). *Water Scarcity and Health Concerns in Palestine*. Palestinian National Institute of Public Health. Abrufbar unter: https://www.pniph.org/images/research/pniph-who-water_report_final.pdf (letzter Zugriff: 22.10.2023).
- Pohl, E. (2023). *Mehrkriterielle Portfolioentscheidungen für die Auswahl von Massnahmen zur Steigerung der Nachhaltigkeit in Containerterminals*. Universität Duisburg-Essen. <https://doi.org/10.17185/dupublico/78742>.
- Polatidis, H.; Haralambopoulos, D. A.; Munda, G.; Vreeker, R. (2006). Selecting an appropriate multi-criteria decision analysis technique for renewable energy planning. *Energy Sources, Part B*, 1(2), 181-193. <https://doi.org/10.1080/009083190881607>.
- Pöyhönen, M.; Hämäläinen, R. P. (2000). There is hope in attribute weighting. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 38(3), 272-282. <https://doi.org/10.1080/03155986.2000.11732412>.
- Pöyhönen, M.; Hämäläinen, R. P. (2001). On the convergence of multiattribute weighting methods. *European Journal of Operational Research*, 129(3), 569-585. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00467-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00467-1).
- Pöyhönen, M.; Vrolijk, H.; Hämäläinen, R. P. (2001). Behavioral and procedural consequences of structural variation in value trees. *European Journal of Operational Research*, 134(1), 216-227. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00255-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00255-1).
- Pretlove, B.; Blasiak, R. (2018). Mapping ocean governance and regulation. *Working paper for consultation for UN Global Compact Action Platform for Sustainable Ocean Business*.
- PROMETHEE-Cloud (2023). *PROMETHEE-Cloud: A web-based multi-criteria analysis tool*. University of Duisburg-Essen, Chair of Production and Operations Management. Abrufbar unter: <https://promethee.pom.uni-due.de/> (letzter Zugriff: 13.11.2023).
- Purwanto, A.; Sušnik, J.; Suryadi, F. X.; de Fraiture, C. (2021). Water-energy-food nexus: Critical review, practical applications, and prospects for future research. *Sustainability*, 13(4), 1919. <https://doi.org/10.3390/su13041919>.
- PWA (2013). *National Water Strategy for Palestine - Towards Building a Palestinian State from Water Perspective*. Palestinian Water Authority. Abrufbar unter: <https://www.pwa.ps/userfiles/server/%D8%A7%D8%B3%D8%AA%D8%B1%D8%A7%D8%AA%D8%AC%D9%8A%D8%A7%D8%AA/Eng/Water%20Strategy%20English%20Final.pdf> (letzter Zugriff: 10.01.2023).
- Quaschnig, V. (2021). *Regenerative Energiesysteme: Technologie–Berechnung–Klimaschutz*. Vol. 10. Carl Hanser Verlag, München, Germany.
- Raiffa, H. (1982). *The art and science of negotiation*. Harvard University Press.
- Ram, C.; Montibeller, G. (2013). Exploring the impact of evaluating strategic options in a scenario-based multi-criteria framework. *Technological Forecasting and Social Change*, 80(4), 657-672. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.09.019>.
- Ram, C.; Montibeller, G.; Morton, A. (2011). Extending the use of scenario planning and MCDA for the evaluation of strategic options. *Journal of the Operational Research Society*, 62(5), 817-829. <https://doi.org/10.1057/jors.2010.90>.
- Ramanathan, R.; Ganesh, L. (1994). Group preference aggregation methods employed in AHP: An evaluation and an intrinsic process for deriving members' weightages. *European Journal of Operational Research*, 79(2), 249-265. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)90356-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90356-5).
- Ranyard, J. C.; Fildes, R.; Hu, T.-I. (2015). Reassessing the scope of OR practice: The influences of problem structuring methods and the analytics movement. *European Journal of Operational Research*, 245(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.01.058>.

- Rao, S. S. (2019). *Engineering optimization: theory and practice*. John Wiley & Sons.
- Rasul, G.; Sharma, B. (2016). The nexus approach to water–energy–food security: an option for adaptation to climate change. *Climate Policy*, 16(6), 682-702. <https://doi.org/10.1080/14693062.2015.1029865>.
- Ravar, Z.; Zahraie, B.; Sharifinejad, A.; Gozini, H.; Jafari, S. (2020). System dynamics modeling for assessment of water–food–energy resources security and nexus in Gavkhuni basin in Iran. *Ecological Indicators*, 108. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105682>.
- Reagan-Cirincione, P.; Schuman, S.; Richardson, G. P.; Dorf, S. A. (1991). Decision modeling: Tools for strategic thinking. *Interfaces*, 21(6), 52-65. <https://doi.org/10.1287/inte.21.6.52>.
- Renn, O. (2006). Participatory processes for designing environmental policies. *Land use policy*, 23(1), 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2004.08.005>.
- Riepl, D. (2014). *Knowledge-based decision support for integrated water resources management with an application for Wadi Shueib, Jordan*. KIT Scientific Publishing. <https://doi.org/10.5445/KSP/1000034325>.
- Rockström, J.; Sukhdev, P. (2016). *How Food Connects All the SDGs*. Stockholm Resilience Centre. Abrufbar unter: <https://www.garnpress.com/news/how-food-connects-all-the-sustainable-development-goals> (letzter Zugriff: 21.11.2023).
- Rodriguez, D. J.; Delgado, A.; DeLaquil, P.; Sohns, A. (2013). *Thirsty energy*. Water Papers. World Bank, Washington, DC. Abrufbar unter: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/16536> (letzter Zugriff: 21.11.2023).
- Rosenhead, J. (2013). Problem structuring methods. *Encyclopedia of operations research and management science*, 1162-1172. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1153-7_806.
- Rosenhead, J.; Mingers, J. (2001). *Rational analysis for a problematic world revisited*. Vol. 2. John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/sres.491>.
