



Bachelorarbeit

zum Thema

**Analyse und Vergleich von  
Methoden zur integrierten Bewertung  
von Infrastrukturmaßnahmen im  
Schienenverkehr**

vorgelegt von: Rebekka Ott  
Matrikel-Nr.: 3587273  
Studiengang: Verkehrswirtschaft  
geboren am: 05.09.1987 in Hamburg  
Verantwortlicher  
Hochschullehrer: Dr.-Ing. Stefan Lämmer

Betreut durch  
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christoph Lackhove



**Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt**  
Institut für Verkehrs-  
systemtechnik

# **Themenblatt bzw. Aufgabenstellung**





---

## **Abstract**

In order to extend railway infrastructure and keep it on demand, improvements in measures of construction need to follow technological advances. Therefore an evaluation of potential projects has to take place. Infrastructure measures have effect on diverse aspects in many fields such as economy, environment and society. In this thesis theories and techniques of chosen methods for decision making are introduced. The evaluation method of the Federal Transport Infrastructure Plan 2003 of Germany principally uses a cost-benefit-analysis to rank projects, while most of the criteria are quantified monetarily. As qualitative and quantitative aspects are viewed equivalently, additional multicriteria decision making techniques are presented. In particular the outranking-approaches: Hasse-Diagram-Technique, ELECTRE, PROMETHEE and ORESTE are calculated on the basis of a decision problem in railway infrastructure. Finally ELECTRE, PROMETHEE and ORESTE have a good presentation of the findings using prevalence graphs. Due to higher information content of the results, ELECTRE and PROMETHEE are preferred to ORESTE. To evaluate railway infrastructure involving heterogeneous criteria ELECTRE and PROMETHEE are recommended.



## Kurzfassung

Um den Ausbauzustand der Schieneninfrastruktur an die aktuelle und prognostizierte Nachfrage sowie Kapazitätserweiterungen von Güter- und Personentransport anzupassen, müssen Infrastrukturmaßnahmen mit dem momentan technischen Erkenntnisstand durchgeführt werden. Da nur ein begrenztes Budget vorhanden ist, muss eine Bewertung der potenziellen Projekte stattfinden. Die Infrastrukturmaßnahmen haben Auswirkungen auf multiple Aspekte in verschiedenen Bereichen, wie der Ökonomie, Umwelt und Gesellschaft. Um die vorteilhafteste Maßnahme identifizieren zu können, werden Modelle zur Entscheidungsfindung in dieser Arbeit vorgestellt.

Die Bewertungsmethode des Bundesverkehrswegeplans 2003 in Deutschland gebraucht vorwiegend die Nutzen-Kosten-Analyse für eine Dringlichkeitseinstufung der Projekte, wobei die meisten Kriterien monetarisiert werden. Da nicht nur quantitative sondern auch qualitative Aspekte eingebracht werden sollen, werden weitere multikriterielle Methoden präsentiert. Insbesondere die Outranking-Verfahren: Hasse-Diagramm-Technik, ELECTRE, PROMETHEE und ORESTE werden auf Basis eines Entscheidungsproblems im Schienenverkehr berechnet. Letztendlich weisen ELECTRE, PROMETHEE und ORESTE eine gute Darstellung der Ergebnisse mit Prävalenzgraphen auf. Des Weiteren sind ELECTRE und PROMETHEE aufgrund des höheren Informationsgehaltes der Ergebnisse vor ORESTE vorzuziehen und für die Bewertung von Schieneninfrastrukturmaßnahmen zu empfehlen.



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abstract</b> .....	<b>III</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>IV</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Symbolverzeichnis</b> .....	<b>X</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1
1.2 Problemstellung.....	1
1.3 Aufbau der Arbeit .....	2
<b>2 Grundlagen Entscheidungstheorie</b> .....	<b>3</b>
2.1 Entscheidungssituation.....	3
2.2 Präferenzen.....	4
2.3 Zielstellung .....	5
2.4 Entscheidungskriterien .....	6
2.5 Entscheidungsergebnis .....	7
<b>3 Konventionelle Bewertungsmethoden der Wirtschaftlichkeit ...</b>	<b>10</b>
3.1 Nutzen-Kosten-Analyse.....	10
3.2 Nutzwertanalyse.....	12
3.3 Kosten-Wirksamkeits-Analyse .....	14
<b>4 Bewertungsverfahren in Deutschland</b> .....	<b>16</b>
4.1 Bundesverkehrswegeplan .....	16



4.1.1	Nutzen-Kosten-Analyse im BVWP.....	17
4.1.2	Umweltrisikoeinschätzung .....	19
4.1.3	Flora-Fauna-Habitat-Verträglichkeitseinschätzung .....	21
4.1.4	Raumwirksamkeitsanalyse .....	21
4.1.5	Synthese .....	23
4.1.6	Kritische Betrachtung des BVWP .....	24
4.2	Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs .....	26
4.3	Richtlinien für integrierte Netzgestaltung .....	27
<b>5</b>	<b>Multikriterielle Verfahren .....</b>	<b>28</b>
5.1	Verfahrensübersicht .....	28
5.2	Klassische Ansätze .....	29
5.3	Outranking.....	29
5.3.1	Hasse-Diagramm-Technik .....	30
5.3.2	ELECTRE .....	31
5.3.3	PROMETHEE .....	34
5.3.4	ORESTE .....	37
5.4	Vergleich der Verfahren.....	40
<b>6</b>	<b>Beispielanwendung .....</b>	<b>43</b>
6.1	Beispiel .....	43
6.2	Anwendung .....	44
6.2.1	Hasse-Diagramm-Technik .....	45
6.2.2	ELECTRE .....	45
6.2.3	PROMETHEE .....	45
6.2.4	ORESTE .....	46
6.3	Auswertung und Interpretation.....	47
<b>7</b>	<b>Fazit.....</b>	<b>49</b>
	<b>Quellenverzeichnis.....</b>	<b>XV</b>
	<b>Erklärung zur Urheberschaft.....</b>	<b>XX</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>XXI</b>

---

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Partielle Präordnung.....	8
<b>Abbildung 2:</b> Spinnendiagramm .....	8
<b>Abbildung 3:</b> Hasse-Diagramm-Beispiel (aus Simon 2003).....	31
<b>Abbildung 4:</b> Zoneneinteilung.....	39
<b>Abbildung 5:</b> HDT-Graph.....	45
<b>Abbildung 6:</b> partielle Präordnung – ELECTRE.....	45
<b>Abbildung 7:</b> partielle Präordnung – PROMETHEE.....	46
<b>Abbildung 8:</b> Zonengraph – ORESTE .....	47
<b>Abbildung 9:</b> partielle Präordnung – ORESTE.....	47
<b>Abbildung 10:</b> Gewöhnliches Kriterium.....	XXIII
<b>Abbildung 11:</b> Quasi-Kriterium .....	XXIII
<b>Abbildung 12:</b> Kriterium mit linearen Präferenzen .....	XXIII
<b>Abbildung 13:</b> Stufenkriterium .....	XXIV
<b>Abbildung 14:</b> Kriterium mit linearer Präferenz und Indifferenzzone .....	XXIV
<b>Abbildung 15:</b> Gaußsches Kriterium.....	XXV



## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> Übersicht über Merkmale von Entscheidungssituationen.....	3
<b>Tabelle 2:</b> Zustandsmatrix .....	4
<b>Tabelle 3:</b> Übersicht der Berechnung der Nutzwerte (vgl. Hanusch 2007).....	14
<b>Tabelle 4:</b> Raumwiderstand (BMVBS 2005) .....	20
<b>Tabelle 5:</b> Strukturschwächen Wertungstabelle (BMVBS 2005) .....	22
<b>Tabelle 6:</b> Wertungstabelle Raumordnungspunkte (BMVBS 2005) .....	22
<b>Tabelle 7:</b> Übersicht der Alternativen und Kriterien (Scheier & Böhm 2012).....	44
<b>Tabelle 8:</b> Parameter für verallgemeinerte Kriterien .....	46
<b>Tabelle 9:</b> Intensität und Projekttypen im Straßen- und Schienenbau (BMVBS 2005) ...	XXI
<b>Tabelle 10:</b> Einstufung der Straßen- und Schienenprojekte nach Flächenanteilen (BMVBS 2005) .....	XXII
<b>Tabelle 11:</b> Methodenvergleich (1).....	XXVI
<b>Tabelle 12:</b> Methodenvergleich (2).....	XXVII
<b>Tabelle 13:</b> Übersicht über die Infrastrukturmaßnahmen der Varianten (Scheier & Böhm 2012) .....	XXVIII
<b>Tabelle 14:</b> Zielerfüllungsgrad – HDT.....	XXVIII
<b>Tabelle 15:</b> normierte Zustandsmatrix – ELECTRE.....	XXIX
<b>Tabelle 16:</b> normierte, gewichtete Zustandsmatrix – ELECTRE .....	XXIX
<b>Tabelle 17:</b> Konkordanzmatrix – ELECTRE .....	XXIX
<b>Tabelle 18:</b> Diskordanzmatrix – ELECTRE.....	XXX
<b>Tabelle 19:</b> Konkordanz-Dominanz-Matrix – ELECTRE .....	XXX
<b>Tabelle 20:</b> Diskordanz-Dominanz-Matrix – ELECTRE .....	XXX
<b>Tabelle 21:</b> Aggregierte Dominanz-Matrix – ELECTRE .....	XXXI
<b>Tabelle 22:</b> Quasi-Kriterium 1 – PROMETHEE .....	XXXI





---

<b>Tabelle 23:</b> Lineares Kriterium – PROMETHEE .....	XXXI
<b>Tabelle 24:</b> Gaußsche Kriterium – PROMETHEE .....	XXXII
<b>Tabelle 25:</b> Quasi-Kriterium 2 – PROMETHEE .....	XXXII
<b>Tabelle 26:</b> Präferenzindex – PROMETHEE .....	XXXII
<b>Tabelle 27:</b> Flusstabelle – PROMETHEE .....	XXXII
<b>Tabelle 28:</b> Ausgangsfluss – PROMETHEE .....	XXXIII
<b>Tabelle 29:</b> Eingangsfluss – PROMETHEE .....	XXXIII
<b>Tabelle 30:</b> Präordnung – PROMETHEE .....	XXXIII
<b>Tabelle 31:</b> Mittelränge – normierte Zustandsmatrix – ORESTE .....	XXXIII
<b>Tabelle 32:</b> Gewichtete Mittelränge – ORESTE .....	XXXIV
<b>Tabelle 33:</b> Doppelränge – ORESTE .....	XXXIV
<b>Tabelle 34:</b> Präferenzordnung – ORESTE .....	XXXIV
<b>Tabelle 35:</b> Prävalenzgrade – ORESTE .....	XXXV
<b>Tabelle 36:</b> Normierte Prävalenzgrade – ORESTE .....	XXXV
<b>Tabelle 37:</b> Partielle Präordnung – ORESTE .....	XXXV

## Symbolverzeichnis

Symbol	Index	Beschreibung
A		Alternativenmenge
$a_i$	$i = 1, \dots, m$	Alternative
B		Gewichtete Mittelränge
$b_{ij}$	$i = 1, \dots, m$ $j = 1, \dots, n$	Gewichtete Wertfunktion, $b_{ij} = b_j(a_i)$
C		Konkordanzmatrix $C(c_{kl})$
$C_{kl}$	$k, l \in m$	Konkordanzmenge, Menge, in der die k-te der l-ten Alternative vorgezogen wird
$c_{kl}$	$k, l \in m$	Konkordanzindex, die gewichtete relative Häufigkeit der Dominanz der k-ten über die l-te Alternative
$c'$		Konkordanz-Schwelle
$C^*$		Indifferenzonenparameter
D		Diskordanzmatrix $D(d_{kl})$
$D_{kl}$	$k, l \in m$	Diskordanzmenge, Menge in der die l-te Alternative der k-ten Alternative vorgezogen wird (Komplementärmenge zu $C_{kl}$ )
$d_{kl}$	$k, l \in m$	Diskordanzindex, der Anteil der Maxima der Differenzen von der Diskordanzmenge im Verhältnis zu der Gesamtmenge der Paarvergleiche der k-ten und l-ten Alternative
$d'$		Diskordanz-Schwelle
E		Aggregierte Dominanz-Matrix
$e_{kl}$	$k, l \in m$	Aggregierter Dominanz-Index
E1		Nutzen-Kosten-Indikator
E2		Nutzwertanalytische Indikator
F		Konkordanz-Diskordanz-Matrix
$f_{kl}$	$k, l \in m$	Konkordanz-Diskordanz-Index
G		Diskordanz-Dominanz-Matrix
$g_{kl}$	$k, l \in m$	Diskordanz-Dominanz-Index



GW		Gegenwartswert
$H; H_j(a_i)$	$i = 1, \dots, m$ $j = 1, \dots, n$	Doppelrang
$h$		Diskontierungsrate
$I$		Indifferenz
$K$		Kriterienmenge
$k_j$	$j = 1, \dots, n$	Kriterium
$M, M_t$	$t = 1, \dots, T$	Kosten pro Zeiteinheit $t$
$N, N_t$	$t = 1, \dots, T$	Nutzen pro Zeiteinheit $t$
NGW		Nettogegenwartswert
$NW_i, NW(a_i)$	$i = 1, \dots, m$	Nutzwert von Alternative $i$
$nw_{ij}$	$i = 1, \dots, m$ $j = 1, \dots, n$	Teilnutzwert der Alternative $i$ bezüglich des Kriteriums $j$
$P$		Strikte Präferenz
$P_j, P_j(a_k, a_l)$	$j = 1, \dots, n$ $k, l \in m$	Präferenzfunktion des Kriteriums $j$ , (Präferenzfunktion des Paarvergleichs der $k$ -ten und $l$ -ten Alternative bzgl. Kriterium $j$ )
PG		Prävalenzgrad
$p$		Parameter für Verallgemeinerte Kriterien
$Q$		Schwache Präferenz
$q$		Parameter für Verallgemeinerte Kriterien
$R$		Normierte Zustandsmatrix
$r_{ij}$	$i = 1, \dots, m$ $j = 1, \dots, n$	Normierter Zustand der Alternative $i$ bezüglich des Kriteriums $j$ , auch $r_j(a_i)$
$S$		Relation
$s$		Interner Zinssatz
$T$		Betrachtungszeitraum
$t$	$t=0, \dots, T$	Zeiteinheit

U		Unvergleichbarkeit
u		Differenz der Zustände der Alternativen im Paarvergleich bezüglich eines Kriteriums j ( $u = z_{kj} - z_{ij}$ )
V		Normierte und gewichtete Zustandsmatrix/Zielerfüllungsgrad
$v_{ij}$	$i = 1, \dots, m$ $j = 1, \dots, n$	Zielerfüllungsgrad der Alternative i bezüglich des Kriteriums j
W		Gewichtungsmatrix
$w_j$	$j = 1, \dots, n$	Gewichte des Kriteriums j
$z_{ij}$	$i = 1, \dots, m$ $j = 1, \dots, n$	Zustand von Alternative i bezüglich des Kriteriums j $z_{ij} = z(a_i, k_j)$
Z		Zustandsmatrix
$\beta$		Indifferenzzonenparameter
$\gamma$		Präferenzzonenparameter
$\pi; \pi(a_k, a_l)$	$k, l \in m$	Präferenzindex
$\sigma$		Parameter für Verallgemeinerte Kriterien
$\Phi$		Präferenzfunktional
$\varphi^+; \varphi^+(a_i)$	$i = 1, \dots, m$	Ausgangsfluss von Alternative i
$\varphi^-; \varphi^-(a_i)$	$i = 1, \dots, m$	Eingangsfluss von Alternative i
$\varphi; \varphi(a_i)$	$i = 1, \dots, m$	Nettofluss ( $\varphi^+(a_i) - \varphi^-(a_i)$ )
$\Psi, \Psi(a_i)$	$i = 1, \dots, m$	Präferenzordnung



---

## Abkürzungsverzeichnis

AHP	Analytic Hierarchy Process
BAB	Bundesautobahn
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BVWP	Bundesverkehrswegeplan
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
ELECTRE	Elimination et Choice Translation Reality
ESTW	Elektronisches Stellwerk
ET	Entscheidungsträger
EWS	Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Straßen
FFH-VE	Flora-Fauna-Habitat-Verträglichkeitseinschätzung
FFH-VP	Flora-Fauna-Habitat-Verträglichkeitsprüfung
GSM-R	Global System for Mobile Communications – Rail(way)
GW	Gegenwartswert
HDT	Hasse-Diagramm-Technik
KWA	Kosten-Wirksamkeits-Analyse
LCC	Life Cycle Costs (Lebenszykluskosten)
MADM	Multi Attribute Decision Making
MAUT	Multi-Attribute Utility Theory
MCDM	Multi Criteria Decision Making
MODM	Multi Objective Making
NGW	Nettogegenwartswert
NKA	Nutzen-Kosten-Analyse
NKV	Nutzen-Kosten-Verhältnis
NWA	Nutzwertanalyse
Pkw-E	Personenkraftwagen-Einheiten
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enrichment



	Evaluations
RBE	Betriebsstelle Bad Bering
RG	Betriebsstelle Gottmadingen
RIN	Richtlinie für integrierte Netzgestaltung
RNK	Betriebsstelle Neunkirch
RO-Punkte	Raumordnungs-Punkte
RWA	Raumwirksamkeitsanalyse
RWIN	Betriebsstelle Wilchingen-Hallau
SAQ	Stufen der Angebotsqualität
SB	Standardisierte Bewertung von Verkehrsweegeinvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs
Sbk	Selbstblock
Scf	Schaffhausen
Si	Singen
URE	Umweltrisikoeinschätzung
UVS	Umweltverträglichkeitsstudie
VB	Vordringlicher Bedarf
WB	Weiterer Bedarf



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Im Rahmen eines Projektes vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik wird diese Bachelorarbeit als Grundlage für dessen Forschung verfasst. Das Projekt „Next Generation Railway System 2“ thematisiert die Bereitstellung und den Betrieb von Schienenverkehrsinfrastruktur. In diesem interdisziplinären Forschungsfeld beschäftigt sich das Teilprojekt „Optimised Operation“ mit einer integrierten Bewertungsmethodik von Maßnahmen für einen optimierten Betrieb.

Ziel des Projektes ist es, ein softwaregestütztes Bewertungsinstrument zu entwickeln, das neben dem wirtschaftlichen auch den gesellschaftlichen Nutzen von Infrastrukturmaßnahmen im Schienenverkehr über den vollständigen Lebenszyklus abbildet. Das Verfahren soll weniger kostenfokussiert sein, dafür umso eher eine Entscheidungsgrundlage bilden, die Ursachen und Wirkungen integriert in deren Wirkungsumfeld betrachtet. Dabei werden zunächst die Zusammenhänge der Bewertungskriterien identifiziert und bestehende Methoden analysiert. Im weiteren Verlauf soll ein Modell entwickelt werden, das eine systematische und nachvollziehbare Evaluation des Life Cycle Benefit unter Einbeziehung der Bewertungskriterien darstellt. Letztendlich wird das Bewertungsinstrument in einer Software implementiert. Die Analyse der bestehenden Beurteilungsmodelle ist Thema dieser Arbeit.

## 1.2 Problemstellung

Investitionsentscheidungen, die den Schienenverkehr betreffen, sind komplex und tangieren verschiedene Interessengemeinschaften, zum Beispiel die Betreiber, die Gesellschaft (Nutzer und Nicht-Nutzer) sowie weitere Träger öffentlicher Belange. Auswirkungen auf die Volkswirtschaft, den Modal Split (Verkehrsmittelaufteilung), die Gesellschaft und Umwelt sind ebenfalls nicht auszuschließen. Um eine für die Öffentlichkeit nachvollziehbare Entscheidungsgrundlage zu schaffen, müssen diverse Kriterien einbezogen und in einem Verfahren integriert betrachtet werden. Dabei ist es unumgänglich diese in gewisser Weise, trotz unterschiedlicher Skalenniveaus, zu aggregieren. Offensichtlich ist, dass sich in der Synthese von ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Interessen Gefahren bergen, beispielsweise der



Detailverlust von Informationen. Qualitative sollen mit quantitativen Kriterien zusammen betrachtet werden, genauso wie monetär bewertbare mit nicht-monetär einschätzbaren Aspekten. Es bietet sich an, Indifferenzen und Unvergleichbarkeiten zu berücksichtigen, da nicht jede Alternative mit allen anderen vergleichbar ist.

Ziel dieser Arbeit soll es sein, verschiedene multikriterielle Verfahren zu analysieren und zu vergleichen. Dabei sollen die Kriterien an sich keine nähere Betrachtung finden, sondern nur als Inputdaten für die Modelle angesehen werden.

### **1.3 Aufbau der Arbeit**

Um multikriterielle Verfahren analysieren zu können, werden in der vorliegenden Arbeit zunächst Grundlagen der Entscheidungstheorie in *Kapitel 2* erläutert, auf die die folgenden Verfahren aufbauen. Daraufhin werden in *Kapitel 3* konventionelle Bewertungsmethoden beschrieben, die in der Praxis vielseitige Anwendung finden, aber auch Grenzen in ihrer Handhabung aufweisen. An diese Methoden knüpfen in *Kapitel 4* die in Deutschland praktizierten gesamtwirtschaftlichen Bewertungsverfahren an, die sich auf Verkehrsinvestitionen in Straßen, Schienen, Wasserstraßen und den öffentlichen Verkehr beziehen. Bei der Betrachtung besonders interessant ist die Anwendung der Verfahren im Schienenverkehr, die sich speziell in der Bundesverkehrswegeplanung (BVWP) niederschlagen. Die Methodik des BVWP und die im darauffolgenden *Kapitel 5* beschriebenen multikriteriellen Entscheidungsmethoden sollen Themenschwerpunkt dieser Arbeit sein. Letztere werden analysiert, miteinander verglichen und auf deren Eignung für die Bewertung des Schienenverkehrs geprüft. An vier geeigneten Verfahren wird ein konkretes Anwendungsbeispiel in *Kapitel 6* angewendet und die Ergebnisse werden interpretiert. Abschließend werden die Erkenntnisse in *Kapitel 7* der Arbeit zusammengefasst und eine Empfehlung für Methoden für das Projekt des DLR ausgesprochen.





## 2 Grundlagen Entscheidungstheorie

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Entscheidungstheorie thematisiert. Diese sind bedeutsam, da Hintergründe, Voraussetzungen und Notationen der darauffolgenden Modelle erläutert werden. Bei einer Entscheidung sind die Situation, die Art der Präferenz, das Zielsystem bzw. die Problemstellung, die Entscheidungskriterien und schließlich die Darstellung des Ergebnisses von Bedeutung (vgl. Zangemeister 1971). Diese Themen werden im Folgenden betrachtet.

### 2.1 Entscheidungssituation

Wenn eine Person oder eine Gruppe von Personen „aus mehreren Handlungsmöglichkeiten zur Veränderung eines gegenwärtigen Zustandes oder einer absehbaren Entwicklung wählen kann oder muss“ (Lillich 1992:9), so ist ein Entscheidungsproblem gegeben. Die dabei handelnde Person wird dabei Entscheidungsträger (ET) genannt. Im Folgenden wird ET in der Einzahl benutzt. Im Schienenverkehr sind einerseits die Eisenbahninfrastrukturbetreiber und andererseits das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) die ET (vgl. Klumpp, Kowalski & Bielesch 2009).

Bei den Entscheidungen handelt es sich um öffentliche Vorhaben mit hohem finanziellem Aufwand. Deshalb sollte der Einsatz der Mittel möglichst zielerfüllend erfolgen. Die Entscheidungssituation muss demzufolge im Vorhinein analysiert werden. Dafür ist eine Übersicht der Merkmale von Entscheidungen aus Götze (2008) und Zangemeister (1971) in *Tabelle 1* zusammengestellt:

Kriterium	Ausprägungen			
(Un)sicherheit	Sicherheit		Unsicherheit	
			Ungewissheit	Risiko
Entscheidungsträger	eine Person		mehrere Personen	
Alternativen	diskreter Lösungsraum			stetiger Lösungsraum
	absolute	relative Vorteilhaftigkeit		
Ziele	eindimensional		multidimensional	
Maßskalen	nominal	ordinal		kardinal
Zeit	statisch		dynamisch	

**Tabelle 1:** Übersicht über Merkmale von Entscheidungssituationen



Es muss u. a. unterschieden werden, wer an der Entscheidung beteiligt ist, ob ein ein- oder multidimensionales Zielsystem vorhanden ist und ob es einen oder mehrere Umweltzustände gibt. Ein Zielsystem ist dabei die Ergebnisform des Modells. Außerdem ist bei der Präferenzstruktur entscheidend, ob alle Ziele dieselbe Bedeutung haben, ob es unterschiedliche Gewichte gibt und ob die Entscheidung unter Unsicherheit stattfindet. Dabei wird angenommen, dass es keine Wechselwirkungen zwischen dem ET und anderen Individuen gibt. Sein Verhalten wird als rational angenommen, wenn seine Entscheidungen durch deterministische oder stochastische Präferenzen induziert werden. (vgl. Winkler 1994)

Die Entscheidungsprobleme sind wie folgt darzustellen (vgl. Götze 2008/ Schneeweiß 1991): Es werden im stetigen Lösungsraum  $a_i$  ( $i=1, \dots, m$ ) Alternativen aus einer Alternativenmenge  $A$  betrachtet. Ebenso sind Kriterien  $k_j$  ( $j=1, \dots, n$ ) aus einer Kriterienmenge  $K$  zu eruieren, anhand derer die Alternativen charakterisiert und bewertet werden können. In der Zustandsmatrix  $Z$  erhalten die Alternativen mittels einer Wertfunktion die Zuordnung bezüglich der Kriterien. Die Wertfunktion lässt sich wie folgt darstellen  $z_{ij} = z(a_i, k_j)$ , in *Tabelle 2* ist die Zustandsmatrix frei nach Götze (2008) dargestellt.

Z	$k_1$	...	$k_j$	...	$k_n$
$a_1$	$z(a_1, k_1)$	...	$z(a_1, k_j)$	...	$z(a_1, k_n)$
...	...	...	...	...	...
$a_i$	$z(a_i, k_1)$	...	$z(a_i, k_j)$	...	$z(a_i, k_n)$
...	...	...	...	...	...
$a_m$	$z(a_m, k_1)$	...	$z(a_m, k_j)$	...	$z(a_m, k_n)$

**Tabelle 2:** Zustandsmatrix

Im Entscheidungsmodell wird die Zustandsmatrix aufgrund der Alternativen und Kriterien aufgestellt. Der ET kann die Werte mit seinen Präferenzen normieren und die Bedeutung der Kriterien durch die Gewichte  $w_j$  ( $j=1, \dots, n$ ), bzw. Matrix  $W$  der Gewichte  $w_j$ , darstellen. (vgl. Schneeweiß 1991)

## 2.2 Präferenzen

Neben den in der Arbeit betrachteten deterministischen Präferenzen gibt es auch stochastische Präferenzen. Letztere werden durch Zufallsgrößen beeinflusst, während deterministische Präferenzen durch den ET bestimmt sind. (vgl. Winkler 1994)



Ordnet der ET ein Paar von Alternativen  $(a_1, a_2)$  aus  $A$ , so kann er entweder eine Relation aufstellen oder eine Unvergleichbarkeit identifizieren. Für eine Relation wird die Notation „ $a_1 Sa_2$ “ verwendet, während die Unvergleichbarkeit in „ $a_1 Ua_2$ “ Ausdruck findet.  $a_1 Sa_2$  beinhaltet die strenge Ordnung  $a_1 Pa_2$  („ $a$  ist besser als  $a_2$ “), die schwache Ordnung  $a_1 Qa_2$  („ $a$  ist mindestens so gut wie  $a_2$ “) und die Indifferenz  $a_1 / a_2$  („ $a_1$  und  $a_2$  sind gleichwertig“). (vgl. Figueira, Greco & Ehrgott 2005/ Borken 2005/ Winkler 1994) „ $a_1 Ua_2$ “ hingegen tritt auf, wenn weder  $a_1 Sa_2$  noch  $a_2 Sa_1$  gilt. Die Ordnungsrelationen können folgende Eigenschaften haben:

reflexiv	bei $a_1 Sa_1$
symmetrisch	bei $a_1 Sa_2$ gilt $a_2 Sa_1$
transitiv	bei $a_1 Sa_2$ und $a_2 Sa_3$ gilt $a_1 Sa_3$
intransitiv	bei $a_1 Sa_2$ und $a_2 Sa_3$ muss nicht $a_1 Sa_3$ gelten
vollständig	bei $a_1 Sa_2$ und/oder $a_2 Sa_1$

Dabei ist eine strenge Ordnung transitiv, irreflexiv und vollständig, während eine schwache Ordnung transitiv, reflexiv und vollständig ist (vgl. Zimmermann & Gutsche 1991).

### 2.3 Zielstellung

In einer Entscheidungssituation ist bezüglich der Zielstellung zu differenzieren. Roy (1980) beschreibt drei Zielstellungen: die Selektion, Separation und Ordnung. Bei der Selektion werden die besten Alternativen aus einer Menge potenzieller Alternativen ausgewählt. Die besten Alternativen bedeutet dabei eine möglichst kleine Zahl der zufriedenstellenden Alternativen zu eruieren. Diese Problemstellung hat die geringsten Anforderungen an die zu konstruierende Präferenzrelation. Es ist lediglich sicherzustellen, dass die optimale Alternative mit allen anderen vergleichbar ist. (vgl. Lillich 1992/ Roy 1991)

Bei der Separation werden Alternativen in Klassen eingeteilt, in denen keine Ordnung herrscht (vgl. Roy 1991). Lillich (1992) unterscheidet in zwei Verfahrensweisen aus der Sicht einer sukzessiven Erfassung. Im ersten Fall wird über die Anzahl der Klassen während der Einteilung entschieden. Zunächst werden die besten Alternativen durch relative Beurteilung in die erste Klasse eingeordnet, daraufhin die nächstbesten in die zweite usw. Im zweiten Fall wird zu Beginn die Anzahl der Klassen bestimmt und folglich die Alternativen je nach der absoluten Beurteilung der Elemente klassiert. Dabei sind die Klassen mit einer Notenbewertung vergleichbar. Voraussetzung ist,



dass ein fixierter Algorithmus zur Einteilung vorliegt und die Kriterienausprägungen bereits über eine Notenskala bewertet wurde. (vgl. Lillich 1992)

Die dritte Variante, die Ordnung, hat das Ziel die Alternativen in eine „besser-schlechter Beziehung“ zu bringen. Dafür muss der ET die Alternativen in eine schwache Ordnung bringen können, was Transitivität der Vergleichsurteile voraussetzt. Da dies bei komplexen Entscheidungssituationen nicht immer der Fall ist, wird die Ordnungsproblematik modifiziert und eine weitere Problematik, die Präordnung, herangezogen. Diese verlangt die Transitivität nicht bei der schwachen, sondern nur bei der strengen Ordnung. Ein weiterer Vorzug ist, dass Unvergleichbarkeiten und Indifferenzen berücksichtigt werden. (vgl. Schneeweiß 1991/ Lillich 1992)

## **2.4 Entscheidungskriterien**

Um eine Ordnung herstellen zu können, müssen die Alternativen zunächst anhand der Eigenschaften und Kriterien bewertet werden. Die Kriterienausprägungen unterscheidet man in nominal-, ordinal- und kardinalskalierte Merkmale. Schneeweiß (1991) und Zimmermann & Gutsche (1991) beschreiben diese wie folgt:

Die Nominalskala klassifiziert qualitative Ausprägungsdaten und wird meist in verbalen Klassen ausgedrückt. Jedem Merkmal muss ein Wert zugeordnet werden können. Rechenoperationen sind auf diesem niedrigen Skalenniveau nicht zulässig.

Eine Anordnungsrelation der Kriterienausprägungen ist die Ordinalskala. Sie erzeugt eine Rangordnung unter den Alternativen. Dabei verändert jede streng monoton wachsende Transformation die Rangordnung nicht. Qualitative Daten können somit mit Rängen versehen werden. Rangdifferenzen werden nicht betrachtet. Deshalb sind Mittelwertbildung oder Additionen der Ränge unzulässig.

Kardinalskalierte Merkmale sind Anordnungsrelationen für Differenzen von quantitativen Kriterienausprägungen. Es wird zwischen der Intervallskala, Verhältnisskala und Absolutskala unterschieden. Die Intervallskala hat keinen natürlichen Nullpunkt, aber gleiche messbare Abstände zwischen den Skaleneinheiten. Rechenoperationen wie Mittelwertbildung und Addition können durchgeführt werden. Die Quotientenbildung ist dennoch ausgeschlossen. Die Verhältnisskala hingegen besitzt einen Nullpunkt, sodass Quotienten möglich sind und Verhältnisse dargestellt werden



können. Bei Absolutskalen sind alle Rechenoperationen erlaubt und die Werte sind dimensionslos. Diese stellt das höchste Skalenniveau dar.

Die Merkmalsausprägungen  $z_{ij}$  der Zustandsmatrix  $Z$  können verschiedene Ausprägungen annehmen. Ordinale Werte stellen eine Rangfolge (Rang 1 bis  $m$ ) mit  $m$  als höchsten Rang dar, während kardinale Werte als solche bestehen bleiben können. Es werden im *Kapitel 6* u. a. binäre Kriterien betrachtet, welche nominalskaliert sind. Da bestimmte Verfahren mit ordinalen Daten arbeiten, werden die binären Werte als Dummy-Variablen in den Ausprägungen 0 und 1 mit der Zielausprägung 1 ausgedrückt. Des Weiteren werden Werte mit einem Vorzeichenwechsel in ein Maximierungsproblem umgewandelt, falls das Ziel des Kriteriums ein Minimum sein sollte. (vgl. Schneeweiß 1991/ von Auer 2005)

Von großer Bedeutung ist die Auswahl und Anzahl der zu betrachtenden Kriterien. Die Entscheidungssituation sollte so vollständig wie möglich dargestellt werden und der Realität genügen. Fragwürdig ist aber die Art der Detailgenauigkeit der Alternativen. In der „Standardisierten Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des öffentlichen Personennahverkehr“ (SB) wird ein grundsätzlicher Konflikt beschrieben, der *„zwischen dem Anspruch auf eine möglichst große Abbildungsgenauigkeit und dem Wunsch nach einer pragmatischen Handhabbarkeit“* (Intraplan Consult GmbH & Verkehrswissenschaftliches Institut Stuttgart GmbH 2006:78) besteht. Je mehr Kriterien einbezogen werden, desto größer wird der Informationsgehalt. Die Zuverlässigkeit der Bewertungsansätze und -ergebnisse nimmt allerdings ab. (vgl. Intraplan Consult GmbH & Verkehrswissenschaftliches Institut Stuttgart GmbH 2006)

## 2.5 Entscheidungsergebnis

Zunächst ist die Form der Entscheidungsgrundlage wesentlich. Diese hängt von den unterschiedlich dargestellten Präferenzen ab. Man unterscheidet nach Bewertungsfunktionen, denen eine schwache Ordnung zugrunde liegt, und Präferenzen, in denen die Alternativen nicht transitiv miteinander vergleichbar sind. Die Bewertungsfunktionen werden auch als Präferenzfunktionale  $\Phi$  bezeichnet und können eine Funktion oder auch ein Index sein. Die Präferenzfunktion ist eine deterministische und/oder stochastische Nutzenfunktion und kann aufgestellt werden, wenn Substitutionsraten angegeben werden können. Eine Substitutionsrate ist die Menge eines Kriteriums die der ET bereit wäre für ein anderes einzutauschen. Der Präferenzindex hingegen ist eine Zahl, bei der es nicht möglich ist, Substitutionsraten aufzustellen.

Die Bestimmung der Wertfunktion und der Gewichte geschieht unabhängig voneinander, wobei die Gewichtsbestimmung der Kriterien holistisch, unter ganzheitlicher Betrachtung aller Kriterien, erfolgt. (vgl. Bamberg & Coenenberg 2002/ Schneeweiß 1991)

Ergebnisse bei den Verfahren ohne Präferenzfunktional werden Prävalenzrelationen genannt. Diese lassen sich nicht transitiv anordnen. Bei den in *Kapitel 5.3* vorgestellten Outranking-Verfahren werden teilweise Prävalenzrelationen verwendet. Sie zeichnen sich durch Ordnungen aus, in denen Unvergleichbarkeiten und Indifferenzen zugelassen werden. In *Abbildung 1* ist eine partielle Präordnung (Prävalenzrelation) zu finden. Ein ausgehender Pfeil bedeutet, dass die Anvisierte dominiert, während ein eingehender Pfeil darauf hindeutet, dass die Alternative von einer anderen dominiert wird ( $a_5$  dominiert  $a_2$  und  $a_3$ , während  $a_4$  nur von  $a_1$  dominiert wird). Kanten ohne Pfeilrichtung weisen auf Indifferenz hin ( $a_2$  und  $a_3$ ). Die Alternative, die die meisten ausgehenden Pfeile (Ausgangsfluss) und die wenigsten ankommenden Pfeile (Eingangsfluss) aufweist, ist die vorteilhafteste (in diesem Fall  $a_1$ ). Außerdem ist in *Abbildung 2* ein Spinnendiagramm aus Zangemeister (1971) abgebildet, welches die Vor- und Nachteile einer Alternative möglicherweise offensichtlicher darstellt. (vgl. Schneeweiß 1991)

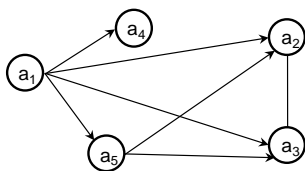


Abbildung 1: Partielle Präordnung

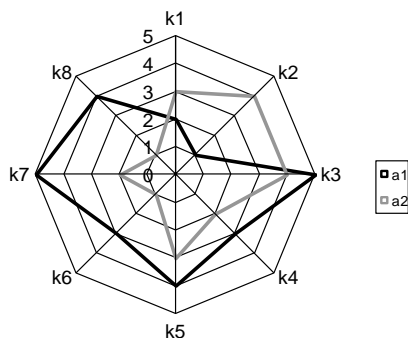


Abbildung 2: Spinnendiagramm

Da die Ergebnisse eines Entscheidungsproblems meist auf unsicheren Präferenzen und Annahmen beruhen, ist es vorteilhaft, diese zu überprüfen. Dafür wird die Sensitivität der Werte betrachtet, welche „die Auswirkung der Veränderung einer



*Einganggröße auf das Ergebnis*“ (Hoffmeister 2000:189) misst. Verändert sich das Ergebnis nur geringfügig, so ist der Einfluss der Einganggröße unkritisch. In diesem Fall kann auf eine detailliertere Betrachtung bei der Datenermittlung verzichtet werden. Interessant ist außerdem, inwieweit die Parameter abweichen können, ohne dass das Ergebnis einen bestimmten Wert unter- bzw. überschreitet. Für die Variation der Eingangsdaten sind computergestützte Verfahren vorteilhaft. Es gibt allerdings kein einheitliches Verfahren, da die Vorgehensweise von der Problemstellung abhängt. Konkrete Verfahren werden in dieser Arbeit nicht betrachtet. (vgl. Schmuck & Oefner 1979/ Weiss 1975)



### 3 Konventionelle Bewertungsmethoden der Wirtschaftlichkeit

Da die Planung einer Investitionsmaßnahme gerechtfertigt sein sollte, wurden Verfahren entwickelt, um die Auswirkungen eines Infrastrukturprojektes zu bewerten und zu vergleichen. In diesem Abschnitt werden konventionelle Methoden für Wirtschaftlichkeitsberechnungen vorgestellt. Diese sind Grundlage für die in *Kapitel 4* beschriebenen Modelle. Da die Verfahren die Wirksamkeiten auf ein eindimensionales Maß reduzieren, sind sie Anregung für weitere Entwicklungen. Im Folgenden werden die Nutzen-Kosten-Analyse, Nutzwertanalyse und Kosten-Wirksamkeitsanalyse erläutert.

#### 3.1 Nutzen-Kosten-Analyse

Die Nutzen-Kosten-Analyse (NKA), im englischen Sprachraum Cost-Benefit-Analysis genannt, stellt den Nutzen eines Investitionsprojektes den anfallenden Kosten gegenüber. (Hanusch 2007:3) beschreibt deren Sinn „*darin, geplante Vorhaben, die auf eine bessere Versorgung der Bevölkerung mit öffentlichen Gütern abzielen, aber auch jede andere öffentliche Maßnahme, unter ökonomischen Gesichtspunkten zu durchleuchten*“. Mit Hilfe der NKA wird dem Staatssektor ein Instrument für ökonomisch rationale Entscheidungen zur Verfügung gestellt. (vgl. Hanusch 2007)

Zu Beginn des Verfahrens werden potentielle Projekte charakterisiert und deren Wirkungsbereiche bestimmt. Daraufhin werden Bewertungskriterien ermittelt, die Wirkungen bewertet und monetarisiert. Für eine einheitliche Betrachtung werden die Geltungsbereiche der Nutzen und Kosten räumlich und zeitlich abgegrenzt und homogenisiert. Das Verfahren beruht auf einem Mit-und-Ohne-Prinzip. Dies bedeutet, dass alternative Entwicklungen mit und ohne Realisierung des Investitionsprojektes verglichen werden. Des Weiteren wird ein Entscheidungskriterium ausgewählt und berechnet, sodass eine Reihenfolge der Alternativen aufgestellt werden kann. Letztendlich werden die Ergebnisse mittels einer Sensitivitätsanalyse überprüft. (vgl. Scheiner 2003)

Um die Nutzen und Kosten in einem gemeinsamen Zeitraum betrachten zu können, werden diese auf den Zeitpunkt des Projektbeginns diskontiert. So kann der Gegenwartswert (GW) der Kosten  $M$  mit *Formel (3.1)* berechnet werden. Setzt man



statt der Kosten die Nutzen  $N$  ein, erhält man den  $GW$  der Nutzen. (vgl. Hanusch 2007)

$$GW(M) = \sum_{t=0}^T \frac{M_t}{(1+h)^t} \quad (3.1)$$

Dabei ist  $h$  die Diskontierungsrate, die als positiv angenommen wird und  $t$  eine Zeiteinheit (mit  $t = 0, \dots, T$ ). Der Nettogegenwartswert ( $NGW$ ) ist die Differenz der  $GW$  der Nutzen und Kosten (vgl. Mühlenkamp 1994):

$$NGW = \sum_{t=0}^T \frac{N_t}{(1+h)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{M_t}{(1+h)^t} \quad (3.2)$$

Mit der Höhe von  $h$  schwankt auch der  $NGW$  einer Alternative, deshalb ist die Wahl von  $h$  von besonders großer Bedeutung für die Projektevaluierung.