- Roy, B. (1989). Main sources of inaccurate determination, uncertainty and imprecision in decision models. In: *Models and Methods in Multiple Criteria Decision Making* (pp. 1245-1254). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-037938-8.50009-4>.
- Roy, B. (1991). The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. *Theory and Decision*, 31, 49-73. <https://doi.org/10.1007/BF00134132>.
- Roy, B. (1993). Decision science or decision-aid science? *European Journal of Operational Research*, 66(2), 184-203. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)90312-B](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90312-B).
- Roy, B. (1996). *Multicriteria methodology for decision aiding*. Vol. 12. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2500-1>.
- Roy, B. (1998). A missing link in OR-DA: Robustness analysis. *Foundations of computing and decision sciences*, 23(3), 141-160.
- Roy, B. (1999). Decision-aiding today: What should we expect? In: *Multicriteria decision making: Advances in MCDM models, algorithms, theory, and applications* (pp. 1-35). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5025-9_1.
- Roy, B. (2010). Robustness in operational research and decision aiding: A multi-faceted issue. *European Journal of Operational Research*, 200(3), 629-638. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.12.036>.
- Roy, B. (2016). Paradigms and challenges. *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*, 19-39. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_2.
- Roy, B.; Bouyssou, D. (1993). Aide multicritère à la décision. *Economica Paris*. <https://doi.org/10.3166/rfg.214.15-28>.
- Roy, B.; Hugonnard, J.-C. (1982). Ranking of suburban line extension projects on the Paris metro system by a multicriteria method. *Transportation Research Part A: General*, 16(4), 301-312. [https://doi.org/10.1016/0191-2607\(82\)90057-7](https://doi.org/10.1016/0191-2607(82)90057-7).
- Roy, B.; Mousseau, V. (1996). A theoretical framework for analysing the notion of relative importance of criteria. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 5(2), 145-159. [https://doi.org/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.; Słowiński, R. (2013). Questions guiding the choice of a multicriteria decision aiding method. *EURO Journal on Decision Processes*, 1(1-2), 69-97. <https://doi.org/10.1007/s40070-013-0004-7>.

- Roy, B.; Vanderpooten, D. (1996). The European school of MCDA: Emergence, basic features and current works. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 5(1), 22-38. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1360\(199603\)5:1<22::AID-MCDA93>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1360(199603)5:1<22::AID-MCDA93>3.0.CO;2-F).
- Rusteberg, B.; Abu Sadah, M.; Al-Karablieh, E.; de Bourgoing, P. (2022a). Future Freshwater Deficits in Palestine and Jordan. In: P. de Bourgoing, P. Nussbaum, B. Rusteberg, & M. Sauter (Hrsg.), *The SALAM Initiative: Transboundary Strategies for the Resolution of the Water Deficit Problem in the Middle East, Key products-Policy briefs*.
- Rusteberg, B.; Bensabat, J.; De Bourgoing, P.; Sauter, M. (2022b). Assessment of Freshwater Strategies and Recommendations for Implementation. In: P. de Bourgoing, P. Nussbaum, B. Rusteberg, & M. Sauter (Hrsg.), *The SALAM Initiative: Transboundary Strategies for the Resolution of the Water Deficit Problem in the Middle East, Key products-Policy briefs*.
- Rusteberg, B.; Bensabat, J.; Salman, A.; Tamimi, A.-R.; Salameh, E.; Al-Karablieh, E.; Lange, T.; Sauter, M. (2019). *The SALAM Initiative: Concepts and approaches for the resolution of the water deficit problem in the Middle East at regional scale*. http://rustebergwaterconsulting.com/wp-content/uploads/2022/09/SMART-Broschuere_190527_DRUCK-1.pdf
- Rusteberg, B.; De Bourgoing, P.; Bensabat, J. (2022c). Water Production and Transfer Strategies. In: P. de Bourgoing, P. Nussbaum, B. Rusteberg, & M. Sauter (Hrsg.), *The SALAM Initiative: Transboundary Strategies for the Resolution of the Water Deficit Problem in the Middle East, Key products-Policy briefs*.
- Saaty, T. L. (1980). The Analytic Hierarchy Process Mcgraw Hill, New York. *Agricultural Economics Review*, 70, 34. <https://doi.org/10.1002/0470011815.b2a4a002>.
- Saaty, T. L. (1988). *What is the analytic hierarchy process?* Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-83555-1_5.
- Saaty, T. L. (2001). *Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world*. RWS publications.
- Saaty, T. L.; Peniwati, K. (2013). *Group decision making: drawing out and reconciling differences*. RWS publications.
- Sachs, I.; Silk, D. (1990). *Food and energy: strategies for sustainable development*. United Nations University Press.
- Salam, P. A.; Pandey, V. P.; Shrestha, S.; Anal, A. K. (2017). The need for the nexus approach. *Water-Energy-Food Nexus: Principles and Practices*, 1-10.
- Salameh, E.; Shteiwi, M.; Al Raggad, M. (2018). *Water resources of jordan: political, social and economic implications of scarce water resources*. Springer.
- Salman, M. (2013). Diagnostic Tools for investment in agricultural water management. *FAO*, 4-49. https://www.ipcinfo.org/fileadmin/user_upload/agwa/docs/WIF-AgWA-PPT.pdf
- Salo, A.; Hämäläinen, R. P. (2010). Preference programming–multicriteria weighting models under incomplete information. In: *Handbook of multicriteria analysis* (pp. 167-187). Springer.
- Salo, A.; Hämäläinen, R. P.; Lahtinen, T. J. (2021). Multicriteria methods for group decision processes: an overview. *Handbook of Group Decision and Negotiation*, 863-891. https://doi.org/10.1007%2F978-3-030-12051-1_16-1.
- Salo, A.; Keisler, J.; Morton, A. (2011). An invitation to portfolio decision analysis. In: *Portfolio decision analysis: Improved methods for resource allocation* (pp. 3-27). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9943-6>.
- Salo, A.; Punkka, A. (2005). Rank inclusion in criteria hierarchies. *European Journal of Operational Research*, 163(2), 338-356. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.10.014>.
- Salo, A. A.; Hamalainen, R. P. (2001). Preference ratios in multiattribute evaluation (PRIME)-elicitation and decision procedures under incomplete information. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 31(6), 533-545. <https://doi.org/10.1109/3468.983411>.
- Salo, A. A.; Hämäläinen, R. P. (1992). Preference assessment by imprecise ratio statements. *Operations research*, 40(6), 1053-1061. <https://doi.org/10.1287/opre.40.6.1053>.
- Saltelli, A.; Giampietro, M. (2017). What is wrong with evidence based policy, and how can it be improved? *Futures*, 91, 62-71. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2016.11.012>.

- Sanders, K. T.; Webber, M. E. (2012). Evaluating the energy consumed for water use in the United States. *Environmental Research Letters*, 7(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/3/034034>.
- Santoyo-Castelazo, E.; Azapagic, A. (2014). Sustainability assessment of energy systems: integrating environmental, economic and social aspects. *Journal of Cleaner Production*, 80, 119-138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.061>.
- Saucedo-Ramírez, O.; Mahlknecht, J.; González-Bravo, R. (2022). Optimization of water allocation networks in highly engineered basins: The case of Guandu River basin, Rio de Janeiro State, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 358, 131787.
- Schär, S. (2023). SALAM-MCDA: Digitale Werkzeuge für Entscheidungstragende. Abrufbar unter: <https://ogy.de/SALAM-MCDA> (letzter Zugriff: 13.11.2023).
- Schär, S.; Geldermann, J. (2021). Adopting multiactor multicriteria analysis for the evaluation of energy scenarios. *Sustainability*, 13(5), 2594. <https://doi.org/10.3390/su13052594>.
- Schär, S.; Geldermann, J. (2022a). Decision Support Tools for the Techno-Economic Evaluation of Selected Projects and Strategies. In: P. de Bourgoing, P. Nussbaum, B. Rusteberg, & M. Sauter (Hrsg.), *The SALAM Initiative: Transboundary Strategies for the Resolution of the Water Deficit Problem in the Middle East, Key products-Policy briefs*.
- Schär, S.; Geldermann, J. (2022b). Multi-Criteria Assessment of SALAM Regional Water Strategies. In: P. de Bourgoing, P. Nussbaum, B. Rusteberg, & M. Sauter (Hrsg.), *The SALAM Initiative: Transboundary Strategies for the Resolution of the Water Deficit Problem in the Middle East, Key products-Policy briefs*.
- Schär, S.; Geldermann, J. (2022c). Techno-Economic Assessment of Water Infrastructure Projects. In: P. de Bourgoing, P. Nussbaum, B. Rusteberg, & M. Sauter (Hrsg.), *The SALAM Initiative: Transboundary Strategies for the Resolution of the Water Deficit Problem in the Middle East, Key products-Policy briefs*.
- Schär, S.; Geldermann, J. (2022d). Techno-ökonomische Analyse integrierter Wasserinfrastrukturprojekte. *WasserWirtschaft*(7-8). <https://doi.org/10.1007/s35147-022-1092-8>.
- Scheday, M.; Zarzar, G. (2022a). Evaluierung von Transfersystemen zur Wasserversorgung von Jordanien und Palästina. *WasserWirtschaft*(7-8).
- Scheday, M.; Zarzar, G. (2022b). Water Conveyance System for Freshwater Deficit Coverage in Jordan and Palestine. In: P. de Bourgoing, P. Nussbaum, B. Rusteberg, & M. Sauter (Hrsg.), *The SALAM Initiative: Transboundary Strategies for the Resolution of the Water Deficit Problem in the Middle East, Key products-Policy briefs*.
- Scheibehenne, B.; Greifeneder, R.; Todd, P. M. (2010). Can there ever be too many options? A meta-analytic review of choice overload. *Journal of consumer research*, 37(3), 409-425. <https://doi.org/10.1086/651235>.
- Schnaars, S. P. (1987). How to develop and use scenarios. *Long range planning*, 20(1), 105-114. [https://doi.org/10.1016/0024-6301\(87\)90038-0](https://doi.org/10.1016/0024-6301(87)90038-0).
- Schoemaker, P. J. (1995). Scenario planning: a tool for strategic thinking. *MIT Sloan Management Review*.
- Scholten, L.; Schuwirth, N.; Reichert, P.; Lienert, J. (2015). Tackling uncertainty in multi-criteria decision analysis—An application to water supply infrastructure planning. *European Journal of Operational Research*, 242(1), 243-260. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.09.044>.
- Schuwirth, N.; Reichert, P.; Lienert, J. (2012). Methodological aspects of multi-criteria decision analysis for policy support: A case study on pharmaceutical removal from hospital wastewater. *European Journal of Operational Research*, 220(2), 472-483. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.01.055>.
- Scopus (2023). *Scopus curated abstract and citation database*. Elsevier. Abrufbar unter: <https://www.elsevier.com/solutions/scopus> (letzter Zugriff: 19.05.2023).
- Scott, C. A.; Pierce, S. A.; Pasqualetti, M. J.; Jones, A. L.; Montz, B. E.; Hoover, J. H. (2011). Policy and institutional dimensions of the water–energy nexus. *Energy Policy*, 39(10), 6622-6630. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.08.013>.

- Shahzad, M. W.; Burhan, M.; Ang, L.; Ng, K. C. (2017). Energy-water-environment nexus underpinning future desalination sustainability. *Desalination*, 413, 52-64. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.03.009>.
- Shmelev, S. E.; Shmeleva, I. A. (2018). Global urban sustainability assessment: A multidimensional approach. *Sustainable Development*, 26(6), 904-920.
- Siebert, J.; Keeney, R. L. (2015). Creating more and better alternatives for decisions using objectives. *Operations research*, 63(5), 1144-1158. <https://doi.org/10.1287/opre.2015.1411>
- Simon, H. A. (1976). From substantive to procedural rationality. In: *25 years of economic theory: Retrospect and prospect* (pp. 65-86). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-4367-7_6.