Als Entscheidungskriterium der NKA können der  $NGW$ , das Nutzen-Kosten-Verhältnis ( $NKV$ ) oder der interne Zinsfuß herangezogen werden. Diese Kriterien reduzieren die relevanten Aspekte auf ein eindimensionales Maß zum Vergleich der Alternativen. (vgl. Hanusch 2007) Im Folgenden werden die Verfahren kurz nach Mühlenkamp (1994) erläutert.

Der Nettogegenwartswert *Formel (3.2)* resultiert unmittelbar aus dem theoretischen Konzept der NKA und wird auch als Entscheidungskriterium genutzt. Dieser stellt den absoluten Vorteilsüberschuss eines Projektes abgezinst mit  $h$  dar.

Das  $NKV$  berechnet sich mit *Formel (3.3)* und ist nur anzuwenden, wenn Nutzen und Kosten direkt voneinander trennbar sind. Es reagiert sensibel auf unterschiedliche Klassierungen und durch die Kompensation der Werte vermindert sich die Aussagekraft. Bei großen Projekten sollte der  $NGW$  vorgezogen werden.

$$NKV = \frac{GW(N)}{GW(M)} \quad (3.3)$$

Zuletzt wird der interne Zinsfuß betrachtet. Dieser ist der Abzinsungsfaktor, der dazu führt, dass  $GW(N)$  gleich dem  $GW(M)$  ist:

$$\sum_{t=0}^T \frac{N_t}{(1+s)^t} = \sum_{t=0}^T \frac{M_t}{(1+s)^t} \quad (3.4)$$



Zu interpretieren ist der interne Zinssatz  $s$  mit der Effektivverzinsung der Ressourcen. Es ist anzumerken, dass aus dem Zinsfuß  $n$ -ten Grades mehrere Zinsfüße resultieren können. Deshalb ist der interne Zinsfuß als Entscheidungskriterium nur anwendbar, wenn dieser positiv ist und es nur eine Schnittstelle zwischen Nutzen- und Kostenströmen gibt. (vgl. Hanusch 2007)

Die Entscheidungskriterien können für folgende Problemstellungen herangezogen werden: Wenn nur ein einzelnes Projekt durchgeführt werden soll, wird eine Alternative empfohlen, die entweder einen  $NGW > 0$  hat, oder das  $NKV > 1$  ist und, falls sich nur ein interner Zinssatz ergibt,  $s > h$  gilt. Sollten  $NGW < 0$  oder  $NKV < 1$  gelten, ist das Projekt zu unterlassen, während bei  $NKV = 1$  oder  $NGW = 0$  das Ergebnis mit der Ausgangslage als gleichwertig anzusehen ist. Falls nur ein begrenztes Budget vorhanden und eine Rangfolge der Alternativen zu erstellen ist, werden die Projekte mit positiven  $NGW$  und  $NKV > 1$  nach dem Grad gesellschaftlicher Erwünschtheit geordnet. Projekte können realisiert werden, solange Budget verfügbar ist. Außerdem muss abgewogen werden, ob Projekte zu modifizieren sind oder eine Kombination von Vorteil wäre. Dies kann zu einem besseren Ergebnis führen. (vgl. Hanusch 2007/ Mühlenkamp 1994)

Möglich ist die Problemstellung, dass sich Projekte gegenseitig ausschließen. Dabei muss das  $NKV$  vernachlässigt werden, da es dem  $NGW$  widerspricht und letzterer nach Hanusch (2007) eine größere Aussagekraft hat. Auch der interne Zinssatz weist in diesem Fall Schwächen auf, wenn die Projekte unterschiedliche Aufwände umfassen. Allerdings kann das  $NKV$  bei Paarvergleichen von Alternativen betrachtet werden. (vgl. Hanusch 2007)

### 3.2 Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse (NWA) ist ein Verfahren der Entscheidungstheorie, das durch seine einfache Handhabbarkeit breite Anwendung als Bewertungs- und Auswahlverfahren im Verkehrswesen, Gesundheitsbereich und allgemeinen planerischen Prozessen findet. Es wird unter den Annahmen genutzt, dass Sicherheit über die Daten herrscht und es nur einen Entscheidungsträger gibt. Das Verfahren wurde von Zangemeister (1971) und Bechmann (1978) Mitte der 70er entwickelt und wird auch als Scoring, oder Punktwertverfahren bezeichnet. Im Englischen ist der Begriff „cost-utility-analysis“ gängig. Zangemeister definiert sie als „Analyse einer Menge komplexer Handlungsalternativen mit dem Zweck, die Elemente dieser Menge entsprechend den



Präferenzen des Entscheidungsträgers bezüglich eines multidimensionalen Zielsystems zu ordnen“ (Zangemeister 1971:45). Als Ergebnis werden die Nutzwerte jeder Alternative berechnet, welche im Gegensatz zu der NKA dimensionslose Ordnungsindeze bezeichnen. Zu veranschaulichen sind sie verbal oder als Zahl und stellen eine ganzheitliche Bewertung sämtlicher Zielerträge einer Alternative dar. (vgl. Zangemeister 1971/ Lillich 1992)

Als Voraussetzung zur Anwendung müssen sich die Wertvorstellungen des ET mittels eines additiven Präferenzindex modellieren lassen. Zudem müssen die Wirkungen und Kriteriengewichte unabhängig voneinander bestimmenbar sein. (vgl. Lillich 1992) Die Kostenseite wird nicht explizit, sondern nur durch negative Nutzwerte berücksichtigt. (vgl. Hanusch 2007)

Der Ablauf der NWA gliedert sich in drei Schritte, die Bestimmung der Höhenpräferenz, der Artenpräferenz und der Wertaggregation (vgl. Schneeweiß 1991). Zunächst werden die situationsrelevanten Zielkriterien  $k_j$  ( $j=1, \dots, n$ ) und potenzielle Alternativen  $a_i$  ( $i=1, \dots, m$ ) bestimmt. Daraufhin werden geeignete Wirksamkeitsmaße oder die positiven und negativen Outputwirkungen der Alternativen bezüglich der Kriterien ermittelt und in der Zustandsmatrix  $Z$  dargestellt. Um die Höhenpräferenz bestimmen zu können, werden die Zustände  $z_{ij}$  normiert und in die Zielerfüllungsgrade  $v_{ij}$  umgeformt. Dies geschieht anhand eines Bewertungsschlüssels, der im Vorfeld definiert werden muss. Dabei wird für die unterschiedlich skalierten Zielerträge eine gemeinsame Skala implementiert. Es bieten sich Punktskalen an, welche sich durch vergleichbare, dimensionslose Zahlen auszeichnen. So ist es möglich Punkte von 1 bis 5 zu vergeben, 1 bis 10 oder 1 bis 100. Die Werte werden somit, falls dies nicht ohnehin der Fall ist, auf einer Ordinalskala dargestellt, wobei ein Intervall von  $[0,100]$  auch quasikardinal genannt werden kann. Dies hat den Vorteil, dass weniger Informationen verloren gehen. (vgl. Hanusch 2007)

Im folgenden Schritt wird die Artenpräferenz ermittelt. Das bedeutet, dass den Zielkriterien Gewichte  $w_j$  ( $j=1, \dots, n$ ) verliehen werden, deren Summe 1 ergibt. Abschließend wird der Präferenzindex  $NW(a_i)$ , auch Nutzwert genannt, berechnet, indem die Produkte der Höhen- und Artenpräferenzen nach *Formel (3.5)* summiert werden. Anhand dieses Nutzwertes können Alternativen verglichen, in eine Rangfolge gebracht und Empfehlungen zur Umsetzung eines Projektes ausgesprochen werden.

$$NW(a_i) = \sum_{j=1}^n w_j v_{ij} \quad (3.5)$$

Zielkriterien	Gewichte	Projektalternativen					
		a <sub>i</sub>					
		a <sub>1</sub>			a <sub>2</sub>		
		Zustand	Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert	Zustand	Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert
k <sub>j</sub>	w <sub>j</sub>	Z <sub>1j</sub>	V <sub>1j</sub>	nw <sub>1j</sub>	Z <sub>2j</sub>	V <sub>2j</sub>	nw <sub>2j</sub>
k <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	Z <sub>11</sub>	V <sub>11</sub>	nw <sub>11</sub> =g <sub>1</sub> *V <sub>11</sub>	Z <sub>21</sub>	V <sub>21</sub>	nw <sub>21</sub> =g <sub>1</sub> *V <sub>21</sub>
k <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	Z <sub>12</sub>	V <sub>12</sub>	nw <sub>12</sub> =g <sub>2</sub> *V <sub>12</sub>	Z <sub>22</sub>	V <sub>22</sub>	nw <sub>22</sub> =g <sub>2</sub> *V <sub>22</sub>
k <sub>3</sub>	w <sub>3</sub>	Z <sub>13</sub>	V <sub>13</sub>	nw <sub>13</sub> =g <sub>3</sub> *V <sub>13</sub>	Z <sub>23</sub>	V <sub>23</sub>	nw <sub>23</sub> =g <sub>3</sub> *V <sub>23</sub>
Summe der Gewichte	1	Nutzwert von a <sub>1</sub>		NW <sub>1</sub>	Nutzwert von a <sub>2</sub>		NW <sub>2</sub>
		Nutzwert von a <sub>i</sub>				NW <sub>i</sub>	

**Tabelle 3:** Übersicht der Berechnung der Nutzwerte (vgl. Hanusch 2007)

Das Verfahren kann qualitative und quantitative Kriterien zusammenführen, indem es die Werte auf eine dimensionslose Skala transformiert. Dabei werden im Gegensatz zur NKA weder Kosten betrachtet noch Wirkungen monetarisiert. Stattdessen werden Nutzwerte betrachtet, wobei die Kosten als negativer Nutzen definiert sind. Von Vorteil ist, dass die Vorgehensweise einfach und transparent ist. Die einzelnen Schritte sind nachvollziehbar und überprüfbar. Allerdings wird die Vernachlässigung der Kostenseite auch als Nachteil angerechnet. Außerdem werden die Wirkungen weder zeitlich homogenisiert noch ganzheitlich betrachtet, weil negative Effekte, die die Ziele nicht berühren, ausgeblendet werden. Eine weitere Schwäche ist die Kompensation der guten durch schlechte Auswirkungen, was zu Informationsverlust führt. Des Weiteren ist die nutzentheoretische Einbettung nicht statthaft, da die Gewichte nicht über Tauschraten, sondern durch den ET bestimmt werden. (vgl. Lillich 1992/ Scheiner 2003/ Hanusch 2007)

### 3.3 Kosten-Wirksamkeits-Analyse

Die Kosten-Wirksamkeits-Analyse (KWA) verbindet die NKA mit der NWA und stellt die Kosten, die ein Investitionsprojekt verursacht, in der Kostenanalyse den nicht-monetären Wirkungen in der Wirksamkeitsanalyse gegenüber. Im Englischen wird der Begriff „cost-effectiveness-analysis“ verwendet. Das Ziel ist es, das vorteilhafteste Vorhaben in einer Menge möglicher Projekte zu identifizieren (vgl. Hoffmeister 2000). Dabei gehen qualitative und quantitative Daten ein. Scheiner (2003) und Hanusch



(2007) unterscheiden die Auswertung der KWA in zwei Varianten, die Quotienten-Variante und die Matrizen-Variante. Bei der Quotienten-Variante werden die Wirkungen zu einem Nutzwert zusammengefasst, ähnlich wie bei der NWA. Dieser Nutzwert wird den Kosten als Quotient gegenübergestellt, sodass ein Verhältnis entsteht, nach dem die Alternativen in einer Rangfolge dargestellt werden können. (vgl. Rinza & Schmitz 1992) Diese Variante bietet auch die Möglichkeit der graphischen Darstellung, indem die Kosten auf der Abszisse und die Nutzwerte auf der Ordinate abgebildet werden. Die Matrizen-Variante hingegen stellt die Kosten und Wirksamkeiten in einer Matrix dar. Mit Paarvergleichen können dominierende Alternativen eruiert werden. Sollten diese nicht vorliegen, müssen weitere Verfahren für eine Rangfolge folgen. Ordnungen werden mit der KWA nicht erzeugt. (vgl. Hanusch 2007)

Die Methode verbindet die monetarisierende Betrachtung der NKA mit der reinen qualitativen Betrachtung der Werte der NWA, was den Vorteil bringt, dass sowohl kardinalskalierte, als auch ordinalskalierte Werte abgebildet werden. Allerdings stellt sich die Synthese als problematisch und wertabhängig dar. Im Fall, dass es tatsächlich dominierende Alternativen gibt, können diese durch die Betrachtung der Entscheidungsmatrix identifiziert werden. Sollte sich keine eindeutige Präferenz bilden, müssen weitere Verfahren folgen. Wählt man die Quotientenvariante, werden die beiden Komponenten Kosten und Nutzwert wiederum mit Informationsverlust auf einen Wert reduziert. (vgl. Hanusch 2007/ Rinza & Schmitz 1992)

## 4 Bewertungungsverfahren in Deutschland

In Deutschland werden drei gesamtwirtschaftliche Bewertungsverfahren praktiziert, der BVWP, SB und die Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Straßen (EWS). Auf den Schienenverkehr bezieht sich nur der BVWP, weshalb dieser hauptsächlich betrachtet wird. Diese Verfahren haben das Ziel, eine Entscheidungsgrundlage für die Auswahl von Infrastrukturmaßnahmen aufgrund einer integrierten Bewertung zu bilden. Deshalb werden die Vorgehensweisen dargestellt und auf die Eignung von Synthese der qualitativen und quantitativen Wirkungen geprüft. Die EWS wird dabei nicht näher erläutert, da diese ausschließlich auf einem NKV beruht. Allerdings werden die Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN) vorgestellt, welche Bewertungen vornehmen.

### 4.1 Bundesverkehrswegeplan

Der BVWP ist ein Investitionsrahmenplan, der von der Bundesregierung aufgestellt und durch das Bundeskabinett beschlossen wird. Mit der gesamtwirtschaftlichen Bewertungsmethodik des BVWP wird eine Dringlichkeitsreihung von Projektalternativen vorgenommen. Diese bildet eine Entscheidungsgrundlage für den ET. Im Folgenden wird besonders auf Projekte im Schienenverkehr eingegangen. (vgl. BMVBS 2003)

Die Gültigkeit eines BVWP beträgt in der Regel knapp zehn Jahre, wobei sich der Bezugsraum auf 15 Jahre ausdehnt (vgl. BMVBS 2003). Der zurzeit gültige BVWP stammt aus dem Jahr 2003. Dieser ist der fünfte BVWP, der bislang in Deutschland aufgestellt wurde. Planmäßig wird der nächste BVWP im Jahr 2015 aufgestellt. Die Methodik wurde im Laufe der Jahre der BVWP-Generationen fortgeschrieben und dem Stand der Forschung angepasst. An die Bewertungsmethodik des BVWP 2015 stehen hohe Anforderungen, da der BVWP 2003 vielseitig kritisiert worden ist (vgl. *Kapitel 4.1.6*).

Die Planung von potenziellen Infrastrukturprojekten findet verkehrsträgerübergreifend für ein Gesamtverkehrskonzept statt und betrifft Straßen, Schienen und Wasserstraßen. Sowohl Wechselwirkungen als auch Interdependenzen der Verkehrsträger werden einbezogen. Da der BVWP ein Investitionsrahmenplan ist, werden keine Aussagen über den tatsächlichen Zeitpunkt der Realisierung von Projekten getroffen. Realisiert wird je nach den zur Verfügung stehenden Haushaltsmitteln und den

Fünfjahresplänen der Bundesschienenwege- und Fernstraßenausbaugesetzen. (vgl. Gehring u.a. 2003)

Die Zielstellung des BVWP 2003 lässt sich in ein Oberziel und einen Katalog von Unterzielen aufteilen. Oberziel ist es, „*die Investitionen in die Verkehrsinfrastruktur des Bundes so zu steuern, dass ein möglichst großer Beitrag zur Wohlfahrt der Bevölkerung erzielt wird*“ (BMVBS 2005:21). Die verkehrspolitischen und gesellschaftlichen Unterziele beziehen sich auf Nachhaltigkeit der Mobilität, Raumstruktur und Raumnutzung. Außerdem sollen der Wirtschaftsstandort Deutschland und die europäische Integration gestärkt sowie die Erhöhung der Verkehrssicherheit und Reduktion von negativen externen Effekten des Verkehrs angestrebt werden. Zur Erreichung der Ziele sollen die Investitionen den Projektalternativen möglichst zielerfüllend und effizient zugeordnet werden. Dafür werden diese ihrer Dringlichkeit halber in drei Kategorien eingestuft: Vordringlicher Bedarf (VB), Weiterer Bedarf (WB) und Projekte, die keinen Bedarf haben. (vgl. BMVBS 2003)

Bei dem BVWP 2003 findet die Projektbewertung mittels drei Verfahren statt: der NKA, der Raumwirksamkeitsanalyse (RWA) sowie der Umweltrisikoeinschätzung (URE) mit Flora-Fauna-Habitat-Verträglichkeitseinschätzung (FFH-VE). Dabei werden bei der NKA die Bewertungskomponenten in Geldwerten ausgedrückt, während die anderen Verfahren qualitative nicht-monetäre Werte betrachten. Im Folgenden werden die drei Verfahren kurz beleuchtet. (vgl. BMVBS 2003)

#### **4.1.1 Nutzen-Kosten-Analyse im BVWP**

Die Methodik der NKA ist in *Kapitel 3.1* beschrieben. Die verkehrlichen Grundlagen für die Berechnungen beim BVWP 2003 sind die Prognose der Verkehrsnachfrage für 2015 sowie die streckenspezifische und belastungsabhängige Verkehrssituation. Die Verkehrsprognose findet dabei verkehrsträgerübergreifend statt und wird mit dem Ausbauzustand der Verkehrsinfrastruktur Stand 2015 berechnet. Mit Hilfe von Quelle-Ziel-Verflechtungsmatrizen zwischen den definierten Verkehrszellen kann das Verkehrsaufkommen berechnet werden. Für die Bewertung der Infrastrukturmaßnahmen im Schienenverkehr werden im Zusammenhang der NKA folgende Bewertungskomponenten herangezogen (vgl. BMVBS 2005):

- Verbilligung von Beförderungsvorgängen
- Erhaltung der Verkehrswege

- Erhöhung der Verkehrssicherheit
- Verbesserung der Erreichbarkeit
- Räumliche Vorteile
- Entlastung der Umwelt
- Wirkungen des induzierten Verkehrs
- Verbesserte Anbindung von See- und Flughäfen
- Erfüllung verkehrsfremder Funktionen
- Investitionskosten

Alle Nutzenkomponenten werden monetarisiert, sodass sie den Investitionskosten gegenübergestellt werden können und die Berechenbarkeit eines NKV ermöglicht wird. Da die Nutzen und Kosten der Projektwirkungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallen, ist eine zeitliche Vereinheitlichung unumgänglich. Dafür wird der Bezugszeitpunkt für den BVWP 2003 einheitlich auf das Jahr 2000 gesetzt, während der Preisstand auf Vergleichspreisen von 1998 beruht. Die Preise werden als konstant angenommen, künftige Preissteigerungen bleiben unbeachtet. (vgl. BMVBS 2005)

Um die Aktualisierung von Nutzen- und Kostenströmen zu berücksichtigen, wird die Diskontierungsrate von  $h = 3 \%$  angenommen. Der Ratenwert orientiert sich an dem Durchschnitt des langfristig erwarteten realen Produktivitätsfortschritts in der Bundesrepublik. Für die Bestimmung der Nutzen von Investitionsprojekten wird ein Betrachtungszeitraum festgelegt. Dieser ist die Zeitspanne, die die Wirkungen der Projekte ab dem Jahr der Inbetriebnahme erfasst. (vgl. BMVBS 2005)

Findet unter diesen Annahmen eine Gegenüberstellung der Nutzen und Kosten statt, kann ein NKV berechnet werden, welches der Bundesverkehrswegeplanung eine wichtige Entscheidungsgrundlage bietet. Der interne Zinssatz und NGW finden im BVWP keine Anwendung. Die Bewertung in der NKA findet aufgrund quantitativer, monetärer Werte statt. Einer Infrastrukturmaßnahme im Schienenverkehr folgen allerdings Wirkungen, die nicht quantifizierbar bzw. messbar sind. Umweltwirkungen sind schwer in monetären Werten messbar. Deshalb werden im BVWP 2003 weitere Verfahren veranlasst, um die umwelt- und naturschutzfachlichen Konflikte einzubeziehen. Dafür wird je nach Charakteristik des Projektes eine URE mit FFH-VE und RWA veranlasst. (vgl. BMVBS 2005)