- Simos, J. (1990). *Evaluer l'impact sur l'environnement: Une approche originale par l'analyse multicritère et la négociation*. Vol. 1015. Presses polytechniques et universitaires romandes Lausanne.
- Simpson, G. B.; Jewitt, G. P. (2019a). The development of the water-energy-food nexus as a framework for achieving resource security: a review. *Frontiers in Environmental Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00008>.
- Simpson, G. B.; Jewitt, G. P. (2019b). The water-energy-food nexus in the anthropocene: moving from 'nexus thinking' to 'nexus action'. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 40, 117-123. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2019.10.007>.
- Siskos, E.; Siskos, Y. (2022). Interactive Multicriteria Methodology Based on a Synergy of PROMETHEE II and Robust Simos Methods: Application to the Evaluation of E-government in Europe. In: *Intelligent Decision Support Systems* (pp. 269-295). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96318-7_14.
- Siskos, E.; Tsotsolas, N. (2015). Elicitation of criteria importance weights through the Simos method: A robustness concern. *European Journal of Operational Research*, 246(2), 543-553. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.04.037>.
- Siskos, Y.; Grigoroudis, E.; Matsatsinis, N. F. (2016). UTA methods. *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*, 315-362. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_9.
- Sivakumar, M.; Ramezani-pour, M. (2015). Sustainable solar powered vacuum membrane distillation for water treatment. 2015 International Conference on Technologies for Sustainable Development (ICTSD),
- Smajgl, A.; Ward, J.; Pluschke, L. (2016). The water-food-energy Nexus-Realising a new paradigm. *Journal of hydrology*, 533, 533-540. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.033>.
- Smeets, E.; Weterings, R. (1999). *Environmental indicators: Typology and overview*. TNO centre for strategy, technology and policy., Netherlands. Abrufbar unter: (letzter
- Soleimani, E.; Afshar, A.; Molajou, A. (2022). A review on water simulation models for the WEF Nexus: development perspective. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(53), 79769-79785. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19849-w>.
- Sowers, J.; Vengosh, A.; Weinthal, E. (2011). Climate change, water resources, and the politics of adaptation in the Middle East and North Africa. *Climatic change*, 104(3), 599-627. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9835-4>.
- Specht, C. (2023). *Entscheidungsverhalten unter Ungewissheit bei mehreren Zielgrößen*. Dissertationsschrift, Technische Universität Clausthal. https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/servlets/MCRFileNodeServlet/clausthal_derivate_00002033/Db%20115534.pdf
- Staw, B. M. (1981). The escalation of commitment to a course of action. *Academy of management Review*, 6(4), 577-587. <https://doi.org/10.5465/amr.1981.4285694>.
- Stein, C.; Barron, J.; Moss, T. (2014). Governance of the nexus: from buzz words to a strategic action perspective. *Nexus network think piece series, paper*, 3, 1-23.
- Sterman, J. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill Education Ltd, Boston.
- Stewart, T. (2005). Dealing with uncertainties in MCDA. *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*, 445-466. <https://doi.org/10.1007/b100605>.
- Stewart, T. J. (1992). A critical survey on the status of multiple criteria decision making theory and practice. *Omega*, 20(5-6), 569-586. [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(92\)90003-P](https://doi.org/10.1016/0305-0483(92)90003-P).

- Stewart, T. J.; French, S.; Rios, J. (2013). Integrating multicriteria decision analysis and scenario planning – Review and extension. *Omega*, 41(4), 679-688. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2012.09.003>.
- Stirling, A. (2015). Developing 'Nexus Capabilities': towards transdisciplinary methodologies. *University of Sussex, Brighton, UK*, 38. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2834.9920>.
- Swamee, P. K.; Jain, A. K. (1976). Explicit equations for pipe-flow problems. *Journal of the hydraulics division*, 102(5), 657-664.
- Taha, Z.; Rostam, S. (2012). A hybrid fuzzy AHP-PROMETHEE decision support system for machine tool selection in flexible manufacturing cell. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23, 2137-2149. <https://doi.org/10.1007/s10845-011-0560-2>.
- Te Boveldt, G.; Keserü, I.; Macharis, C. (2021). How can multi-criteria analysis support deliberative spatial planning? A critical review of methods and participatory frameworks. *Evaluation*, 27(4), 492-509. <https://doi.org/10.1177/13563890211020334>.
- Terrapon-Pfaff, J.; Ersoy, S. R.; Fink, T.; Amroune, S.; Jamea, E. M.; Zgou, H.; Viebahn, P. (2020). Localizing the water-energy nexus: the relationship between solar thermal power plants and future developments in local water demand. *Sustainability*, 13(1), 108. <https://doi.org/10.3390/su13010108>.
- Tervonen, T.; Figueira, J. R.; Lahdelma, R.; Dias, J. A.; Salminen, P. (2009). A stochastic method for robustness analysis in sorting problems. *European Journal of Operational Research*, 192(1), 236-242. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.09.008>.
- Thabrew, L.; Wiek, A.; Ries, R. (2009). Environmental decision making in multi-stakeholder contexts: applicability of life cycle thinking in development planning and implementation. *Journal of Cleaner Production*, 17(1), 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.03.008>.
- topographic-map.com (2023). *Free topographic maps and elevation profiles*. Abrufbar unter: <https://topographic-map.com> (letzter Zugriff: 07.10.2023).
- Trùng, T.-M.; Bresinsky, L.; Sauter, M. (2022). Regional Models of Large-Scale Storage of Desalinated Seawater. In: P. de Bourgoing, P. Nussbaum, B. Rusteberg, & M. Sauter (Hrsg.), *The SALAM Initiative: Transboundary Strategies for the Resolution of the Water Deficit Problem in the Middle East, Key products-Policy briefs*.
- Tscherning, K.; Helming, K.; Krippner, B.; Sieber, S.; y Paloma, S. G. (2012). Does research applying the DPSIR framework support decision making? *Land use policy*, 29(1), 102-110. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.05.009>.
- Tsoukiàs, A. (2007). On the concept of decision aiding process: an operational perspective. *Annals of Operations Research*, 154(1), 3-27. <https://doi.org/10.1007/s10479-007-0187-z>.
- Tsoukiàs, A.; Vincke, P. (1995). A new axiomatic foundation of partial comparability. *Theory and Decision*, 39(1), 79-114. <https://doi.org/10.1007/BF01078870>.
- Tsoutsos, T.; Drandaki, M.; Frantzeskaki, N.; Iosifidis, E.; Kiosses, I. (2009). Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of Crete. *Energy Policy*, 37(5), 1587-1600. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.12.011>.
- Turcksin, L.; Macharis, C.; Lebeau, K.; Boureima, F.; Van Mierlo, J.; Bram, S.; De Ruyck, J.; Mertens, L.; Jossart, J.-M.; Gorissen, L. (2011). A multi-actor multi-criteria framework to assess the stakeholder support for different biofuel options: The case of Belgium. *Energy Policy*, 39(1), 200-214. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.09.033>.
- Tversky, A.; Kahneman, D. (1974). Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases: Biases in judgments reveal some heuristics of thinking under uncertainty. *Science*, 185(4157), 1124-1131. <https://doi.org/10.1126/science.185.4157.1124>.
- Tversky, A.; Kahneman, D. (1981). The framing of decisions and the psychology of choice. *Science*, 211(4481), 453-458. <https://doi.org/10.1126/science.7455683>.
- UN (1992a). *Agenda 21*. United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro. Abrufbar unter: <https://web.archive.org/web/20140730190755/http://habitat.igc.org/agenda21/> (letzter Zugriff: 15.02.2023).

- UN (1992b). *Report of the United Nations Conference on Environment and Development (A/RES/44/228)*. United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro. Abrufbar unter: [https://undocs.org/en/A/CONF.151/26/Rev.1\(vol.I\)](https://undocs.org/en/A/CONF.151/26/Rev.1(vol.I)) (letzter Zugriff: 15.02.2023).
- UN (2012). *The future we want (A/Res/ 66/288)*. United Nations General Assembly. Abrufbar unter: http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/66/288&Lang=E (letzter Zugriff: 15.02.2023).
- UN (2014). *Water and energy: The United Nations world water development report 2014*. World Water Assessment Programme. United Nations, New York, United States. Abrufbar unter: www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2014. (letzter Zugriff: 15.02.2023).
- UN (2015). *Water for a sustainable world: the UN world water development report 2015*. United Nations. Abrufbar unter: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000231823> (letzter Zugriff: 21.11.2023).
- UN (2017). *Revised list of global Sustainable Development Goal indicators*. New York: United Nations. United Nations. Abrufbar unter: <https://unstats.un.org/sdgs/indicators/official%20revised%20list%20of%20global%20sdg%20indicators.pdf> (letzter Zugriff: 21.11.2023).
- UN (2018). *Water and energy: The United Nations world water development report 2018*. World Water Assessment Programme. United Nations, New York, United States. Abrufbar unter: www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2018. (letzter Zugriff: 15.02.2023).
- UN (2020). *Water and climate change*. The United Nations World Water Development Report; UNESCO. United Nations, Paris, France. Abrufbar unter: <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2020>. (letzter Zugriff: 14 June 2023).
- UN (2022). *Groundwater - Making the invisible visible: The United Nations world water development report 2022*. World Water Assessment Programme. United Nations, New York, United States. Abrufbar unter: www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2018. (letzter Zugriff: 15.02.2023).
- UN (2023a). *E-Handbook on Sustainable Development Goals Indicators*. United Nations Inter-agency and Expert Group on SDG Indicators. Abrufbar unter: <https://unstats.un.org/wiki/display/SDGeHandbook/Home> (letzter Zugriff: 15.01.2023).
- UN (2023b). *SDG Global Database*. United Nations Inter-agency and Expert Group on SDG Indicators. Abrufbar unter: <https://unstats.un.org/sdgs/dataportal> (letzter Zugriff: 15.01.2023).
- UN (2023c). *Sustainable Development Goals Progress Chart 2022*. United Nations Inter-agency and Expert Group on SDG Indicators. Abrufbar unter: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/Progress-Chart-2022.pdf> (letzter Zugriff: 15.01.2023).
- UN (2023d). *The Sustainable Development Goals Report 2023: Special Edition*. United Nations. Department of Economic Social Affairs. Abrufbar unter: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/> (letzter Zugriff: 03.10.2023).
- UN (2023e). *The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water*. UNESCO World Water Assessment Programme. Abrufbar unter: <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2023> (letzter Zugriff: 03.10.2023).
- UN CSD (1997). *Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world*. United Nations Commission on Sustainable Development and Stockholm Environmental Institute, New York. Abrufbar unter: https://digitallibrary.un.org/record/231336/files/E_CN.17_1997_9-EN.pdf?ln=en (letzter Zugriff: 22.11.2023).
- UN DESA (2011). *World Economic and Social Survey*. United Nations Department of Economic and Social Affairs, New York. Abrufbar unter: https://www.un.org/en/development/desa/policy/wess/wess_current/2011wess.pdf (letzter Zugriff: 21.01.2023).
- UN DESA (2023). *The global Climate, Land, Energy & Water Strategies model*. Royal Institute of Technology (KTH), United Nations Division for Sustainable Development,. Abrufbar unter: <https://unite.un.org/sites/unite.un.org/files/app-globalclews-v-1-0/index.html> (letzter Zugriff: 01.09.2023).

- UN ESCAP (2013). *Water, food and energy nexus in Asia and the Pacific*. United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific. Abrufbar unter: <https://www.unescap.org/sites/default/files/Water-Food-Nexus%20Report.pdf> (letzter Zugriff: 21.11.2023).
- UN General Assembly. (2015). UN General Assembly, Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development, 21 October 2015, A/RES/70/1.