#### **4.1.2 Umweltrisikoeinschätzung**

Die URE betrachtet die Auswirkungen von Infrastrukturmaßnahmen auf die Schutzgutgruppen Natur und Landschaft, Wasser und Boden sowie Gesundheit und Wohlbefinden des Menschen. Die Gruppenzusammenfassung wird aufgrund komplexer Funktionszusammenhänge und Wechselwirkungen der einzelnen Schutzgüter durchgeführt. Gravierende Umweltkonflikte, die mit den potenziellen Projekten einhergehen, sollen frühestmöglich erkannt werden. Daher ist das Ziel der URE, die raumbezogenen Umweltrisiken und mögliche Konflikte qualitativ zu beurteilen. (vgl. BMVBS 2003)

Die URE findet auf der Entscheidungsebene des BVWP statt und entzieht sich damit konkreten Empfehlungen, Projekte auszuschließen. Auf tieferen Planungsebenen können Umweltverträglichkeitsstudien (UVS) durchgeführt werden, welche weit höhere Detailgenauigkeit aufweisen. Bei Infrastrukturprojekten, die den Verkehrsträger Straße betreffen, finden Vorabuntersuchungen durch das Bundesamt für Naturschutz statt. Mit diesem Früherkennungssystem kann herausgefunden werden, ob mit naturschutzfachlichen Konflikthäufungen zu rechnen und somit eine URE notwendig ist. Bei Schienenprojekten ist allerdings aufgrund der Größe der Projekte und deren Einfluss auf die Umwelt fast immer eine URE erforderlich. (vgl. BMVBS 2005)

Das methodische Vorgehen bei der URE ähnelt einer standardisierten Bewertung. Es läuft in drei Schritten ab: der Raumanalyse und -bewertung, der Beurteilung der Vorhabenwirkungen und zusammenfassend der Ermittlung des Umweltrisikos. (vgl. BMVBS 2005)

Im ersten Schritt - der Raumanalyse und -bewertung – werden die Gebietsmerkmale vier Stufen zugeordnet (geringer, mittlerer, hoher und sehr hoher Raumwiderstand). Maßgebend ist die Fläche mit dem höchsten Raumwiderstand. Betrachtet werden der Restriktionsgrad der Fläche, die Empfindlichkeit gegenüber verkehrsspezifischen Wirkungen und die schutzgutübergreifende Bedeutung bestimmter Gebietskategorien. (vgl. BMVBS 2005)

Daraufhin folgt die Beurteilung der Vorhabenwirkungen. Für die Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Infrastrukturmaßnahmen wird in diesem Schritt die Intensität der Vorhabenwirkungen normiert. Bei der Einstufung der Maßnahmen werden diese raumabhängig betrachtet, Vermeidungsverfahren bleiben unbeachtet. Die Intensität kann folgende Werte annehmen: sehr gering, gering, mittel, hoch und sehr hoch. Im

Anhang A ist eine Tabelle zur Einstufung der Projekte im Straßen- und Schienenbau zu finden. (vgl. BMVBS 2005)

Die folgende Methodik der Ermittlung des resultierenden Umweltrisikos ist stark formalisiert und das zugrundeliegende Verfahren besteht ebenfalls aus drei Teilschritten. Ziel ist es, eine Präferenzmatrix zu erstellen, die eine Gegenüberstellung der ersten beiden Schritte darstellt. Die Werte sind in fünf Stufen kategorisiert. Zu Beginn werden auf Basis digitaler Flächendaten die Einzelflächen in die URE-Grundmatrix eingestuft, siehe *Tabelle 4*. Dies geschieht aufgrund der Raumwiderstände in Beziehung zu deren Maßnahmenintensität.

Raumwiderstand	Maßnahmenintensität				
	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
gering	1	1	1	2	3
mittel	1	2	3	3	4
hoch	2	3	4	4	5
sehr hoch	3	4	5	5	5

**Tabelle 4:** Raumwiderstand (BMVBS 2005)

Daraufhin wird zusammenfassend eine Umweltrisikobilanz erstellt. Projektbezogen erfolgt im Untersuchungsraum eine Einstufung nach den Flächenanteilen der Risikostufe. Primär sind höhere Umweltrisikostufen entscheidend. Die Einstufungstabelle der Projekte nach Flächenanteilen ist im *Anhang A* zu finden. (vgl. BMVBS 2005)

Im letzten Schritt werden die Projekte abschließend eingestuft und erhalten eine Kategorie: (vgl. BMVBS 2003)

- 1 = sehr geringes Umweltrisiko
- 2 = geringes Umweltrisiko
- 3 = mittleres Umweltrisiko
- 4 = hohes Umweltrisiko
- 5 = sehr hohes Umweltrisiko

Um Informationsverlust vorzubeugen, erfolgt eine fachliche Interpretation und Plausibilitätsprüfung aufgrund der zur Verfügung stehenden Rauminformationen. Bei Bedarf können Kategorien korrigiert werden. Das Ergebnis ist letztendlich eine verbale Begründung der Raumwiderstände mit Abwägung der Umweltbelange. Bei nicht ausgleichbaren Eingriffen in die Natur und Landschaft werden Hinweise für Ausgleichsmaßnahmen oder Ersatzmaßnahmen gegeben. Dabei gilt der Grundsatz der Vermeidung und Minimierung von Umweltschäden. (vgl. BMVBS 2003)

### **4.1.3 Flora-Fauna-Habitat-Verträglichkeitseinschätzung**

Die FFH-VE ist eine Verträglichkeitsschätzung auf Generalplanungsebene. Sie hat das Ziel, bereits frühzeitig Konflikten vorzubeugen, die mit dem europäischen Schutzgebietsnetz „Natura-2000“ zusammenhängen. Gleichmaßen ist der nationalen Verpflichtung nachzugehen, Gebiete mit herausragender Bedeutung zu schützen. Die FFH-VE ist kein Ersatz für die FFH-Verträglichkeitsprüfung (FFH-VP) auf tieferen Planungsebenen, sondern kann in den Planungen als Anhaltspunkt für die Notwendigkeit einer FFH-VP gesehen werden. Ebenso kann eingeschätzt werden, inwieweit die Projektdurchführung mit erhöhten Kosten für Vermeidungsmaßnahmen von Beeinträchtigungen des Schutzgebietsnetzes von „Natura-2000“ verbunden sein wird. Eingestuft werden die Projekte in drei Stufen der Beeinträchtigung der „Natura-2000“-Gebiete (vgl. BMVBS 2003):

- 1 = erhebliche Beeinträchtigung ist ausgeschlossen
- 2 = erhebliche Beeinträchtigung ist nicht ausgeschlossen
- 3 = erhebliche Beeinträchtigung ist unvermeidbar

### **4.1.4 Raumwirksamkeitsanalyse**

Zur raumordnerischen Beurteilung wird eine RWA durchgeführt. Die sich daraus ergebenden Anforderungen gliedern sich in zwei Zielbereiche: Verteilungs- und Entwicklungsziele sowie Entlastungs- und Verlagerungsziele. Im Folgenden werden diese kurz vorgestellt.

Nach den Verteilungs- und Entwicklungszielen soll Deutschland in seinen Regionen gleichwertige Lebensverhältnisse aufweisen, sodass u. a. von der Infrastruktur her keine Region vernachlässigt wird. Daher soll zum einen eine technische Infrastruktur für die Bevölkerung flächendeckend verfügbar sein und zum anderen in den Teilräumen ausgeglichene Verhältnisse der Infrastruktur vorherrschen. Ziel der Entwicklung ist es, die Standortvoraussetzungen und –bedingungen für eine wirtschaftsnahe Infrastruktur zu verbessern. Dadurch wird eine gute Erreichbarkeit der Teilräume untereinander ermöglicht. Die RWA soll die Wirkung der Projekte auf raumordnerisch relevante Relationen bewerten. Dafür werden nur Relationen einbezogen, die einen bestimmten projektbedingten Schwellenwert der Reisezeitverbesserung überschreiten und somit raumordnerisch relevant sind. So werden nur Wirkungsfälle vernachlässigt, die keine, negative oder nur geringe Wirkungen aufweisen. In der Bewertung werden Erreichbarkeitsdefizite zwischen zentralen Orten berücksichtigt

sowie Strukturschwächen bzw. –merkmale der zu verbindenden Regionen einbezogen. In *Tabelle 5* ist die Einstufungsmatrix abgebildet. (vgl. BMVBS 2005)

Struktur- schwäche	Defizite der Erreichbarkeit			
	Keine	Weniger stark	Stark	Sehr stark
Keine	0	1	1	2
Weniger stark	1	1	2	3
Stark	1	2	3	4
Sehr Stark	2	3	4	5

**Tabelle 5:** Strukturschwächen Wertungstabelle (BMVBS 2005)

Bei den Entlastungs- und Verlagerungszielen findet eine Bewertung der Entlastung der hoch belasteten Räume und Korridore statt. Des Weiteren werden lokale Entlastungswirkungen in bebauten Bereichen einbezogen. Dabei werden hoch belastete Fernverkehrskorridore und Regionen vorab definiert und das Ausmaß der projektbedingten Verkehrsverlagerung von der Straße auf die Schiene/Wasserstraße prognostiziert. Für die Stadtbereiche wird das städtebauliche Nutzenpotenzial quantifiziert. Die Entlastung von hoch belasteten Korridoren im Fernverkehr und städtebauliche Effekten (Entlastung im lokalen Bereich) werden getrennt voneinander betrachtet und bewertet. In *Tabelle 6* ist die Wertungstabelle für den Fernverkehr veranschaulicht. Der lokale Bereich wird in einem dreidimensionalen Graphen aufgrund der Qualität im Seitenraum, in der Straßenausstattung und aufgrund des städtebaulichen Potenzials gewertet. RO-Punkte sind Raumordnungspunkte, die die Bedeutung der Raumordnung darstellen. (vgl. BMVBS 2005)

RO- Punkte	Entlastung der Korridore nach verkehrlicher Belastung		
	extrem	sehr hoch	hoch
5	150 Mio. PKW-E km/a und mehr		
4	50 Mio. PKW-E km/a und mehr		
3	30 Mio. PKW-E km/a und mehr		
2	20 Mio. PKW-E km/a und mehr		
1	10 Mio. PKW-E km/a und mehr		

**Tabelle 6:** Wertungstabelle Raumordnungspunkte (BMVBS 2005)

Zusammenfassend werden den Projekten in beiden Zielbereichen folgende Raumordnungspunkte vergeben (vgl. BMVBS 2003):

- 1 Punkt = geringe raumordnerische Bedeutung
- 2 Punkte = mittlere raumordnerische Bedeutung
- 3 Punkte = hohe raumordnerische Bedeutung



- 4 Punkte = sehr hohe raumordnerische Bedeutung
- 5 Punkte = herausragende raumordnerische Bedeutung

Für das Projekt herangezogen wird die Punkteanzahl des Zielbereichs, die den höheren Wert aufweist, nach dem Prinzip der „Meistbegünstigung“ (vgl. BMVBS 2005).

#### **4.1.5 Synthese**

Nach der Berechnung bzw. Bestimmung der drei Komponenten der gesamtwirtschaftlichen Bewertungsmethode müssen die Ergebnisse gemeinsam betrachtet werden. In der NKA wird ein *NKV* berechnet, während bei der URE mit FFH-VE und RWA ordinale Kategorisierungen vorgenommen werden. Um die Projekte in die Kategorien VB und WB einzuordnen, werden die Dringlichkeitsstufen der Projekte „nach Maßgabe des verfügbaren Finanzvolumens bis 2015 und darüber hinaus mit einer Planungsreserve festgelegt“ (BMVBS 2003:51). In den VB werden Projekte aufgrund der Höhe ihrer *NKVs* bis zur Erschöpfung des Budgets eingestuft. Dies sind laufende und fest deponierte sowie neue Vorhaben (vgl. Müller 2003). Nach den Ausbaugesetzen gilt ein uneingeschränkter Planungsauftrag für den VB. Sollten Projekte ein sehr hohes Umweltrisiko (URE = 5) aufweisen oder bei der FFH-VE als Ergebnis eine unvermeidbare erhebliche Beeinträchtigung (FFH-VE = 3) der FFH haben, sind diese als kritisch zu betrachten. Bevor diese in den VB aufgenommen werden können, müssen Einzelfallprüfungen folgen. Falls weder Lösungsvorschläge für die umwelt- und naturschutzfachlichen Probleme noch UVS oder FFH-VP vorliegen, müssen ergänzende Hinweise zur bestehenden Problematik für den weiteren Planungsverlauf beigefügt werden. (vgl. BMVBS 2005)

Projekte des VB mit sehr hoher bis herausragender RWA-Bewertung werden als Prädikatsprojekte vorrangig für die Bedarfspläne empfohlen. Dafür wird ein Mittelvolumen von 6,5 Mrd. Euro zur Verfügung gestellt. Weitere RWA-Pool-Projekte werden in den VB gestuft, wenn sie bestimmte Mindestkriterien bezüglich des *NKV*, der RWA-Bewertung und der Projektkosten erfüllen. Dadurch können Projekte in Betracht gezogen werden, die weniger durch ihre Rentabilität hervorstechen, sich jedoch viel mehr durch raumplanerische Vorteile auszeichnen. Bei Schienenprojekten gilt des Weiteren die Ausnahme, dass Projekte nachträglich in den VB aufgenommen werden können, falls sich diese „noch in Abstimmungen mit den Planungen europäischer Nachbarstaaten befinden“ (BMVBS 2005:51).



Wenn das Budget ausgeschöpft ist kann es dennoch gesamtwirtschaftlich vorteilhafte Projekte mit einem  $NKV > 1$  geben. Sind die übrigen Kriterien ebenfalls positiv, so werden diese in den WB kategorisiert (vgl. Müller 2003). Diese Projekte werden nur in Ausnahmefällen realisiert, wenn zum Beispiel der Verkehrsbedarf vorhanden ist oder die Planung durch andere Baulastträger durchgeführt wird. Im WB befinden sich außerdem Vorhaben mit eigenem Verkehrswert, die bis 2015 nicht vollständig realisiert werden können. (vgl. Müller 2003/ BMVBS 2003)

Der BVWP bewertet Projekte auf der Generalplanungsebene und entscheidet mit der Einstufung in den VB und WB, ob es verkehrlichen Bedarf für eine Infrastrukturmaßnahme gibt. *„Einen Ausschluss von Projekten auf dieser Ebene aufgrund von vorerst nur anzunehmenden Konflikten, für die aber erst später eindeutige Erkenntnisse vorliegen, ist daher aus fachlichen Gründen nicht möglich“* (BMVBS 2003:22).

Welchen Gewichten die Einstufungen der URE, FFH-VE und RWA im Bewertungsergebnis zukommen, ist in der gesamtwirtschaftlichen Bewertungsmethode zum BVWP nicht direkt ausgeschrieben. Als Ergebnis der Methode wird für jedes Projekt ein  $NKV$  berechnet sowie eine Einstufung der URE mit Begründung, eine Einstufung der FFH-VE mit Erläuterungen und eine Einstufung der RWA differenziert nach den beiden Zielbereichen (Verteilungs- und Entwicklungsziele sowie Verlagerungs- und Entlastungsziele) vorgenommen. (vgl. BMVBS 2005) Beispiele sind in BMVBS (2005) zu finden.

#### **4.1.6 Kritische Betrachtung des BVWP**

Der BVWP steht im Konflikt verschiedenste Kriterien sachgemäß in eine Bewertung von Infrastrukturmaßnahmen einzubeziehen, um diese für finanzielle Entscheidungen in eine Dringlichkeitsrangfolge zu bringen. Während Gehrung u.a. (2003) den BVWP 2003 als „goldene Mitte“ beschreibt, der die Sicherung moderner Verkehrswege, ausgewogene Umwelt- und Naturschutz sowie raumordnerisch gestaltete Verkehrswegenetze beinhaltet, sollen nachteilige Wirkungen der Monetarisierung und Schwächen in der Methodik nicht unberücksichtigt bleiben.

Außerdem treten Probleme bei der Finanzierung des BVWP auf. Aufgrund der Preisanstiege benötigter Rohstoffe für Verkehrsbaumaßnahmen, wird der Spielraum des Verkehrshaushaltes eingeschränkt. Der BVWP 2003 ist durch die Nichtberücksichtigung von Preissteigerungen stark unterfinanziert und die BVWP-Projekte befinden sich in einem Umsetzungsstau. So werden nur 20% des Finanzvolumens in



Projekte des BVWP, die mit der aktuellen Bewertungsmethode berechnet wurden, investiert. Überhänge des vorherigen BVWP und Ersatzinvestitionen erschöpfen die weiteren 80% vom „Indisponiblen Bedarf“. Dabei müsste der Indisponible Bedarf wiederum mit einem *NKV* bewertet werden, um seine Dringlichkeit erneut zu überprüfen. So könnten die finanziellen Mittel möglicherweise sinnvoller eingesetzt werden. (vgl. Willeke 2003/ Eck & Stark 2011)

Der BVWP ist ein Verfahren, das der Öffentlichkeit zugänglich sein sollte. Es mangelt ihm allerdings durch die komplexen Verfahren der NKA und RWA an Transparenz und Verständlichkeit. Wie die Dringlichkeitsrangfolge zustande kommt und welche Anteile die gesamtwirtschaftliche Bewertungsmethodik aufweist, ist letztendlich undurchsichtig. Nach Scheiner (2003) sind aus dem Ergebnis weder die bewerteten Problembereiche noch Wirkungen ersichtlich. Des Weiteren ist zu beachten, dass je komplexer das Verfahren ist, desto höher fallen die finanziellen Gelder für die Projektbewertung aus. Diese Mittel werden allerdings dem Etat entnommen, der für die Realisierung der Projekte zur Verfügung steht. Ein Verfahren mit einfachen und flexiblen Strukturen, das Nachvollziehbarkeit aufweist und sich auf einige wenige Komponenten beschränkt, wäre vorteilhafter. (vgl. Eck & Stark 2011/ Armbrecht 2004/ Gühneemann & Strauch 2003/ Grenier 2004)

Nach dem BMVBS (2005) ist der Kern der Methodik die NKA, doch diese kann das Ausmaß von langfristigen, externen Effekten nur unzureichend einbeziehen. Auch irreversible Schäden können schwer in monetären Werten ausgedrückt werden (vgl. Gühneemann & Strauch 2003). Von der Methodik her hängt das Projektergebnis auch von den Ergebnissen der RWA und URE ab. Gäbe es ein formalisiertes Entscheidungsverfahren, hätte diese Betrachtung nach Armbrecht (2004) nutzwertanalytischen Charakter. Dies ist allerdings nicht der Fall. Die Ergebnisse werden nebeneinander gestellt und vom ET abgewogen. Dabei vergleicht Armbrecht (2004) das Verfahren mit einer Kristallkugel, *„in die Determinanten eingehen und auf nicht durchschaubare Weise das undurchsichtige Einstufungsergebnis im Rahmen des Entscheidungsprozesses herauskommt“* (Armbrecht 2004:54).

Weitere Einflusspunkte sind politische Zusagen, netzkonzeptionelle Wirkungen, der Planungsstand und finanzielle Rahmenbedingungen. Diese sind eher informelle Einflüsse, die nicht Bestandteil der Projektbeurteilungen sind und den rationalen BVWP gefährden. (vgl. Armbrecht 2004/ Eck & Stark 2011)





Die Synthese von ökonomischen und ökologischen Zielen kann nur mit Detailverlust verbunden sein und ist somit kritisch zu betrachten. Eine Integration auf der horizontalen (mit anderen Fachplanungen), sowie vertikalen (über Planungsebenen hinweg) Ebene wäre nach Gühnemann & Strauch (2003) vorteilhafter. Des Weiteren sollten Projekte in ihrem Netzzusammenhang betrachtet werden, um Nachhaltigkeit zu gewährleisten. (vgl. Gühnemann & Strauch 2003)

## **4.2 Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs**

Die Standardisierte Bewertung (SB) von Verkehrswegeinvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs ist ein formalisiertes Verfahren zum Nachweis gesamtwirtschaftlicher Vorteilhaftigkeit und einer Folgekostenrechnung. Die Methodik beinhaltet ein mehrstufiges Bewertungsverfahren, welches Investitionsprojekte des öffentlichen Personennahverkehrs beurteilt. Dabei werden alternative Planfälle, in denen Investitionsvorhaben realisiert werden („Mitfälle“) mit dem Planfall ohne Durchführung einer Investition („Ohnefall“) verglichen. Der Ohnefall ist aus dem Ist-Zustand abzuleiten. Da sich Verkehrsangebot und -nachfrage verändern, werden die bis zum Planungshorizont vorausszusehenden Änderungen berücksichtigt. (vgl. Intraplan Consult GmbH & Verkehrswissenschaftliches Institut Stuttgart GmbH 2006)

Im Verfahren sollen unterschiedlich skalierte Ausprägungen der Bewertungskriterien möglichst in ihren originären Dimensionen ausgegeben werden. Dafür wird ein Nutzen-Kosten-Indikator (E1) berechnet, der originär monetäre oder monetarisierbare Wirkungen betrachtet. Außerdem wird ein Nutzwertanalytischer Indikator (E2) ermittelt, der sowohl die Wirkungen von E1 als auch kardinal messbare und nicht monetarisierbare Wirkungen in Punkten darstellt. Weitere Wirkungen, die nicht quantifizierbar sind, werden ergänzend verbal erläutert. Anschließend wird eine Folgekostenrechnung durchgeführt, um die finanziellen Auswirkungen über die Nutzungsdauer zu messen. (vgl. Intraplan Consult GmbH & Verkehrswissenschaftliches Institut Stuttgart GmbH 2006)

Die SB ist für die Problemstellung interessant, da sie die nutzen-kosten-analytischen Komponenten mit den Nutzwertkomponenten parallel betrachtet. Der Nachteil und Grund für die Vernachlässigung in der weiteren Betrachtung ist, dass die qualitativen Kriterien, welche auch ordinale Werte beinhalten, nicht in das Bewertungsverfahren einbezogen, sondern lediglich verbal erörtert werden.