- UNDP (2008). *Fuel Switching Project of the Aqaba Thermal Power Station (ATPS): Clean Development Mechanism Project Design Document Form*. United Nations Development Programme, New York. Abrufbar unter: <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SGS-UKL1206977860.83/ReviewInitialComments/TMATEJ25HB1J5CF8K80QHJ6O1YB94Q> (letzter Zugriff: 22.11.2023).
- UNDP (2013). *Water governance in the Arab region: managing scarcity and securing the future*. (9211263662). United Nations Development Programme. Regional Bureau for Arab States. Abrufbar unter: <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.1879.8888> (letzter Zugriff: 22.10.2023).
- UNECE (2018). *Methodology for assessing the water-food-energy-ecosystem nexus in transboundary basins and experiences from its application: synthesis*. United Nations Economic Commission for Europe. Abrufbar unter: https://unece.org/DAM/env/water/publications/WAT_55_NexusSynthesis/ECE-MP-WAT-55_NexusSynthesis_Final-for-Web.pdf (letzter Zugriff: 03.10.2023).
- UNECE Task Force on Water–Energy–Food–Ecosystems (2013). *Water–Food–Energy–Ecosystems Nexus for Reconciling Different Uses in Transboundary River Basins – UNECE Water Convention Draft Methodology*. United Nations Economic Commission for Europe, Geneva, Switzerland. Abrufbar unter: https://unece.org/sites/default/files/2022-10/ECE_MP.WAT_55_ENG.pdf (letzter Zugriff: 21.11.2023).
- UNFPA (2017). *Palestine 2030-Demographic Change: Opportunities for Development*. United Nations Population Fund Palestine. Abrufbar unter: <https://palestine.unfpa.org/en/publications/palestine-2030-demographic-change-opportunities-development> (letzter Zugriff: 10.01.2023).
- UNICEF (2022). *Tapped out: The costs of water stress in Jordan*. United Nations Children’s Fund Jordan and Economist Impact. Abrufbar unter: <https://www.unicef.org/jordan/media/11356/file/water%20stress%20in%20Jordan%20report.pdf> (letzter Zugriff: 22.01.2023).
- Van Asselt, M. B.; Rotmans, J. (2002). Uncertainty in integrated assessment modelling. *Climatic change*, 54(1-2), 75-105. <https://doi.org/10.1023/A:1015783803445>.
- Van den Bergh, J. C. (2007). *Evolutionary economics and environmental policy: survival of the greenest*. Edward Elgar Publishing.
- van Gevelt, T. (2020). The water–energy–food nexus: bridging the science–policy divide. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 13, 6-10. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.09.008>.
- van Til, J.; Groothuis-Oudshoorn, C.; Lieferink, M.; Dolan, J.; Goetghebeur, M. (2014). Does technique matter; a pilot study exploring weighting techniques for a multi-criteria decision support framework. *Cost effectiveness and resource allocation*, 12(1), 1-11. <https://doi.org/10.1186/1478-7547-12-22>.
- Vennix, J. A. (1996). Group model building. *System dynamics*, 2, 123-132. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1727\(199621\)12:1<39::AID-SDR94>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1727(199621)12:1<39::AID-SDR94>3.0.CO;2-K).
- Vergne, J. P.; Durand, R. (2010). The missing link between the theory and empirics of path dependence: Conceptual clarification, testability issue, and methodological implications. *Journal of management studies*, 47(4), 736-759. <https://doi.org/10.1111/j.1467-6486.2009.00913.x>.
- Verlinde, S.; Macharis, C. (2016). Who is in favor of off-hour deliveries to Brussels supermarkets? Applying Multi Actor Multi Criteria analysis (MAMCA) to measure stakeholder support. *Transportation Research Procedia*, 12, 522-532. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.008>.
- Verly, C.; De Smet, Y. (2013). Some results about rank reversal instances in the PROMETHEE methods. *International Journal of Multicriteria Decision Making* 71, 3(4), 325-345. <https://doi.org/10.1504/IJMCDM.2013.056781>.

- Vetschera, R. (1994). Visualisierungstechniken in Entscheidungsproblemen bei mehrfacher Zielsetzung. *Operations-Research-Spektrum*, 16, 227-241. <https://doi.org/10.1007/BF01720313>.
- Vinca, A.; Riahi, K.; Rowe, A.; Djilali, N. (2021). Climate-land-energy-water nexus models across scales: progress, gaps and best accessibility practices. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 691523. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.691523>.
- Vincke, P. (1992). *Multicriteria decision-aid*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/mcda.4020030208>.
- Von Neumann, J.; Morgenstern, O. (2007). *Theory of games and economic behavior (60th Anniversary Commemorative Edition)*. Princeton university press.
- Von Nitzsch, R.; Weber, M. (1993). The effect of attribute ranges on weights in multiattribute utility measurements. *Management science*, 39(8), 937-943. <https://doi.org/10.1287/mnsc.39.8.937>.
- Von Winterfeldt, D.; Edwards, W. (1986). *Decision analysis and behavioral research*. Cambridge University Press.
- Von Winterfeldt, D.; Fischer, G. W. (1975). Multi-attribute utility theory: models and assessment procedures. *Utility, Probability, and Human Decision Making: Selected Proceedings of an Interdisciplinary Research Conference, Rome, 3-6 September, 1973*, https://doi.org/10.1007/978-94-010-1834-0_3.
- Wack, P. (1985). Scenarios: uncharted waters ahead. *Harvard business review*, 63(5), 72-89.
- Waitzbauer, W.; Petutschnig, B. (2004). Zur Hydrogeologie Jordaniens. *Denisia*. https://www.zobodat.at/pdf/DENISIA_0014_0055-0076.pdf
- Walker, W. E.; Harremoës, P.; Rotmans, J.; Van Der Sluijs, J. P.; Van Asselt, M. B.; Janssen, P.; Kreyer von Krauss, M. P. (2003). Defining uncertainty: a conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support. *Integrated assessment*, 4(1), 5-17. <https://doi.org/10.1076/iaij.4.1.5.16466>.
- Wang, J.-J.; Jing, Y.-Y.; Zhang, C.-F.; Zhao, J.-H. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2263-2278. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.021>.
- Water in the West (2013). *Water and Energy Nexus: A literature Review*. Stanford Woods Institute for the Environment and Bill Lance Center for the American West, Stanford CA, United States of America. Abrufbar unter: https://waterinthewest.stanford.edu/sites/default/files/Water-Energy_Lit_Review.pdf (letzter Zugriff: 05.10.2023).
- WBCSD. (2014). Co-optimizing solutions: Water and energy for food, feed and fiber. https://docs.wbcsd.org/2014/05/WBCSD_Co-op_Report.pdf
- Weber, M.; Borcherding, K. (1993). Behavioral influences on weight judgments in multiattribute decision making. *European Journal of Operational Research*, 67(1), 1-12. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)90318-H](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90318-H).
- Weber, M.; Eisenführ, F.; Von Winterfeldt, D. (1988). The effects of splitting attributes on weights in multiattribute utility measurement. *Management science*, 34(4), 431-445. <https://doi.org/10.1287/mnsc.34.4.431>.
- WEF. (2011). *Water security: the water-food-energy-climate nexus*. Island Press. https://www3.weforum.org/docs/WEF_WI_WaterSecurity_WaterFoodEnergyClimateNexus_2011.pdf
- WEF (2023). *The Global Risks Report 2023*. World Economic Forum. Abrufbar unter: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2023.pdf (letzter Zugriff: 05.10.2023).
- Whitman, E. (2019). A land without water. *Nature*, 573(7772), 20-23. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02600-w>.
- WHO (2023). *Tracking SDG 7: The Energy Progress Report 2023*. Joint report of SDG 7 custodian agencies IRENA, IEA, UNSD, World Bank and the WHO. Abrufbar unter: <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/Tracking-SDG7-2023> (letzter Zugriff: 03.10.2023).

- Witt, T.; Dumeier, M.; Geldermann, J. (2020). Combining scenario planning, energy system analysis, and multi-criteria analysis to develop and evaluate energy scenarios. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118414. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118414>.
- Wood, S. L.; Jones, S. K.; Johnson, J. A.; Brauman, K. A.; Chaplin-Kramer, R.; Fremier, A.; Girvetz, E.; Gordon, L. J.; Kappel, C. V.; Mandle, L. (2018). Distilling the role of ecosystem services in the Sustainable Development Goals. *Ecosystem services*, 29, 70-82.
- World Bank (2023a). *Population estimates and projections Database*. Abrufbar unter: <https://databank.worldbank.org/source/population-estimates-and-projections> (letzter Zugriff: 10.01.2023).
- World Bank (2023b). *World Development Indicators*. Abrufbar unter: <https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=2&series=AG.LND.AGRI.ZS&country> (letzter Zugriff: 10.01.2023).
- Wright, G.; Bradfield, R.; Cairns, G. (2013). Does the intuitive logics method—and its recent enhancements—produce “effective” scenarios? *Technological Forecasting and Social Change*, 80(4), 631-642. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.09.003>.
- Wu, L.; Mao, X.; Yang, X.; Li, Z.; Fang, S. (2017). Sustainability assessment of urban water planning using a multi-criteria analytical tool—a case study in Ningbo, China. *Water Policy*, 19(3), 532-555.
- WWF. (2014). *The Water-Food-Energy Nexus: Insights into Resilient Development*. In: World Wide Fund for Nature UK and SAB Miller. http://assets.wwf.org.uk/downloads/sab03_01_sab_wwf_project_nexus_final.pdf
- Xanke, J.; Abu Sadah, M.; Barakat, O.; Ohmer, M.; Liesch, T.; Al-Karablieh, E. (2022a). Management Strategies for the Reuse of Treated Wastewater in the Lower Jordan Valley. In: P. de Bourgoing, P. Nussbaum, B. Rusteberg, & M. Sauter (Hrsg.), *The SALAM Initiative: Transboundary Strategies for the Resolution of the Water Deficit Problem in the Middle East, Key products-Policy briefs*.
- Xanke, J.; Abu Sadah, M.; Hepp, R.; Barakat, O.; Ohmer, M.; Liesch, T.; Sauter, M. (2022b). Groundwater Models of the Lower Jordan Valley Aquifer. In: P. de Bourgoing, P. Nussbaum, B. Rusteberg, & M. Sauter (Hrsg.), *The SALAM Initiative: Transboundary Strategies for the Resolution of the Water Deficit Problem in the Middle East, Key products-Policy briefs*.
- Xanke, J.; Ohmer, M.; Liesch, T. (2022c). Concepts for the Reuse of treated Wastewater in the Lower Jordan Valley. *WasserWirtschaft*(7-8).
- Yamazaki, D.; Ikeshima, D.; Tawatari, R.; Yamaguchi, T.; O'Loughlin, F.; Neal, J. C.; Sampson, C. C.; Kanae, S.; Bates, P. D. (2017). A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophysical Research Letters*, 44(11), 5844-5853. <https://doi.org/10.1002/2017GL072874>.
- Yeh, C.-H.; Chang, Y.-H. (2009). Modeling subjective evaluation for fuzzy group multicriteria decision making. *European Journal of Operational Research*, 194(2), 464-473. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.12.029>.
- Yoon, J.; Klassert, C.; Selby, P.; Lachaut, T.; Knox, S.; Avisse, N.; Harou, J.; Tilmant, A.; Klauer, B.; Mustafa, D. (2021). A coupled human–natural system analysis of freshwater security under climate and population change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(14). <https://doi.org/10.1073/pnas.2020431118>.
- Younes, A.; Azibi, R.; Roy, B. (2000). ELECTRE IS: Manuel d'utilisation. *Document du LAMSADE*, 118.