### **4.3 Richtlinien für integrierte Netzgestaltung**

Bei den RIN handelt es sich um ein Bewertungsverfahren der verbindungsbezogenen Angebotsqualität von Relationen zwischen Orten. Ziel ist es, Ergänzungs-, Ausbau- und Umbaukonzepte für bestehende Verkehrsnetze abzuleiten und Mängel zu identifizieren. Außerdem sollen die Verkehrssysteme in einer Systemlösung als Ganzes betrachtet werden. (vgl. Gerlach 2009)

Das Verfahren bezieht sich auf Kfz-, öffentlichen Personen-, Rad- und Fußgängerverkehr. In der Methodik werden nach Gerlach (2009) Kennwerte in sechs Stufen der Angebotsqualität (SAQ) kategorisiert. Diese reichen wie Schulnoten von sehr guter bis unzureichender Qualität (A bis F). Eine Aggregation der Einstufungen findet im Rahmen der RIN nicht statt. Doch von besonderem Interesse ist die Einstufung der Kennwerte, welche aufgrund von empirischen Bewertungsfunktionen stattfindet. Die Funktionen werden graphisch dargestellt und ausgewertet. Dabei werden die Kriterien ins Verhältnis zu der Luftlinienentfernung gesetzt, um die Angebotsqualität der Relationen darzustellen. Letztendlich können die SAQ aus den Graphen abgelesen werden. Vergleiche von Alternativen werden jedoch nicht vorgenommen. (vgl. Friedrich 2005)



## 5 Multikriterielle Verfahren

Bisher wurden konventionelle Verfahren dargestellt, die weltweite Anwendung finden, sowie Methoden zur Bewertung von Verkehr bzw. Netze, die in Deutschland praktiziert werden. Die folgenden multikriteriellen Verfahren basieren jedoch auf den Erfahrungen der Anwendung gebräuchlicher Methoden. Sie bieten allerdings neue, teilweise relativ unbekannte, Algorithmen und Ansätze, um heterogene Kriterien integriert zu betrachten.

### 5.1 Verfahrensübersicht

Multikriterielle Verfahren haben das Ziel, unterschiedliche Alternativen aufgrund verschiedener Kriterien zu bewerten und eine Entscheidungsgrundlage zu bilden. Im englischen Sprachraum werden diese Entscheidungsprobleme als „Multi Criteria Decision Making“ (MCDM) bezeichnet. Diese gliedern sich in zwei Teilbereiche, die „Multi Objective Decision Making“ (MODM) und „Multi Attributive Decision Making“ (MADM). (vgl. Zimmermann & Gutsche 1991)

Bei den MODM werden die besten Alternativen nicht ausgewählt, sondern berechnet. Dabei ist der Lösungsraum, in dem sich die Alternativen befinden sollen, stetig und damit unbegrenzt. Zusätzlich werden Nebenbedingungen definiert und Zielfunktionen bestimmt. Dadurch ergibt sich ein Optimierungsproblem, in dem die Zielfunktionen gleichzeitig zu optimieren sind. Die Menge der Alternativen ist im Vorhinein nicht direkt vorgegeben. Stattdessen werden alle zulässigen und zielerfüllenden Alternativen ermittelt. Die MODM werden in dieser Bachelorarbeit nicht weiter betrachtet, da bei Schieneninfrastrukturmaßnahmen eine Alternativenmenge gegeben ist. (vgl. Zimmermann & Gutsche 1991)

Bei den MADM werden aus einer überschaubaren Menge von Alternativen die besten ausgewählt bzw. in eine Ordnung gebracht. Beurteilt werden diese anhand verschiedener Kriterien, wobei die Zielvorstellungen durch den ET gegeben sein müssen. Entschieden wird aufgrund eines Vergleichs der Kriterien untereinander sowie der Alternativenausprägungen bezüglich der Kriterien. Die MADM lassen sich in zwei Untergruppen differenzieren: die klassischen Ansätze und die Outranking Ansätze. Diese werden in *Kapitel 5.2* und *5.3* näher dargestellt. (vgl. Geldermann 1999)



## 5.2 Klassische Ansätze

Die klassischen Ansätze sind Teil der MADM und finden Anwendung in Amerika. Sie sind Weiterentwicklungen der NWA und beruhen auf der Annahme, dass sich Wirkungen kompensieren lassen. Zu den Verfahren der klassischen Ansätze gehören die Multi-Attributive Nutzentheorie (MAUT: Multi-Attribute Utility Theory) und der Analytic Hierarchy Process (AHP). (vgl. Götze 2008)

MAUT ist ein Verfahren, das der NWA ähnelt und eine additive Präferenzfunktion darstellt. Der nutzentheoretisch fundierten Methodik stehen allerdings ein hoher Datenermittlungsaufwand und strenge Anwendungsvoraussetzungen entgegen. Bedingungen sind u. a. kardinalskalierte Kriterien, unter denen Substitutionsraten (subjektive Kriteriengewichte) bestimmbar sind. Der ET muss angeben können, auf wie viele Einheiten eines Kriteriums er verzichten würde, um eine Einheit eines anderen Kriteriums mehr zu erhalten. Der AHP hingegen zeichnet sich durch das Beschreiben von Paarvergleichen auf einer 9-Punkte Skala aus. Dabei gilt jeweils die Reziprozität der entgegengesetzten Paarvergleiche ( $a_1$  ist 3-mal so gut wie  $a_2 \rightarrow a_2$  ist 1/3-mal so gut wie  $a_1$ ). Über einen Eigenvektor und Eigenwerte können Präferenzindizes der Alternativen und mit diesen eine Rangfolge berechnet werden. Die Methode verlangt ein Verhältnisskalenniveau, sodass ordinal skalierte qualitative Merkmale nicht einbezogen werden können. Die Substitutionseigenschaft wird nicht vorausgesetzt. (vgl. Schneeweiß 1991/ Götze 2008/Weber 1993)

Kompensatorische Verfahren sollen bei der integrierten Bewertung nicht betrachtet werden, da dies zu einem Informationsverlust durch die Aufhebung der schlechten durch gute Wirkungen führt. Daher werden im Folgenden Verfahren betrachtet, die nicht auf Kompensierbarkeit aufbauen.

## 5.3 Outranking

Die Outranking-Verfahren sind Teil der MADM, wurden in Europa entwickelt und finden dort vorrangig Anwendung. Ihnen ist gemein, dass der ET durch die Betrachtung aller Kriterien die Gewichtungsfaktoren holistisch bestimmt. Auch Unvergleichbarkeiten und Indifferenzen werden betrachtet und in Prävalenzgraphen wiedergeben. Die Verfahren sollen Kompensationswirkungen entgegenwirken. Dabei ist die Methodik relationsbasiert und lässt zum Teil Intransitivitäten zu, während Substitutionsraten vernachlässigt werden. Outranking Annahmen sind, dass die



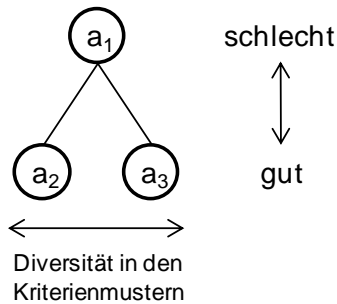
Präferenzen weder über die Zeit konstant, noch eindeutig, bzw. unmissverständlich, noch vom Verlauf der Analyse unabhängig sind. Die Ergebnisse können mit den unterschiedlichen Verfahren variieren, weshalb es ein für die Problemstellung geeignetes Verfahren zu identifizieren gilt. Im Folgenden wird auf vier Outranking-Verfahren eingegangen. Diese werden unter *Kapitel 6* mit Beispieldaten angewendet und verglichen. (vgl. Geldermann 1999/ Geldermann, Spengler & Rentz 2000/ Schneeweiß 1991)

### 5.3.1 Hasse-Diagramm-Technik

Die Hasse-Diagramm-Technik (HDT) ist eine Analysetechnik und wird den Outranking-Verfahren hinzugerechnet. Von Brüggemann & Halfon (1995) vielseitig bei ökologischer Problematik eingesetzt, wird die HDT als vergleichendes multikriterielles Bewertungsverfahren angewandt. Sie verfolgt das Ziel, Optionen allein anhand ihrer Eigenschaften zu sortieren. Die zugehörige Software „WHASSE“ wurde bereits implementiert. (vgl. Simon 2003)

Bei der Methodik entsteht eine partielle Präordnung anhand von Paarvergleichen. Dabei stehen bessere Alternativen oben und schlechtere unten. Zudem wird Transitivität zugelassen. Ist eine Alternative  $a_1$  in allen und mindestens einem Kriterium besser als  $a_2$ , so steht  $a_1$  über  $a_2$ . Die Sortierung erfolgt simultan und durch einfachen Vergleich. Gibt es keine Verbindungen zwischen zwei Alternativen, sind diese unvergleichbar. Falls alle Optionen unvergleichbar sind, besteht eine Antikette und gegebenenfalls müssen weitere Verfahren durchgeführt werden. (vgl. Simon 2003/ Helm 2003)

Das Verfahren zeichnet sich durch ein transparentes Verfahren aus und die Daten können visualisiert werden, siehe *Abbildung 3*. Es findet weder eine Wertsynthese noch eine Indexbildung statt, noch werden Gewichtungsfaktoren benötigt. Stattdessen wird jeder Datenpunkt separat behandelt und die Beziehungen zwischen den Alternativen sind ableitbar. Ziel ist eher die Analyse der Entscheidungsgrundlage als die Entscheidung an sich. (vgl. Helm 2003/ Brüggemann & Halfon 1995)



**Abbildung 3:** Hasse-Diagramm-Beispiel (aus Simon 2003)

### 5.3.2 ELECTRE

Die in den 70er Jahren entwickelte Methode ELECTRE wurde von dem Franzosen Roy entwickelt. Somit ist es das älteste Outranking-Verfahren und Basis für weitere Entwicklungen. ELECTRE steht für *Elimination Et Choice Translation Reality*. Vorhanden sind sieben verschiedene ELECTRE Methoden, die für unterschiedliche Problemstellungen gebraucht werden. Für rechnergestützte Anwendungen der Algorithmen ist eine Übersicht in Figueira, Greco & Ehrgott (2005) zu finden. (vgl. Zimmermann & Gutsche 1991/ Geldermann 1999/ Roy 1991)

Das Verfahren beruht auf Paarvergleichen und hat das Ziel, eine Menge nicht-dominierter Alternativen zu bestimmen. Dabei stellen sich Anforderungen an die Kriterien, die mindestens ordinal skaliert, vollständig (nur relevanten Aspekte), kohärent und nicht-redundant (nur ein Kriterium pro relevantem Aspekt) sein sollen. Die Kriterien gilt es zu maximieren. Sollte dies ursprünglich nicht die Intention sein, werden die Ausprägungen mit einem Vorzeichenwechsel zu einem Maximierungsproblem transformiert. Im Folgenden wird der Verfahrensablauf ELECTRE III vorgestellt, der Schwellenwerte betrachtet und das Ziel einer partiellen Präordnung hat. (vgl. Geldermann 1999/ Borken 2005)

Vom ET im Voraus vorgegebene Daten stellen die Gewichte der Kriterien, die Zustandsmatrix und wenn möglich Schwellenwerte dar. Letztere werden im Folgenden erläutert und können auch durch einen Mittelwert ersetzt werden. Die Gewichte sind nicht mit Substitutionsraten zu vergleichen, welche bei kompensatorischen Aggregationsverfahren verwendet werden, sondern werden unter Betrachtung aller Kriterien festgelegt. Der Ablauf wird nach Zimmermann & Gutsche (1991) formuliert.

Zu Beginn werden die Zustände  $z_{ij}$  mit *Formel (5.1)* normiert, sodass die normierte Zustandsmatrix  $R$  entsteht, welche mit der Gewichtungsmatrix  $W$  multipliziert wird ( $V=R \times W$ ). So wird die normierte und gewichtete Zustandsmatrix  $V$  vermittelt.

$$r_{ij} = \frac{z_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (z_{ij})^2}} \quad (5.1)$$

Daraufhin werden die Alternativen in Paarvergleichen bezüglich jedes Kriteriums betrachtet und in zwei Mengen, der Konkordanz- und Diskordanzmenge, nach *Formel* (5.2) und (5.3) aufgeteilt. Dabei sind  $k$  und  $l$  die zu vergleichenden Alternativen aus  $a_i$ . (vgl. Zimmermann & Gutsche 1991)

$$C_{kl} = \{j \in n | z_{kj} \geq z_{lj}\} \quad (5.2)$$

$$D_{kl} = \{j \in n | z_{kj} < z_{lj}\} = n \setminus C_{kl} \quad (5.3)$$

Die Konkordanzmenge  $C_{kl}$  (aus lateinischen concordare = übereinstimmen) ist die Menge, in der die  $k$ -te Alternative vor der  $l$ -ten Alternative im Hinblick auf Kriterium  $j$  vorgezogen wird, bzw.  $k$  und  $l$  gleich sind. Wohingegen die Diskordanzmenge  $D_{kl}$  die Komplementärmenge zu  $C_{kl}$  darstellt. (vgl. Zimmermann & Gutsche 1991)

Um die Konkordanzmatrix  $C$  zu berechnen, werden die Gewichte der Konkordanzmenge bezüglich eines Paarvergleiches  $C_{kl}$  summiert und in einer Matrix dargestellt:

$$c_{kl} = \sum_{j \in C_{kl}} w_j \quad \text{für alle } 1 \leq k, l \leq m, k \neq l. \quad (5.4)$$

Die Werte der Konkordanzmatrix beschreiben „die gewichtete relative Häufigkeit der Dominanz von der  $k$ . über die  $l$ . Alternative“ (Zimmermann & Gutsche 1991:209).

$D$  wird mit *Formel* (5.5) aufgestellt. Das Vorgehen unterscheidet sich allerdings von  $C$ , da es die Differenzen der Ausprägungswerte  $z_{ij}$  bei den Paarvergleichen betrachtet. Das Maximum der Differenzen der Diskordanzmenge wird ins Verhältnis zu dem Maximum der Differenzen des Paarvergleichs gesetzt. Der Diskordanzindex  $d_{kl}$  kann Werte im Intervall  $[0,1]$  annehmen, wobei ein Wert nahe 1 bedeutet, dass die  $k$ -te Alternative ungünstiger als die  $l$ -te Alternative ist und vice versa. (vgl. Zimmermann & Gutsche 1991)

$$d_{kl} = \frac{\max_{j \in D_{kl}} |v_{kj} - v_{lj}|}{\max_{j \in J} |v_{kj} - v_{lj}|} \quad \text{für alle } 1 \leq k, l \leq m, k \neq l \quad (5.5)$$

Sind Schwellenwerte vom ET vorgegeben, werden diese nun als Konkordanz-Schwelle  $c'$  und Diskordanz-Schwelle  $d'$  verwendet. Falls keine Werte vorliegen, kann der Mittelwert der Matrix  $C$  mit *Formel* (5.6) berechnet werden. Für die Diskordanz-

Schwelle gilt dasselbe mit Matrix  $D$  und statt  $c$  wird  $d$  eingesetzt. (vgl. Zimmermann & Gutsche 1991)

$$c' = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq l}}^m \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^m \frac{c_{kl}}{m \times (m - 1)} \quad (5.6)$$

Die Konkordanz-Dominanz-Matrix  $F$  wird mithilfe von  $c'$  aufgestellt, mit

$$f_{kl} = \begin{cases} 1, & \text{falls } f_{kl} \geq c' \\ 0, & \text{falls } f_{kl} < c' \end{cases} \quad \text{für alle } 1 \leq k, l \leq m \text{ mit } k \neq l$$

$f_{kl}=1$  bedeutet, dass die  $k$ -te Alternative gegenüber der  $l$ -ten Alternative als dominant angesehen wird, während  $f_{kl}=0$  auf keinerlei Dominanz hinweist.  $c'$  kann somit als Dominanzschwelle interpretiert werden. Ebenso wird die Diskordanz-Dominanz-Matrix  $G$  mit  $d'$  berechnet mit

$$g_{kl} = \begin{cases} 1, & \text{falls } g_{kl} \leq d' \\ 0, & \text{falls } g_{kl} > d' \end{cases} \quad \text{für alle } 1 \leq k, l \leq m \text{ mit } k \neq l$$

$g_{kl}=0$  bedeutet, dass ein Veto gegen die zugehörige Dominanz von der  $k$ -ten über die  $l$ -te Alternative spricht, bei  $g_{kl}=1$  gibt es keine Einwände gegen die Dominanz.  $d'$  wird als Veto-Schwelle interpretiert. (vgl. Zimmermann & Gutsche 1991)

Die Aggregierte Dominanz-Matrix  $E$  beschreibt den Durchschnitt von  $F$  und  $G$ , berechnet wird sie nach *Formel (5.7)* und beinhaltet die Werte 0 und 1. (vgl. Zimmermann & Gutsche 1991)

$$e_{kl} = f_{kl}g_{kl} \quad \text{für alle } 1 \leq k, l \leq m \text{ mit } k \neq l \quad (5.7)$$

$e_{kl}=1$  bedeutet, dass die  $k$ -te Alternative  $l$ -te Alternative dominiert. Somit ist die Diskordanz für ein Veto nicht groß genug. Während  $e_{kl}=0$  aussagt, dass die Konkordanz entweder zu schwach ist, oder ein Veto gegen die Dominanzbeziehung von  $k$  und  $l$  vorliegt. (vgl. Zimmermann & Gutsche 1991)

Die Matrix  $E$  beschreibt eine partielle Präordnung, wobei Alternativen, die mindestens eine 1 in der Spalte aufweisen, als dominiert gelten. Die partielle Präordnung kann in einem intransitiven Graph dargestellt werden. (vgl. Zimmermann & Gutsche 1991)

Die ELECTRE-Methodik hat den Vorteil, dass sie Alternativen aufgrund von verschiedenen Kriterien ordnet und als Graph darstellt. Heterogene Eigenschaften sind dabei problemlos betrachtbar, da sich der paarweise Vergleich nur auf jeweils ein

Attribut bezieht und keine Wertaggregation über die Kriterien stattfindet. Das Verfahren setzt zumindest eine Ordinalskalierung der Merkmale voraus, sodass qualitative sowie quantitative Kriterien einbezogen werden können. Des Weiteren wird durch die Schwellen eine Vetofunktion eingeführt, wodurch Kompensationen verringert werden können. (vgl. Borken 2005)

Es tun sich dennoch Schwächen auf. Beispielsweise wird das Verfahren mit zunehmender Anzahl von Alternativen bzw. Kriterien und somit Paarvergleichen relativ komplex. Außerdem ist die Methodik nicht allzu leicht nachzuvollziehen. Besonders die Interpretation und Vorgabe der Schwellenwerte ist nicht gerade einfach, da die Werte  $c_{kl}$  und  $d_{kl}$  keine reale Bedeutung aufweisen, allerdings einen großen Einfluss auf das Ergebnis haben. Von Nachteil ist, dass bei quantitativen Daten ein Informationsverlust stattfindet, da keine absoluten Differenzen betrachtet werden. (vgl. Borken 2005/ Geldermann, Spengler & Rentz 2000/ Zimmermann & Gutsche 1991)

### 5.3.3 PROMETHEE

PROMETHEE steht für *Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations* (vgl. Zimmermann & Gutsche 1991) und wurde von Brans, Vincke & Mareschal (1986) in den 80er Jahren entwickelt. In der Software PROMCALC ist die Methodik implementiert. (vgl. Brans & Mareschal 1994)

Das Verfahren zeichnet sich durch eine besondere Betrachtung der Kriterien aus. Die sogenannten „verallgemeinerten Kriterien“ werden in Funktionen von Paarvergleichsdifferenzen betrachtet. Dadurch können die Präferenzvorstellungen des ET problem-spezifisch dargestellt werden. Die verallgemeinerten Kriterien nehmen dabei Werte im Intervall  $[0,1]$  an, wobei 0 für Indifferenz steht, während 1 eine strikte Präferenz offenlegt. Die Zwischenwerte stehen je nach Ausprägung für schwache Präferenzen. Der ET kann seine Präferenzen aber auch selbst modellieren. Die Präferenzfunktion  $P_j$  hängt von den Differenzen  $u$  der Eingangswerte ab: (vgl. Geldermann 1999/ Zimmermann & Gutsche 1991)

$$P_j(a_k, a_l) = P_j(z_{kj} - z_{lj}) = P_j(u) \quad (5.8)$$

Brans, Vincke & Mareschal (1986) haben sechs Funktionen für verallgemeinerte Kriterien aufgestellt und sind der Meinung, dass diese für Entscheidungsprobleme die praktikabelsten sind. Ähnlich wie bei RIN werden die Werte aus den Graphen abgelesen. Eine Darstellung ist im *Anhang B* zu finden.





Ziel ist es, die Bedeutung der Differenzen der Ausprägungen von zwei betrachteten Alternativen bezüglich eines Kriteriums darzustellen. Nicht immer können diese als linear angenommen werden. Deshalb werden die Präferenzfunktionen passend für das Kriterium, zum Teil mit Parametern, modelliert. Dabei wird bei einer Funktion eine Gaußsche Kurve verwendet. Dies geschieht nicht aus wahrscheinlichkeitstheoretischen Gründen, sondern weil sie günstige Stabilitätseigenschaften aufweist. Der Vorteil birgt sich in unempfindlichen Ergebnissen gegenüber kleinen Änderungen im Parameter Sigma. Unvergleichbarkeiten ergeben sich nicht direkt anhand der Kriterien, sondern bei der Auswertung der partiellen Präordnung. (vgl. Brans, Vincke & Mareschal 1986)

Der Ablauf der Methodik wird aus Brans, Vincke & Mareschal (1986) und Geldermann (1999) entnommen. Zu Beginn wird für jedes Kriterium ein verallgemeinertes Kriterium, eine Präferenzfunktion  $P_j(a_k, a_l)$  und die Parameter vom ET bestimmt. Die Differenzwerte der Alternativen bezüglich eines Kriteriums werden berechnet, wodurch die Präferenzwerte mit den Funktionen ermittelt werden können. Daraufhin werden die Gewichte  $w_j$  der Kriterien definiert, wobei diese in der Summe 1 ergeben. Um einen Präferenzgraph erstellen zu können, werden die Outranking-Relationen berechnet. Dafür werden die Präferenzindexe mit *Formel (5.9)* bestimmt, diese charakterisieren die Stärke, mit der Alternative  $a_1$  der Alternative  $a_2$  vorgezogen wird, wenn alle Kriterien betrachtet werden. (vgl. Brans, Vincke & Mareschal 1986)

$$\pi: \begin{cases} A \times A \rightarrow [0,1] \\ \pi(a_k, a_l) = \sum_{j=1}^n w_j * P_j(u) \end{cases} \quad (5.9)$$

Der folgende Schritt beinhaltet die Berechnung der Ausgangs- und Eingangsflüsse  $\varphi^+(a_i)$  und  $\varphi^-(a_i)$  der Alternativen. Diese sind vergleichbar mit der Konkordanz bei ELECTRE. Der Ausgangsfluss berechnet sich mit *Formel (5.10)* und je größer dieser ist, desto eher dominiert  $a_i$  über die anderen Alternativen. Ebenso wird der Eingangsfluss mit *Formel (5.11)* als Maß für die Schwäche einer Alternative  $a_i$  bestimmt. (vgl. Brans, Vincke & Mareschal 1986)

$$\varphi^+(a_i) = \frac{1}{m-1} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq l}}^m \pi(a_k, a_l) \quad (5.10)$$

$$\varphi^-(a_i) = \frac{1}{m-1} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq l}}^m \pi(a_l, a_k) \quad (5.11)$$



Zur Auswertung der Outranking-Relationen gibt es bei PROMETHEE zwei Verfahren. Bei PROMETHEE I werden Eingangs- und Ausgangsflüsse miteinander verglichen und eine partielle Präordnung gebildet. Eine vollständige Präordnung wird bei PROMETHEE II erstellt, indem man die Nettoflüsse (Differenz der Ausgangs- und Eingangsflüsse  $\varphi(a_i) = \varphi^+(a_i) - \varphi^-(a_i)$ ) in einer Rangfolge darstellt. (vgl. Brans, Vincke & Mareschal 1986)

Bei PROMETHEE I ist eine Alternative vorteilhafter, je höher der Ausgangsfluss und je geringer der Eingangsfluss ist. Dabei gelten die folgenden Regeln. Der Ausgangsfluss  $\varphi^+$  erzeugt folgende vollständige Präordnung ( $P^+$ ,  $I^+$ ) auf die Menge  $A$  aller Alternativen und zieht Alternative  $a_1$  der Alternative  $a_2$  vor, bzw. ist indifferent: (vgl. Brans, Vincke & Mareschal 1986)

$$P^+: a_1 P^+ a_2 \rightarrow \varphi^+(a_1) > \varphi^+(a_2)$$

$$I^+: a_1 I^+ a_2 \rightarrow \varphi^+(a_1) = \varphi^+(a_2)$$

während der Eingangsfluss  $\varphi^-$  eine vollständige Präordnung ( $P^-$ ,  $I^-$ ) auf die Menge  $A$  abbildet:

$$P^-: a_1 P^- a_2 \rightarrow \varphi^-(a_1) < \varphi^-(a_2)$$

$$I^-: a_1 I^- a_2 \rightarrow \varphi^-(a_1) = \varphi^-(a_2)$$

Die partielle Präordnung ( $P(1)$ ,  $I(1)$ ,  $U(1)$ ) ist der Durchschnitt der beiden Präordnungen ((1) steht für PROMETHEE I):

$$P(1): a_1 P(1) a_2 \rightarrow (a_1 P^+ a_2 \text{ und } a_1 P^- a_2)$$

$$\text{oder } (a_1 P^+ a_2 \text{ und } a_1 I^- a_2)$$

$$\text{oder } (a_1 I^+ a_2 \text{ und } a_1 P^- a_2)$$

$$I(1): a_1 I(1) a_2 \rightarrow (a_1 I^+ a_2 \text{ und } a_1 I^- a_2)$$

$$U(1): a_1 U(1) a_2 \rightarrow (\text{nicht } a_1 P(1) a_2) \text{ und } (\text{nicht } a_1 I(1) a_2)$$

Das Ergebnis kann als Graph oder Matrix mit den Ausprägungen  $P, I$  und  $U$  dargestellt werden, siehe *Tabelle 30*.

PROMETHEE I ist durch die Bildung einer partiellen Präordnung mit Betrachtung der Unvergleichbarkeiten und Indifferenzen realistischer. Besonders praktikabel ist die Methode bei Umweltthemen, da keine Kompensation von guten mit schlechten Werten stattfindet. Es bietet sich die Möglichkeit, Cluster zu bilden und Gruppen von den besten Alternativen zu identifizieren. Auf der anderen Seite bietet PROMETHEE II



eine vollständige Präordnung, betrachtet daher keine Unvergleichbarkeiten und kompensiert gute mit schlechten Werten. Dafür bietet es aber eine Reihenfolge der Alternativen. Bei einer Anwendung können aber auch beide gleichzeitig berücksichtigt werden. (vgl. Geldermann, Spengler & Rentz 2000)

Zusätzliche Stärken der Methode sind die Flexibilität, die sich besonders durch die Wahl der verallgemeinerten Kriterien auswirkt, die interaktive Festlegung der Parameter, die realwirtschaftliche Bedeutung haben, und die graphische Darstellungsmöglichkeit. Die tatsächliche Wahl der Parameter durch den ET ist währenddessen von Nachteil, da diese nicht immer exakt die Präferenzen des ET widerspiegeln. Unklar ist, ob die Präferenz des besten Ergebnisses sehr viel höher oder nur geringfügig als die des zweitgrößten ist. (vgl. Geldermann, Spengler & Rentz 2000/ Brans, Vincke & Mareschal 1986)

#### **5.3.4 ORESTE**

Das Verfahren ORESTE baut auf den Outranking-Verfahren auf und wurde von Roubens (1982) und Pastijn & Leysen (1989) in den 80er Jahren entwickelt. Ziel soll es sein, in Entscheidungssituationen Entscheidungsgrundlagen zu bauen, in denen eindeutige Präferenzen nicht problemlos formulierbar sind. Es werden im Besonderen Konflikte betrachtet, die auftreten können, wenn die Alternativen komplementäre Vor- und Nachteile aufweisen und somit die Entscheidungsfindung zunehmend erschwert wird. Eine globale Präferenzstruktur von Alternativen soll gefunden werden. Dafür wird das Verfahren in zwei Phasen gegliedert, die ordinale Nutzwertanalyse und die Konfliktanalyse. Die Nutzwertanalyse implementiert eine schwache Ordnung, welche in der darauffolgenden Konfliktanalyse differenziert wird. Eine vollständige Präordnung kann nicht immer ermittelt werden, dafür werden Indifferenzen und Unvergleichbarkeiten betrachtet. Des Weiteren kann man im Voraus nicht davon ausgehen, dass jede Alternative mit jeder anderen transitiv vergleichbar ist. Das Verfahren wird aus Schneeweiß (1991) vorgestellt. (vgl. Figueira, Greco & Ehrgott 2005)/ (Lillich 1992))

Die ordinale Nutzwertanalyse beruht auf zumindest ordinalem Datenmaterial (vgl. Wiese 1998), aufgrund dessen werden die Wertabstände nicht betrachtet. Ziel ist es, eine Rangfolge darzustellen. Dafür werden die Alternativen  $a_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) hinsichtlich aller Kriterien  $k_j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) geordnet, sodass  $n$  ordinale Rangfolgen entstehen. Da es vorkommen kann, dass Kriterienausprägungen bei einer Alternative mehrfach belegt sind, werden Mittelränge verwendet. Allgemein gilt, dass der höchste Rang der



Vorteilhafteste ist. Es wird also der besten Ausprägung der höchste Rang verliehen, während der schlechteste Rang eine 1 erhält. Bei Indifferenzen werden die Mittelwerte der zugehörigen Rangzahlen verwendet. Die Rangordnung der Alternativen bezüglich der Kriterien wird in der Wertfunktion  $r_{ij}:=r_j(a_i)$  dargestellt. Die Gewichte werden ebenfalls in ordinale Rängen angegeben. Für eine Normierung der Werte muss eine neue Einheit  $b_{ij}:=b_j(a_i)$  eingeführt werden, da wegen der multiplikativen Verknüpfung durch monotone Transformation die Bedeutung der Gewichte verloren gehen könnte. Die gewichtete Wertfunktion  $b_j(a_i)$  berechnet sich mit *Formel (5.12)*: (vgl. Schneeweiß 1991)

$$b_j(a_i) = w_j * r_j(a_i) \quad (5.12)$$

Normiert werden die Werte durch die streng monoton wachsende Transformation  $H$  auf einer Bandbreite von  $1, \dots, m * n$  Rängen. Dabei gilt  $H_j(a_i) := H(b_j(a_i))$ .  $H_j(a_i)$  wird als Doppelrang bezeichnet, da er den Rang der Kriterien untereinander und die Ränge der Alternativen bezüglich der Kriterien beinhaltet. Durch Aggregation der normierten, gewichteten Ränge (*Formel (5.13)*) erhält man das Ergebnis der ordinalen Nutzwertanalyse, eine Präferenzordnung  $\Psi$ . (vgl. Schneeweiß 1991)

$$\Psi(a_i) = \sum_{j=1}^n H_j(a_i) \quad (5.13)$$

Darauf folgt die Konfliktanalyse, in der vorerst Konkordanzmengen berechnet werden. Diese stellen die Mengen dar, in denen bei Paarvergleichen in Bezug auf alle Kriterien eine Alternative besser als eine andere ist. Im Gegensatz zu den Konkordanzmengen in ELECTRE wird bei ORESTE strikte Präferenz zwischen den Alternativen gebraucht, siehe *Formel (5.14)*. (vgl. Schneeweiß 1991)

$$C_{kl} = \{j \in n | z_{kj} > z_{lj}\} \quad (5.14)$$

Ebenso wird die Konkordanzmenge  $C_{lk}$  berechnet. Daraufhin summiert man die Differenzen der Ränge von  $H$  (*Formel (5.15)*) und erhält die Prävalenzgrade  $\widetilde{PG}(a_k, a_l)$ . Diese sagen aus, wie stark  $a_k$  gegenüber  $a_l$  vorgezogen wird, andersherum genauso. (vgl. Schneeweiß 1991)

$$\widetilde{PG}(a_k, a_l) = \sum_{j \in C_{kl}} H_j(a_k) - H_j(a_l) \quad (5.15)$$

Für einen Vergleich wird der Prävalenzgrad  $\widetilde{PG}$  mit *Formel (5.16)* normiert. Die Herleitung dieser Formel ist in Schneeweiß (1991) zu finden.

$$PG(a_k, a_l) = \frac{1}{n^2 * (m - 1)} * \widetilde{PG}(a_k, a_l) \quad (5.16)$$

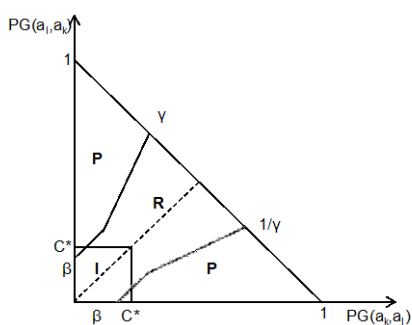
Im Ergebnis ist Alternative  $a_k$  vorzuziehen, wenn  $PG(a_k, a_l)$  deutlich größer ist als  $PG(a_l, a_k)$ . Darstellbar sind die Paarvergleiche in einem Graphen (*Abbildung 4*), der sich in drei Zonen unterteilt: die Indifferenzzone, die Präferenzzone und die Unvergleichbarkeitszone. Für die Kategorisierung der Zonen müssen die Parameter  $\beta$ ,  $C^*$  und  $\gamma$  vom ET vorgegeben werden. Sowohl die Differenz zwischen den Paarvergleichen muss klein sein, als auch beide Paarvergleiche an sich: (vgl. Schneeweiß 1991)

$$\begin{aligned} |PG(a_k, a_l) - PG(a_l, a_k)| &\leq \beta \\ PG(a_k, a_l) &\leq C^* \\ PG(a_l, a_k) &\leq C^* \end{aligned} \quad (5.17)$$

Für die Präferenzzone muss der Unterschied zwischen  $PG(a_k, a_l)$  und  $PG(a_l, a_k)$ , der sich in  $\gamma$  widerspiegelt, deutlich sein:

$$\begin{aligned} PG(a_k, a_l) &\geq \gamma * PG(a_l, a_k) \quad \text{für } a_k > a_l \\ PG(a_l, a_k) &\geq \gamma * PG(a_k, a_l) \quad \text{für } a_l > a_k \end{aligned} \quad (5.18)$$

Die Unvergleichbarkeitszone ergibt sich aus der Zone, in der weder Indifferenz noch Präferenz gilt (vgl. Schneeweiß 1991).



**Abbildung 4:** Zoneneinteilung

Letztendlich können aus dem ORESTE Verfahren eine schwache Präferenzordnung in der Nutzwertanalyse und in der Konfliktanalyse ein Präferenzgraph, der die Konflikte widerspiegelt, abgeleitet werden (vgl. Schneeweiß 1991).



Das Verfahren ORESTE hat den Vorteil, dass es mit ordinalen Datenmaterial umgehen kann, es normiert die Werte und macht sie vergleichbar. Die Möglichkeit der Indifferenzen und Unvergleichbarkeiten zwischen Alternativen werden in der Konfliktanalyse beachtet. Die Konfliktanalyse ist besonders transparent und auch das Ergebnis ist in Form des Präferenzgraphs mit seinen Zoneneinteilungen gut nachvollziehbar. Doch weist ORESTE auch einige Schwächen auf. Es ist nicht immer möglich, eine eindeutige Präferenzordnung aufzustellen. Ebenso wie ELECTRE bezieht sich das Verfahren auf Ränge und Rangdifferenzen, weshalb das Verfahren bei Einbeziehung kardinaler Daten immer einen Informationsverlust mit sich trägt. Auch die Gewichte sind in diesem Verfahren als Rangzahlen angegeben, dies verhindert definierte Abstufungen in der Gewichtung der Kriterien. Des Weiteren sind für die Konfliktanalyse Parameter vorzugeben, deren Wahl problematisch ist und das Ergebnis beeinflusst. Im Großen und Ganzen wird bei ORESTE in der Nutzwertanalyse eine Präferenzordnung aufgestellt, die daraufhin bezüglich möglicher Konflikte analysiert wird. (vgl. Schneeweiß 1991/ Lillich 1992)

#### 5.4 Vergleich der Verfahren

Zusammenfassend sollen die verschiedenen Verfahren verglichen und analysiert werden. Im *Anhang C* sind dafür zwei Tabellen dargestellt (Quellenangaben sind ebenfalls im *Anhang C* zu finden). *Tabelle 11* zeigt die Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Outranking-Verfahren, *Tabelle 12* die der klassischen Ansätze sowie zum Vergleich die der NWA und NKA.

Die Möglichkeit zur Synthese von ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Belangen ohne die Kompensation schlechter mit guten Kriterien ist ein wesentliches Kriterium zur Beurteilung der Eignung eines Verfahrens zur Auswahl von Schieneninfrastrukturprojekten. Da qualitative ökologische oder gesellschaftliche Kriterien auch ordinalskaliert sein können, sollte dies ebenfalls im Modell berücksichtigt werden.

Unter diesen Voraussetzungen muss die NKA vernachlässigt werden, da die ausschließlich monetäre Betrachtung der Kriterien eine Kardinalskala bzw. eine Monetarisierung erfordert. Auch MAUT und AHP setzen Kardinalskalen voraus und ein eindimensionaler Präferenzindex resultiert als Ergebnis. Letzterer hat Dateninformationsverlust zur Folge, denn wegen der Aggregation der Wertfunktionen gehen wertvolle Informationen verloren. Die NWA kann zwar mit ordinalem Datenmaterial



umgehen, doch weist sie ebenfalls einen eindimensionalen Nutzwert auf und kompensiert Wirkungen miteinander.

Im Gegensatz zu den konventionellen Verfahren und klassischen Ansätzen vermeiden die Outranking-Verfahren Kompensation und betrachten Ordnungsrelationen. HDT ausgenommen, sind die Differenzen der Kriterienausprägungen Eingangsdaten für die Modelle. Grundlage ist also nicht die Höhe der Werte an sich, sondern die Beziehung zwischen den Werten. Mitunter können die Verfahren unterschiedlich aussehen. Die Ergebnisse sind meist in Graphen darstellbar und somit leicht zu interpretieren.

Die HDT-Methodik ist als Entscheidungsgrundlage nur bedingt einsetzbar, denn sie stellt die Beziehungen der Alternativen aufgrund der Daten ohne jegliche Gewichtung der Kriterien dar. Sie ist einsetzbar für eine Analyse der Alternativen und zum Vergleich der Ergebnisse mit denen der anderen Verfahren. Sollte die Gewichtung der Kriterien nicht erforderlich sein, ist HDT ein transparentes, einfaches und gut nachvollziehbares Verfahren.

Die anderen drei Outranking-Verfahren unterscheiden sich hauptsächlich in der Art der Vergleiche der Alternativen. ELECTRE baut auf Paarvergleiche und Mengen auf, in denen Dominanz von Alternativen herrscht. Das Verfahren ist komplex, aber methodisch durchdacht. Als Parameter können Schwellenwerte angegeben werden, deren Bedeutung schwer interpretierbar ist. Benutzt man die einfache Mittelwertbildung, ist die Anwendung simpler. Eine Menge nicht-dominiertes Alternativen gilt es dabei zu bestimmen. PROMETHEE hingegen setzt durch die Verallgemeinerten Kriterien die Anforderung an den ET, die Bedeutung der Differenzen für jedes Kriterium in einer Bewertungsfunktion darzustellen. Diese werden außerdem durch Parameter charakterisiert. Erhöhter Aufwand der Bestimmung der Funktionen und Parameter stehen dem folgenden gut nachvollziehbaren Verfahren gegenüber. Außerdem hat der ET bei PROMETHEE größeren Spielraum seine Präferenzen zu formulieren. Letztendlich verknüpft ORESTE eine NWA mit der Konfliktanalyse, in der ebenfalls Parameter für die Einordnung der Paarvergleiche in die Zonen des Konfliktgraphen zu bestimmen sind. Ein Unterschied zu ELECTRE und PROMETHEE ist, dass in ORESTE auch die Gewichte in Rängen anzugeben sind und somit die Bedeutung der Kriterien möglicherweise nicht hinreichend dargestellt werden kann. Die Konfliktanalyse hingegen teilt die Paarvergleiche in sehr transparenter Weise in Präferenzen, Indifferenzen und Unvergleichbarkeiten ein.



Insgesamt können sowohl ELECTRE, als auch PROMETHEE, als auch ORESTE als mehrkriterielle Verfahren gebraucht werden, in denen qualitative und quantitative Daten eingehen und deren Bedeutung gewahrt bleibt. Setzt man das Ziel eines geringen Aufwands, den der ET aufbringen muss um Parameter festzusetzen, sind ELECTRE und ORESTE gegenüber PROMETHEE vorzuziehen. Falls die Transparenz und Verständlichkeit vorrangig ist, sind ORESTE oder PROMETHEE vorteilhafter. ELECTRE und PROMETHEE jedoch haben weniger Detailverlust der Daten als ORESTE, weil die Gewichte nicht in Rängen dargestellt sind. Betrachtet man also den Aufwand des Verfahrens, die Transparenz und den Informationsgehalt der Daten, so wird für die Anwendung der Verfahren zur Auswahl von Infrastrukturmaßnahmen im Schienenverkehr der Informationsgehalt als wichtigstes Kriterium angesehen. Daher sind insgesamt ELECTRE und PROMETHEE vor ORESTE vorzuziehen.





## 6 Beispielanwendung

Nachdem einige Bewertungsverfahren beschrieben wurden, wird nun ein konkretes Beispiel eines Schieneninfrastrukturprojektes anhand der Outranking-Verfahren berechnet. Die Ergebnisse werden anschließend verglichen.