- Yüce, S.; Janowitz, D. (2022a). On- and Offshore Solutions for Large-Scale Seawater Desalination at the Israeli Coast and Gaza. In: P. de Bourgoing, P. Nussbaum, B. Rusteberg, & M. Sauter (Hrsg.), *The SALAM Initiative: Transboundary Strategies for the Resolution of the Water Deficit Problem in the Middle East, Key products-Policy briefs*.
- Yüce, S.; Janowitz, D. (2022b). Renewable Energy for Seawater Desalination in the Middle East: Case Study Aqaba, Jordan. In: P. de Bourgoing, P. Nussbaum, B. Rusteberg, & M. Sauter (Hrsg.), *The SALAM Initiative: Transboundary Strategies for the Resolution of the Water Deficit Problem in the Middle East, Key products-Policy briefs*.
- Zhang, H.; Dong, Y.; Chiclana, F.; Yu, S. (2019). Consensus efficiency in group decision making: A comprehensive comparative study and its optimal design. *European Journal of Operational Research*, 275(2), 580-598. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.11.052>.

-
- Zhang, X.; Vesselinov, V. V. (2016). Energy-water nexus: Balancing the tradeoffs between two-level decision makers. *Applied Energy*, 183, 77-87. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.156>.
- Zheng, J.; Egger, C.; Lienert, J. (2016). A scenario-based MCDA framework for wastewater infrastructure planning under uncertainty. *Journal of Environmental Management*, 183, 895-908. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.027>.
- Zimmermann, H.-J.; Gutsche, L. (1991). *Multi-Criteria Analyse: Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen*. Springer-Verlag.

Veröffentlichungen

- Pohl, E.; Schär, S.; Geldermann, J. (2022). Bewertung von Kostensenkungspotenzialen in elektrisch betriebenen Containerterminals durch Einsatz von Demand Response. In: H. Proff (Hrsg.), *Transforming Mobility – What Next?*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, S. 563–581. ISBN: 978-3-658-36429-8. https://doi.org/10.1007/978-3-658-36430-4_33.
- Schär, S.; Bischi, A.; Baccioli, A.; Desideri, U.; Geldermann, J. (2023). Optimization of sustainable seawater desalination : Modeling renewable energy integration and energy storage concepts, *Energy Conversion and Management*, 293, 117447. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117447>.
- Schär, S.; Geldermann, J. (2021). Adopting multiactor multicriteria analysis for the evaluation of energy scenarios. *Sustainability*, 13(5), 2594. <https://doi.org/10.3390/su13052594>.
- Schär, S.; Geldermann, J. (2022). Techno-ökonomische Analyse integrierter Wasserinfrastrukturprojekte. *WasserWirtschaft*(7-8). <https://doi.org/10.1007/s35147-022-1092-8>.
- Schär, S.; Geldermann, J. (2022). Decision Support Tools for the Techno-Economic Evaluation of Selected Projects and Strategies. In: P. de Bourgoing, P. Nussbaum, B. Rusteberg, & M. Sauter (Hrsg.), *The SALAM Initiative: Transboundary Strategies for the Resolution of the Water Deficit Problem in the Middle East, Key products-Policy briefs*. ISBN: 978-3-943647-10-5.
- Schär, S.; Geldermann, J. (2022). Multi-Criteria Assessment of SALAM Regional Water Strategies. In: P. de Bourgoing, P. Nussbaum, B. Rusteberg, & M. Sauter (Hrsg.), *The SALAM Initiative: Transboundary Strategies for the Resolution of the Water Deficit Problem in the Middle East, Key products-Policy briefs*. ISBN: 978-3-943647-10-5.
- Schär, S.; Geldermann, J. (2022). Techno-Economic Assessment of Water Infrastructure Projects. In: P. de Bourgoing, P. Nussbaum, B. Rusteberg, & M. Sauter (Hrsg.), *The SALAM Initiative: Transboundary Strategies for the Resolution of the Water Deficit Problem in the Middle East, Key products-Policy briefs*. ISBN: 978-3-943647-10-5.

Vorträge auf wissenschaftlichen Fachkonferenzen

1. Schär, S.; Geldermann, J. (2023). Prospective multi-criteria analysis in the water-energy nexus. *International Conference on Economics and Business Road to Sustainability - ICEBRS*, Coimbra, Portugal, 29.06. – 01.07. 2023.
2. Schär, S.; Huang, H.; Pohl, E.; Macharis, C.; Geldermann, J. (2023). Resolving ambiguous preference information in group decision-making: A novel optimization model for consensual decision-making. *International Conference on Operations Research - OR*, Hamburg, Germany, 29.08. – 01.09. 2023.
3. Schär, S.; Rusteberg, B.; Bensabat, J.; Scheday, M.; Zarzar, G.; Geldermann, J. (2022). Techno-Economic Assessment of Integrated Water Resources Management Infrastructure Projects. *International Conference on Water Resources Management and Sustainability: Solutions for Arid Regions*, Dubai, 22.03. – 24.03. 2022.
4. Schär, S.; Geldermann, J. (2022). Multi-Actor Multi-Criteria Analysis for Transboundary Integrated Water Resources Management Infrastructure Projects in the Middle East. *International Conference on Operations Research - OR*, Karlsruhe, Germany, 06.09. – 09.09. 2022.
5. Schär, S.; Geldermann, J. (2021). Prospective multi-criteria analysis in the water-energy nexus. *International Conference on Operations Research - OR*, Bern, Switzerland, 31.08. – 03.09. 2021.
6. Schär, S.; Pohl, E.; Geldermann, J. (2020). Evaluating cost-reduction potentials in electrically powered container terminals by using Energy Demand Side Management. *GOR Workshop Entscheidungstheorie und Praxis*, Bochum, Germany, 08.10. – 09.10. 2020.
7. Schär, S.; Geldermann, J. (2020). Adopting multi-actor multi-criteria analysis for the evaluation of energy scenarios. *DLR Workshop Prospektive multidimensionale Bewertung von Energietechnologien und -szenarien*, Oldenburg, Germany, 20.02. – 21.02. 2020.