### 6.1 Beispiel

Die Schienenstrecke von Erzingen über Schaffhausen nach Singen ist für den ab 2020 geplanten Fahrplan hinsichtlich der Leistungsfähigkeit nicht mehr ausreichend. Es bedarf einer Infrastrukturmaßnahme, um Kapazität für den geplanten Betrieb zu schaffen. Diese Maßnahme kann das Einfügen von Streckenblockabschnitten, einen Gleisneubau für Güterzugüberholung oder aber den Einsatz von elektronischen Stellwerken (ESTW) betreffen. Weitere Streckenblöcke bieten den Vorteil, dass diese eine Strecke in mehrere Blockabschnitte aufteilen und somit zu einer höheren Kapazität durch die Minderung von Zugfolgemindestzeiten führen. Der Bau von Güterzugüberholgleisen ermöglicht das Einlegen von Güterzugtrassen und führt zu einer Erhöhung der Kapazität. Außerdem führt der Einsatz von elektronischen Stellwerken durch die zentrale Steuerung zu geringeren Besitzkosten. So kann sich der höhere Investitionsaufwand der ESTW durch Einsparungen (beispielsweise Personalkosten) nach einigen Jahrzehnten amortisieren.

Als Bewertungskriterien für die Eingangsdaten der Bewertungsmodelle werden die Indikatoren Fahrplan, Kosten und Qualität herangezogen.

Der Fahrplan beinhaltet das binäre Kriterium der Realisierung von zwei Güterzugtrassen im Streckenabschnitt Schaffhausen-Singen und zurück je Stunde und Richtung. Die Ausprägungen betragen 0 für „keine Realisierbarkeit“ und 1 für „Realisierbarkeit“. Das Ziel ist es, zwei Güterzugtrassen einzulegen. Der Unterpunkt Kosten ist in den Lebenszykluskosten (Euro) spezifiziert, welche kardinalskaliert sind und minimiert werden sollen. Die Lebenszykluskosten beinhalten alle anstehenden Anschaffungs- und Besitzkosten im Laufe der 30 Jahre, die das Signalsystem, die Stellwerke, Gleisanlagen, Oberleitung und GSM-R (Global System for Mobile Communications – Rail(way)) betrifft.

Die Qualität bildet sich aus den Kriterien des Belegungsgrades und der Pufferzeit, wobei beide die Güterzugtrassen vernachlässigen. Der Belegungsgrad ist ein Mittelwert aus den Belegungsgraden der Streckenabschnitte und soll minimiert

werden, da ein geringerer Belegungsgrad zu höheren Pufferzeiten und somit einer Erhöhung der Fahrplanstabilität und Betriebsqualität führt. Die Pufferzeit ist wiederum binär und beinhaltet die Ausprägungen, dass nach der Bahnhofsabfahrt eines Zuges eine Minute Pufferzeit vorhanden (Ausprägung 1) und dass keine Minute Pufferzeit vorhanden ist (Ausprägung 0). Dieses Kriterium soll maximiert werden, um die Qualität mit der Pufferzeit zu erhöhen.

Die Varianten sind in folgender *Tabelle 7* dargestellt. Auch die Gewichte und Ränge (in Klammern hinter den prozentualen Anteilen) sind als beispielhafte Werte angegeben. Sieben Infrastrukturvarianten, die auch den Referenzfall enthalten (keine Infrastrukturmaßnahme) werden miteinander verglichen. Weitere Erläuterungen zu den Baumaßnahmen der Varianten sind im *Anhang D* zu finden.

Infrastruktur		Fahrplan	Kosten	Qualität (ohne Güterzugtrassen)	
Alternative	Infrastrukturvariante	zwei Güterzug-Trassen je Stunde und Richtung zwischen Scf-Si und zurück einlegbar? [ja:1/nein:0]	LCC über 30 Jahre: - Signalsystem - Stellwerke - Gleisanlagen - Oberleitung - GSM-R [€]	Mittelwert der Belegungsgrade [%]	Pufferzeit nach Bahnhofsabfahrt 1 Minute [ja:1/nein:0]
		k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>4</sub>
a <sub>1</sub>	Referenz	0	-72.626.957,32	-67,75%	0
a <sub>2</sub>	Variante 1	0	-73.676.113,12	-52,75%	0
a <sub>3</sub>	Variante 2	1	-74.727.268,92	-44,75%	0
a <sub>4</sub>	Variante 3	1	-76.996.680,51	-46,25%	0
a <sub>5</sub>	Variante 7	0	-74.274.113,12	-50,50%	1
a <sub>6</sub>	Variante 9	0	-61.723.106,40	-50,00%	1
a <sub>7</sub>	Variante 10	1	-62.690.402,90	-43,50%	1
Gewichte Anteil (Rang)	4 Kriterien	20% (2)	65% (4)	10% (3)	5% (1)

**Tabelle 7:** Übersicht der Alternativen und Kriterien (Scheier & Böhm 2012)

## 6.2 Anwendung

Die sieben Alternativen und vier Kriterien werden mit den Outranking-Verfahren HDT, ELECTRE, PROMETHEE und ORESTE bewertet, bzw. in eine Präordnung gebracht. Anschließend werden die Ergebnisse miteinander verglichen.

### 6.2.1 Hasse-Diagramm-Technik

Die Zielerreichungsgrade der Alternativen bezüglich der Kriterien sind im *Anhang E* zu finden. Als Ergebnis sind bei der HDT Alternative  $a_6$  und  $a_7$  vorteilhafter als die anderen. Dabei werden  $a_1$ ,  $a_2$  und  $a_5$  von  $a_6$  dominiert, während  $a_7$  alle außer  $a_6$  dominiert.

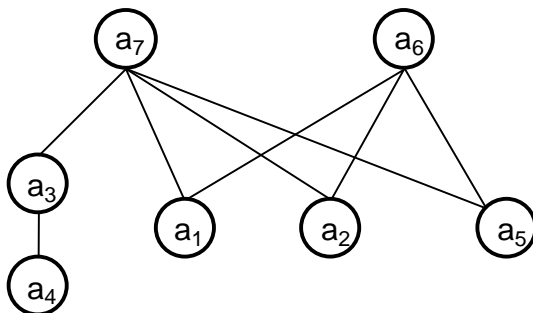


Abbildung 5: HDT-Graph

### 6.2.2 ELECTRE

Die Formeln für die Berechnung für ELECTRE sind in *Kapitel 5.3.2* zu finden. *Anhang F* beinhaltet die Matrizen der Zwischenschritte. Als Resultat wird die partielle Präordnung in *Abbildung 6* erzeugt. Genau wie bei HDT sind die Alternativen  $a_6$  und  $a_7$  vorteilhafter als die anderen. Tatsächlich ergibt sich dasselbe Ergebnis wie bei der HDT, obwohl Gewichte und Schwellenwerte betrachtet werden.

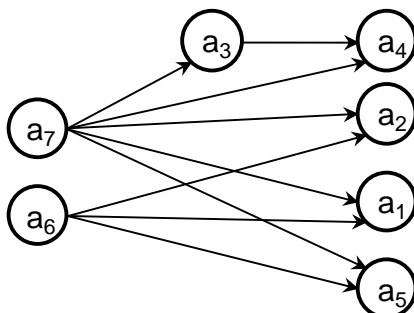


Abbildung 6: partielle Präordnung – ELECTRE

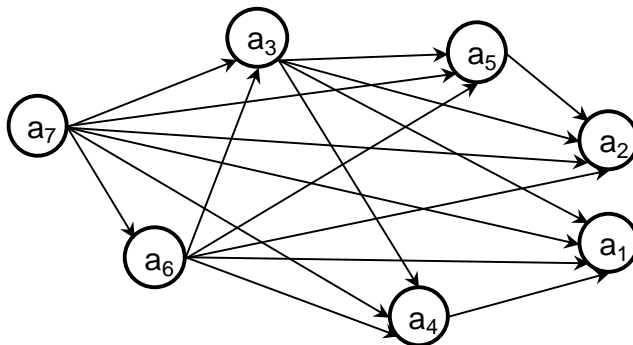
### 6.2.3 PROMETHEE

In *Kapitel 5.3.3* ist die hier anzuwendende Methodik beschrieben. Für die verallgemeinerten Kriterien werden die Parameter in *Tabelle 8* verwendet. Teilergebnisse sind in *Anhang G* auffindbar.

Verallgemeinertes Kriterium	k <sub>1</sub> : quasi	k <sub>2</sub> : linear	k <sub>3</sub> : gauss	k <sub>4</sub> : quasi
Parameter	q	p	σ	q
	0,5	10.000.000	0,0819	0,5

**Tabelle 8:** Parameter für verallgemeinerte Kriterien

Bei PROMETHEE I ist  $a_7$  die Alternative, die alle anderen dominiert. Darauf folgt  $a_6$ , während der  $a_7$  von allen anderen dominiert wird. Bei PROMETHEE II ergibt sich diese Reihenfolge:  $a_7 \rightarrow a_6 \rightarrow a_3 \rightarrow a_4 \rightarrow a_5 \rightarrow a_2 \rightarrow a_1$ .



**Abbildung 7:** partielle Präordnung – PROMETHEE

#### 6.2.4 ORESTE

Beim ORESTE-Verfahren, dessen Formeln in *Kapitel 5.3.4* und Zwischenergebnisse in *Anhang H* abgebildet sind, ergibt sich aus der ordinalen Nutzwertanalyse die totale Präordnung:  $a_7 \rightarrow a_6 \rightarrow a_3 \rightarrow a_5 \rightarrow a_4 \rightarrow a_2 \rightarrow a_1$ . Führt man die Konfliktanalyse durch, erhält man die *Abbildung 8*, diese zeigt einen Ausschnitt aus dem Konfliktgraphen, der alle Werte darstellt. Dabei werden die Parameter  $\beta = 0,14$  und  $C^*=0,1$  gebraucht,  $\gamma$  wird vernachlässigt. Aus den Koordinaten ergibt sich die partielle Präordnung in *Abbildung 9*.

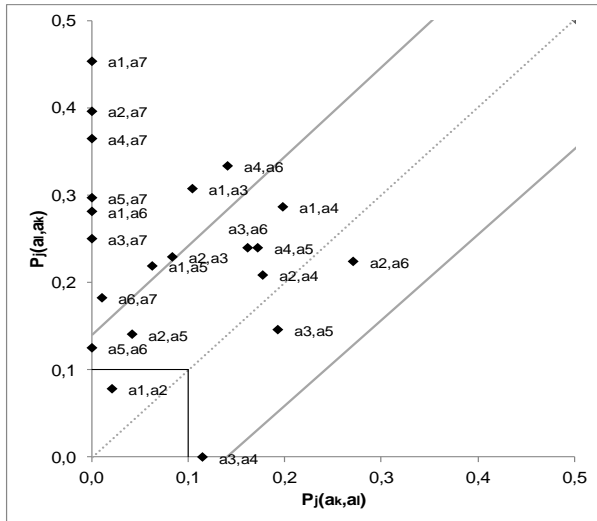


Abbildung 8: Zonengraph – ORESTE

Genau wie bei PROMETHEE liegt  $a_7$  an bester Stelle. Eine Indifferenz ist zwischen  $a_2$  und  $a_1$  zu verzeichnen.  $a_1$ ,  $a_2$  und  $a_4$  sind eher im schlechteren Bereich zu finden.

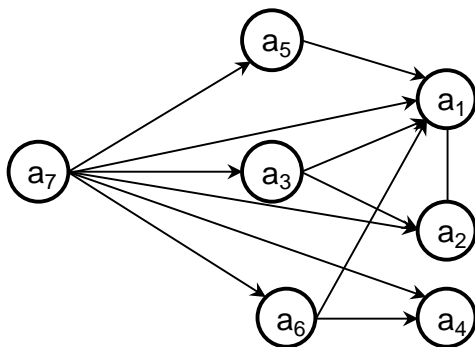


Abbildung 9: partielle Präordnung – ORESTE

### 6.3 Auswertung und Interpretation

Wenn man die *Abbildungen 5,6,7,9* betrachtet, ist auffällig, dass die Ergebnisse der vier Verfahren in dieselbe Richtung gehen.  $a_7$ , die Variante, in der 8 Streckenblöcke gebaut werden und ein Neubau von ESTW an 4 Betriebsstellen erfolgt, ist bei PROMETHEE und ORESTE die vorteilhafteste Alternative, während  $a_2$  und  $a_1$  eindeutig unvorteilhaft sind. Bei ELECTRE und HDT sind die Ergebnisse etwas unspezifischer und  $a_6$  und  $a_7$  sind nicht direkt vergleichbar. Einerseits können diese ähnlichen Ergebnisse aus den Verfahren folgen, die die Entscheidungssituationen ungefähr gleich gut darstellen, andererseits kann der Grund auch das Datenmaterial sein, das die Ergebnisse so eindeutig fordert. Letzteres ist eine Auswahl und es wurden 7 Alternativen und 4 Kriterien gewählt, da die Ergebnisse relativ übersichtlich darzustellen sind und das Verfahren nicht zu komplex wird. Die Gewichte und



Parameter sind beispielhaft gewählt und eine Variation kann zu anderen Ergebnissen führen. Des Weiteren sind die Gewichte bei den Verfahren zwar einheitlich (HDT ausgenommen und bei ORESTE Gewichte in Rängen), doch die Parameter weisen unterschiedliche Bedeutungen auf. Die Betrachtung der Ergebnisse wird demnach durch unterschiedliche Parameterwahl beeinflusst.

Es fällt auf, dass der HDT-Graph und die partielle Präordnung bei ELECTRE dieselbe Struktur aufweisen. Daraus könnte man schließen, dass die komplexe Methodik ELECTRE überflüssig ist, da das simple HDT-Verfahren dasselbe Ergebnis hervorbringt. Doch aufgrund der vorherigen Argumentation ist dieser Gedanke zu verwerfen.

Insgesamt lässt sich sagen, dass die Ergebnisse der Verfahren in dieselbe Richtung gehen und die Darstellungen in den Hauptaussagen ähnlich sind. In Bezug auf *Kapitel 5.4* kann keines der Verfahren durch die Betrachtung des Beispiels als das Beste identifiziert werden.



## 7 Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit sollte eine Analyse und Vergleich von Methoden zur integrierten Bewertung von Infrastrukturmaßnahmen im Schienenverkehr durchgeführt werden. Dafür wurde mit der Darstellung der theoretischen Grundlagen zur Entscheidungsfindung begonnen, gefolgt von konventionellen Verfahren wie der Nutzen-Kosten-Analyse, Nutzwertanalyse und Kosten-Wirksamkeits-Analyse, bis hin zu den in Deutschland praktizierten Bewertungsmethoden von Infrastrukturmaßnahmen. Besonders das Verfahren des Bundesverkehrswegeplan wurde beleuchtet und die Betrachtung der qualitativen und quantitativen Aspekte dargestellt. Es stellte sich heraus, dass die Methodik stark durch die Monetarisierung und Einbeziehung der Daten in eine Nutzen-Kosten-Analyse geprägt sind. Die qualitativen Komponenten werden zwar in weiteren Verfahren erfasst, doch die Synthese ist intransparent und fragwürdig. Um qualitative Kriterien besser in das Bewertungsmodell einfließen zu lassen, wurden multikriterielle Verfahren der Entscheidungsfindung analysiert und verglichen. Vorgestellt wurden dabei Multi-Attribute Entscheidungsverfahren (MADM) und insbesondere die Outranking-Verfahren, welche eine Vielzahl von heterogenen Kriterien betrachten und mittels Paarvergleichen Präferenzordnungen aufstellen können.

Im Detail wurden die Verfahren HDT, ELECTRE, PROMETHEE und ORESTE vorgestellt. Aus einem Vergleich kann der Schluss gezogen werden, dass HDT am besten in Kombination mit einer anderen Methode angewendet werden sollte. Die anderen Verfahren unterscheiden sich im Grad ihrer Komplexität der Anwendung, der Transparenz des Verfahrens und Detailgenauigkeit der Ergebnisse. Allerdings weisen sie sehr ähnliche Ergebnisse im Anwendungsbeispiel auf. Da jedoch der Informationsgehalt der Ergebnisse als besonders wichtig angesehen wird, sind ELECTRE und PROMETHEE vor ORESTE zu präferieren. Im Rahmen des Projektes des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt empfiehlt sich somit die Anwendung von PROMETHEE oder ELECTRE für die Bewertung von Infrastrukturmaßnahmen.



## Quellenverzeichnis

- Auer, Ludwig v. 2005. *Ökonometrie: Eine Einführung mit 55 Tabellen*. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Armbrecht, Henrik 2004. *Politische Weichenstellungen für den Verkehr: Verkehrsplanung, Bepreisung, Deregulierung. Themenschwerpunkte der Studienkreistagung 2004*. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht.
- Bamberg, Günter & Coenenberg, Adolf G. 2002. *Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre*. 11. Aufl. München: Vahlen.
- Bechmann, Arnim 1978. *Nutzwertanalyse, Bewertungstheorie und Planung*. Bern, Stuttgart: Haupt Verlag.
- BMVBS 2003. *Bundesverkehrswegeplan 2003: Grundlagen für die Zukunft der Mobilität in Deutschland*. URL: <http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/34254/publicationFile/10825/bundesverkehrswege-plan-2003-beschluss-der-bundesregierung-vom-02-juli-2003.pdf> [Stand 2012-07-26].
- BMVBS 2005. *Bundesverkehrswegeplan 2003: Die gesamtwirtschaftliche Bewertungsmethodik*. URL: <http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/78638/publicationFile/51250/bundesverkehrswegeplan-2003-bewertungsmethodik.pdf> [Stand 2012-10-15].
- Borken, Jens 2005. *Umweltindikatoren als ein Instrument der Technikfolgenabschätzung: Selektion, Aggregation und multi-kriterielle Bewertung am Beispiel des Verkehrs*. Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität. URL: <http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/1938/> [Stand 2012-09-21].
- Brans, Jean-Pierre & Mareschal, Bertrand 1994. The PROMCALC & GAIA decision support system for multicriteria decision aid. *Decision Support Systems* 12(4-5), 297–310. Online im Internet: URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0167923694900485> [Stand 2012-10-15].





- Brans, Jean-Pierre, Vincke, Philippe & Mareschal, Bertrand 1986. How to select and how to rank projects: The Promethee method. *European Journal of Operational Research* 24(2), 228–238. Online im Internet: URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0377221786900445> [Stand 2012-10-15].
- Brüggemann, Rainer & Halfon, Efraim 1995. *Theoretical Base of the Program "Hasse"*. (20). Oberschleißheim: GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit.
- Eck, Florian & Stark, Sarah 2011. Bundesverkehrswegeplan 20XX. *Internationales Verkehrswesen* 63(1).
- Figueira, José, Greco, Salvatore & Ehrgott, Matthias 2005. *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*. New York: Springer.
- Friedrich, Markus 2005. Bewertung der Angebotsqualität in Verkehrsnetzen nach den Richtlinien für die integrierte Netzgestaltung. Tagungsbericht des 16. ptv vision Anwenderseminar. Karlsruhe.
- Gehring, Peter, u.a. 2003. Generalverkehrsplanung für Deutschland: Der neue Bundesverkehrswegeplan 2003 (BVWP 2003). *Internationales Verkehrswesen* 55(11), 516–524.
- Geldermann, Jutta 1999. *Entwicklung eines multikriteriellen Entscheidungsunterstützungssystems zur integrierten Technikbewertung*. (Fortschritt-Berichte VDI, 16). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Geldermann, Jutta, Spengler, Thomas & Rentz, Otto 2000. Fuzzy outranking for environmental assessment. Case study: iron and steel making industry. *Fuzzy Sets and Systems* 115(1), 45–65.
- Gerlach, Jürgen 2009. *Richtlinien für integrierte Netzgestaltung: RIN*. Köln: FGSV-Verlag.
- Götze, Uwe 2008. *Investitionsrechnung: Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

- Grenier, Alain 2004. Bewertungsverfahren verbesserungsfähig. *Internationales Verkehrswesen* 56(1,2).
- Gühnemann, Astrid & Strauch, Dirk 2003. Neue (Bewertungs-)Verfahren in der Verkehrsplanung. *Zukunftsaufgabe Mobilität - Innovation, Lifestyle, Nachhaltigkeit*. TU Berlin(6), 35–49.
- Hanusch, Horst 2007. *Nutzen-Kosten-Analyse*. 3. Aufl. München: Vahlen.
- Helm, Dieter 2003. Bewertung von Monitoringdaten der Umweltprobenbank des Bundes mit der Hasse-Diagramm-Technik. *UWSF - Z Umweltchem Ökotox* 15(2), 85–94. Online im Internet: URL: <http://www.springerlink.com/content/hm3815204x564220/fulltext.pdf> [Stand 2012-08-07].
- Hoffmeister, Wolfgang 2000. *Investitionsrechnung und Nutzwertanalyse: Eine entscheidungsorientierte Darstellung mit vielen Beispielen und Übungen*. 1. Aufl. Stuttgart, Berlin, Köln: Kohlhammer.
- Intraplan Consult GmbH; Verkehrswissenschaftliches Institut Stuttgart GmbH 2006. *Standardisierte Bewertung von Verkehrsweegeinvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs und Folgekostenrechnung*. Version 2006. München: Intraplan.
- Klumpp, Matthias, Kowalski, Martin & Bielesch, Björn 2009. Erweiterte Wirtschaftlichkeitsanalyse für Eisenbahnverkehrsunternehmen. Projektbericht. Universität Duisburg Essen.
- Lillich, Lothar 1992. *Nutzwertverfahren*. 1. Aufl. Heidelberg: Physica-Verlag.
- Mühlenkamp, Holger 1994. *Kosten-Nutzen-Analyse*. München, Wien: Oldenbourg.
- Müller, Christoph 2003. Bundesverkehrswegeplan 2003: Ausbau der Schieneninfrastruktur. *Eisenbahningenieur* 54(6).



- Pastijn, Hugo & Leysen, Jan 1989. Constructing an outranking relation with ORESTE. *Mathematical and Computer Modelling: An International Journal* 12(10-11), 1255–1268. Online im Internet: URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0895717789903671> [Stand 2012-10-15].
- Rinza, Peter & Schmitz, Heiner 1992. *Nutzwert-Kosten-Analyse: Eine Entscheidungshilfe*. 2. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Roubens, Marc 1982. Preference relations on actions and criteria in multicriteria decision making. *European Journal of Operational Research* 10(1), 51–55. Online im Internet: URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037722178290131X> [Stand 2012-10-15].
- Roy, Bernard 1980. Selektieren, Sortieren und Ordnen mit Hilfe von Prävalenzrelationen: Neue Ansätze auf dem Gebiet der Entscheidungshilfe für Multikriterien-Probleme. *Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung* 32, 465–497.
- Roy, Bernard 1991. The outranking approach and the foundations of electre methods. *Theory and Decision* 31(1), 49–73.
- Scheier, Benedikt & Böhm, Thomas 2012. *Erzingen-Singen: Bedarfsgerechte Infrastruktur anhand Betriebsprogramm 2020+*. (interner Bericht des Deutschen Zentrum für Luft-und Raumfahrt, Institut für Verkehrssystemtechnik).
- Scheiner, Joachim 2003. Bewertungsverfahren in der Verkehrsplanung. Arbeitspapier. Universität Dortmund. URL: [http://vpl.tu-dortmund.de/cms/Medienpool/PDF\\_Dokumente/Arbeitspapiere/AP09\\_von\\_Joachim\\_Scheiner.pdf](http://vpl.tu-dortmund.de/cms/Medienpool/PDF_Dokumente/Arbeitspapiere/AP09_von_Joachim_Scheiner.pdf) [Stand 2012-09-21].
- Schmuck, Alfred & Oefner, Gert 1979. Investitionsrechnung als Entscheidungshilfe bei strassenbautechnischen Fragestellungen. Hochschule der Bundeswehr München-Neubiberg. Institut Verkehrsplanung und Straßenwesen.



- Schneeweiß, Christoph 1991. *Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen*. Berlin [u.a.]: Springer.
- Simon, Ute-Marianne 2003. *Multikriterielle Bewertung von wasserwirtschaftlichen Massnahmen aus gewässerökologischer Sicht, Beispiel Berlin*. Berlin: Tenea Verlag.
- Weber, Karl 1993. *Mehrkriterielle Entscheidungen*. 1. Aufl. München, Wien: Oldenbourg.
- Weiss, Dieter 1975. *Infrastrukturplanung: Ziele, Kriterien und Bewertung von Alternativen*. Berlin: Bruno Hessling Verlag.
- Wiese, Jens 1998. Ein Entscheidungsmodell für die Auswahl von Standardanwendungssoftware am Beispiel von Warenwirtschaftssystemen. Arbeitsbericht Nr. 62. Westfälischen Wilhelms-Universität Münster. URL: <http://www.wi.uni-muenster.de/institut/arbeitsberichte/ab62.pdf> [Stand 2012-07-27].
- Willeke, Rainer 2003. Bundesverkehrswegeplan 2003: Eine kritische Bestandsaufnahme. *Internationales Verkehrswesen* 55(11), 525–528.
- Winkler, Gerald M. 1994. *Entscheidungen und Präferenzen: Die Rationalisierbarkeit individueller Wahlhandlungen*. Heidelberg: Physica-Verlag.
- Zangemeister, Christof 1971. Nutzwertanalyse in der Systemtechnik: *Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen*. 2. Aufl. München: Wittemannsche Buchhandlung.
- Zimmermann, Hans-Jürgen & Gutsche, Lothar 1991. *Multi-Criteria-Analyse: Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen*. Berlin [u.a.]: Springer.



## **Erklärung zur Urheberschaft**

### **Ehrenwörtliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbst angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher noch keiner anderen Prüfbehörde vorgelegt und noch nicht veröffentlicht. Ich bin mir bewusst, dass eine unwahre Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

Dresden, den 25.10.2012

---

Rebekka Ott

## Anhang

<b>A</b>	<b>Bundesverkehrswegeplan .....</b>	<b>XXI</b>
<b>B</b>	<b>Multikriterielle Verfahren – Verallgemeinerte Kriterien .....</b>	<b>XXIII</b>
<b>C</b>	<b>Multikriterielle Verfahren – Methodenvergleich .....</b>	<b>XXVI</b>
<b>D</b>	<b>Beispielanwendung – Infrastrukturmaßnahmen .....</b>	<b>XXVIII</b>
<b>E</b>	<b>Beispielanwendung – HDT Rechenschritte .....</b>	<b>XXVIII</b>
<b>F</b>	<b>Beispielanwendung – ELECTRE Rechenschritte.....</b>	<b>XXIX</b>
<b>G</b>	<b>Beispielanwendung – PROMETHEE Rechenschritte.....</b>	<b>XXXI</b>
<b>H</b>	<b>Beispielanwendung – ORESTE Rechenschritte.....</b>	<b>XXXIII</b>

### A Bundesverkehrswegeplan

Intensität	Projekttyp
sehr hoch	Neubau BAB/vierstreifige Schnellstraße mit hohem Anteil an Einschnitt- und Dammlagen Neubau Schiene mit hohem Anteil an Einschnitt- und Dammlage
hoch	Neubau BAB/vierstreifige Schnellstraße mit geringem Anteil an Einschnitt- und Dammlagen Neubau Straße mit hohem Anteil an Einschnitt- und Dammlage oder Verkehrsstärke >25.000 Kfz je Tag
mittel	Neubau sonstiger Schnellstraße mit geringem Anteil an Einschnitt- und Dammlagen (Verkehrsstärke < 25.000 Kfz je Tag) Ausbau BAB:Erweiterung um mind. 2 Fahrstreifen mit hohem Anteil an Einschnitt- und Dammlage
gering	Ausbau BAB:Erweiterung um mind. 2 Fahrstreifen mit geringem Anteil an Einschnitt- und Dammlage Ausbau sonstiger Fernstraße mit einer Verkehrsstärke >10.000 Kfz je Tag Ausbau Schienenweg mit zusätzlichem Flächenverbrauch (Gleiserweiterung)
sehr gering	Ausbau Straße <10.000 je Tag Ausbau Schienenweg ohne zusätzlichen Flächenverbrauch

**Tabelle 9:** Intensität und Projekttypen im Straßen- und Schienenbau (BMVBS 2005)

Das Vorhaben erhält die Einstufung in Umweltrisikostufe ↓	⇒ wenn die im Untersuchungsgebiet ermittelten Umweltrisikostufen	⇒ den angegebenen Größenordnungen entsprechend
1 sehr gering	1 (sehr gering) 2 (gering)	bis 100% < 20%
2 gering	2 (gering) 3 (mittel) 4 (hoch) und höher	≥ 20 < 60% < 20% 0%
3 mittel	2 (gering) 3 (mittel) 4 (hoch) 5 (sehr hoch)	≥ 60% ≥ 20% < 40% < 20% und durchlässig < 5%, keine Barriere
4 hoch	3 (mittel) 4 (hoch) 5 (sehr hoch)	≥ 60% ≥ 20 < 40% 5-20% und/oder < 500 m unvermeidbare Zerschneidung vor allem von Natura-2000-Gebieten
5 sehr hoch	4 (hoch) 4 und 5 5 (sehr hoch)	≥ 40% ≥ 50% ≥ 20% oder > 500 m unvermeidbare Zerschneidung vor allem von Natura-2000-Gebieten

**Tabelle 10:** Einstufung der Straßen- und Schienenprojekte nach Flächenanteilen (BMVBS 2005)

## B Multikriterielle Verfahren – Verallgemeinerte Kriterien

Die Verallgemeinerten Kriterien sind aus (Figueira, Greco & Ehrgott 2005) entnommen.

### Das gewöhnliche Kriterium

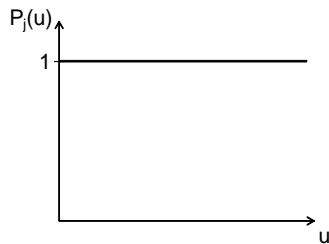


Abbildung 10: Gewöhnliches Kriterium

$$\text{Mit } P_j(u) = \begin{cases} 0, & \text{falls } u \leq 0 \\ 1, & \text{falls } u > 0 \end{cases}$$

### Quasi-Kriterium

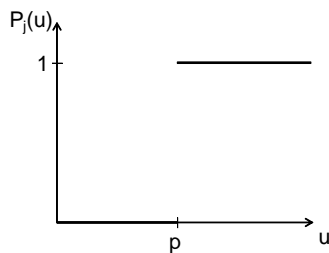


Abbildung 11: Quasi-Kriterium

$$\text{Mit } P_j(u) = \begin{cases} 0, & \text{falls } u \leq p \\ 1, & \text{falls } u > p \end{cases}$$

Parameter:  $p$

### Lineare Präferenzen

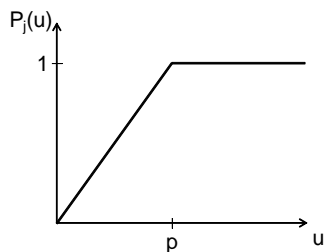


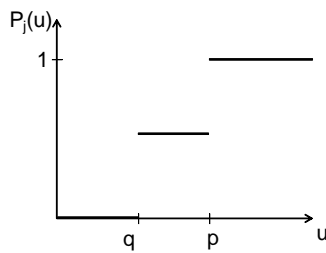
Abbildung 12: Kriterium mit linearen Präferenzen



$$\text{Mit } P_j(u) = \begin{cases} 0, & \text{falls } u \leq 0 \\ \frac{u}{p}, & \text{falls } 0 \leq u \leq p \\ 1, & \text{falls } p \leq u \end{cases}$$

Parameter:  $p$

### Stufenkriterium



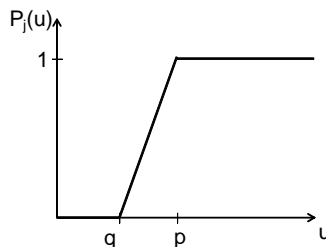
**Abbildung 13:** Stufenkriterium

$$\text{Mit } P_j(u) = \begin{cases} 0, & \text{falls } u \leq q \\ 0,5, & \text{falls } q < u \leq p \\ 1, & \text{falls } p < u \end{cases}$$

Parameter:  $q, p$

Der ET muss Schwellenwert und  $p \geq q$  angeben können.

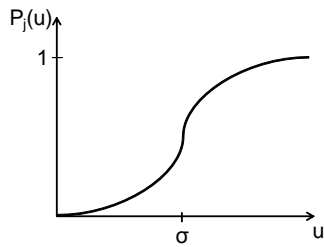
### Lineare Präferenzen mit Indifferenzzone



**Abbildung 14:** Kriterium mit linearer Präferenz und Indifferenzzone

$$\text{Mit } P_j(u) = \begin{cases} 0, & \text{falls } u \leq q \\ \frac{(u-q)}{(p-q)}, & \text{falls } q \leq u \leq p \\ 1, & \text{falls } p \leq u \end{cases}$$

Parameter:  $q, p$

Gaußsches Kriterium**Abbildung 15:** Gaußsches Kriterium

$$\text{Mit } P_j(u) = \begin{cases} 0, & \text{falls } u \leq 0 \\ \left(1 - e^{-\frac{u^2}{2 \times \sigma^2}}\right), & \text{falls } u \geq 0 \end{cases}$$

Bei  $u = \sigma$  liegt der Wendepunkt mit  $\sigma \geq 0$  und muss vom ET vorgegeben werden.

Parameter:  $\sigma$

## C Multikriterielle Verfahren – Methodenvergleich

Übersicht	HDT	ELECTRE	PROMETHEE I	PROMETHEE II	ORESTE
<b>Eingangsdaten</b>					
Skalenniveau mind.	ordinal/kardinal	ordinal	ordinal		ordinal
<b>Voraussetzung</b>					
Gewichtung	nein	durch ET	durch ET		durch ET, Gewichte werden in Rängen angegeben
Parameter/Schwellenwerte	nein	Schwellenwerte der Konkordanz/Diskordanz	Parameter: Verallgemeinerte Kriterien		Parameter: Konfliktanalyse
Substitutionsraten	nein	nein	nein		nein
<b>Modell</b>					
Verfahren	Hierarchie aufstellen aufgrund der Werte	Paarvergleiche der Alternativen aufgrund der Kriterien und Bildung der Konkordanz- und Diskordanzmengen	verallgemeinerte Kriterien, Paarvergleiche, Eingangs-/Ausgangsfüße		Ordinale NWA und Konfliktanalyse
Präferenzen	nein	durch Schwellenwerte und Gewichte	Wahl der verallgemeinerten Kriterien und Parameter, Gewichte		Prävalenzgrad
Normierung	nein	ja	durch verallgemeinerte Kriterien		Bildung Mittelränge
Aggregation	nein		über gewichtete normierte Differenzen		Rangaggregation
Kompensation	nein	nein	nein		(Rangaggregation in NWA)
Paarvergleiche	ja	ja	ja		ja
Differenzbetrachtung	nein	ja	ja		ja
Betrachtung von Indifferenzen und Unvergleichbarkeiten	Indifferenz und Unvergleichbarkeit	nein	Indifferenz und Unvergleichbarkeit	nein	Indifferenz und Unvergleichbarkeit
<b>Ergebnis</b>					
Ergebnis	partiell geordnete Menge	Menge nicht-dominierter Alternativen	partielle Präordnung	Rangfolge	partielle Präordnung
Ergebnisdarstellung	Graph	gerichteter Graph	Graphische Darstellung der partiellen Präordnung	vollständige Präordnung	NWA: vollständige Präordnung Konfliktanalyse: partielle Präordnung und Zoneneinteilungsgraph

**Tabelle 11:** Methodenvergleich (1)

(vgl. Helm 2003/ Brüggemann & Halfon 1995/ Zimmermann & Gutsche 1991/ Roy 1991/ Figueira, Greco & Ehrgott 2005/ Brans & Mareschal 1994/ Brans, Vincke & Mareschal 1986/ Geldermann, Spengler & Rentz 2000/ Lillich 1992/ Schneeweiß 1991)

Übersicht	NKA	NWA	MAUT	AHP
<b>Eingangsdaten</b>				
Skalenniveau mind.	kardinal	ordinal	kardinal	kardinal (verhältnisskala)
<b>Voraussetzung</b>				
Gewichtung	(durch Monetarisieren)	durch ET	durch ET	durch Eigenvektormethode
Parameter/ Schwellenwerte	nein	nein	nein	nein
Substitutionsraten	ja	ja	ja	nein
<b>Modell</b>				
Verfahren	Monetarisieren und Aggregieren, Berechnung NKV	Punktwerte z.B. [0,10]	additive Präferenzfunktion und Wertfunktion (Medianverfahren)	Hierarchiebildung, Eigenvektormethode
Präferenzen	keine	Vergabe der Punkte	Präferenzfunktion	Vergabe von Punkten (1-9 und reziproke)
Normierung	nein	ja	ja	ja
Aggregation	ja	ja	ja	ja
Kompensation	ja	ja	ja	ja
Paarvergleiche	nein	nein	nein	ja
Differenzbetrachtung	nein	nein	nein	nein
Betrachtung von Indifferenzen und Unvergleichbarkeiten	nein	nein	nein	nein
<b>Ergebnis</b>				
Ergebnis	NKV	Nutzwert	Gesamtnutzen	Gesamtnutzen
Ergebnisdarstellung	NKV	Präferenzindex	Präferenzindex	Präferenzindex

**Tabelle 12:** Methodenvergleich (2)

(vgl. Hanusch 2007/ Mühlenkamp 1994/ Zangemeister 1971/ Lillich 1992/ Bechmann 1978/ Rinza & Schmitz 1992/ Schneeweiß 1991/ Weber 1993/ Götze 2008)

## D Beispielanwendung – Infrastrukturmaßnahmen

Variante	Infrastrukturmaßnahmen		
	Typ der Maßnahme	Beschreibung	
Referenz	keine		
1	Streckenblock	1 Sbk	zwischen Beringen und Schaffhausen
		2 Sbk	zwischen Schaffhausen und Beringen
2	Streckenblock	1 Sbk	zwischen Beringen und Schaffhausen
		2 Sbk	zwischen Schaffhausen und Beringen
		1 Sbk	zwischen Herblingen und Thayngen
		1 Sbk	zwischen Gottmadingen und Singen
		1 Sbk	zwischen Thayngen und Herblingen
3	Streckenblock	1 Sbk	zwischen Beringen und Schaffhausen
		2 Sbk	zwischen Schaffhausen und Beringen
	Überholgleis für Güterzugüberholung	1 Sbk	zwischen Herblingen und Thayngen
		südl. 3. Gleis in Gottmadingen	Güterzüge rtg. Singen gehen in die Überholung
	Streckenblock	1 Sbk	zwischen Thayngen und Herblingen
7	Streckenblock	2 Sbk	zwischen Beringen und Schaffhausen
		3 Sbk	zwischen Schaffhausen und Erzingen
9	Streckenblock	2 Sbk	zwischen Beringen und Schaffhausen
		3 Sbk	zwischen Schaffhausen und Erzingen
	ESTW	ESTW Neubau	Beringen Bad
10	Streckenblock	2 Sbk	zwischen Beringen und Schaffhausen
		3 Sbk	zwischen Schaffhausen und Erzingen
		1 Sbk	zwischen Herblingen und Thayngen
		1 Sbk	zwischen Thayngen und Herblingen
		1 Sbk	zwischen Gottmadingen und Singen
	ESTW	ESTW Neubau	RWIN, RNK, RBE und RG

Tabelle 13: Übersicht über die Infrastrukturmaßnahmen der Varianten (Scheier & Böhm 2012)

## E Beispielanwendung – HDT Rechenschritte

In der Matrix  $V$  sind die Zielerfüllungsgrade der HDT dargestellt, diese stellen die Ränge dar, wenn die Alternativen bezüglich eines Kriteriums in eine Rangfolge gebracht werden.

$V$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$
$a_1$	1	5	1	1
$a_2$	1	4	2	1
$a_3$	5	2	6	1
$a_4$	5	1	5	1
$a_5$	1	3	3	5
$a_6$	1	7	4	5
$a_7$	5	6	7	5

Tabelle 14: Zielerfüllungsgrad – HDT

## F Beispielanwendung – ELECTRE Rechenschritte

R	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>4</sub>
a <sub>1</sub>	0,0000	-0,3856	-0,4987	0,0000
a <sub>2</sub>	0,0000	-0,3912	-0,3883	0,0000
a <sub>3</sub>	0,5774	-0,3968	-0,3294	0,0000
a <sub>4</sub>	0,5774	-0,4088	-0,3404	0,0000
a <sub>5</sub>	0,0000	-0,3944	-0,3717	0,5774
a <sub>6</sub>	0,0000	-0,3277	-0,3680	0,5774
a <sub>7</sub>	0,5774	-0,3329	-0,3202	0,5774

**Tabelle 15:** normierte Zustandsmatrix – ELECTRE

V	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>4</sub>
a <sub>1</sub>	0,0000	-0,2507	-0,0499	0,0000
a <sub>2</sub>	0,0000	-0,2543	-0,0388	0,0000
a <sub>3</sub>	0,1155	-0,2579	-0,0329	0,0000
a <sub>4</sub>	0,1155	-0,2657	-0,0340	0,0000
a <sub>5</sub>	0,0000	-0,2563	-0,0372	0,0289
a <sub>6</sub>	0,0000	-0,2130	-0,0368	0,0289
a <sub>7</sub>	0,1155	-0,2164	-0,0320	0,0289

**Tabelle 16:** normierte, gewichtete Zustandsmatrix – ELECTRE

C	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>	a <sub>7</sub>
a <sub>1</sub>		0,90	0,70	0,70	0,85	0,20	0,00
a <sub>2</sub>	0,35		0,70	0,70	0,85	0,20	0,00
a <sub>3</sub>	0,35	0,35		1,00	0,30	0,30	0,20
a <sub>4</sub>	0,35	0,35	0,25		0,30	0,30	0,20
a <sub>5</sub>	0,35	0,35	0,70	0,70		0,25	0,05
a <sub>6</sub>	1,00	1,00	0,70	0,70	1,00		0,70
a <sub>7</sub>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,35	

**Tabelle 17:** Konkordanzmatrix – ELECTRE

D	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>	a <sub>7</sub>
a <sub>1</sub>		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
a <sub>2</sub>	0,33		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
a <sub>3</sub>	0,06	0,03		0,00	0,25	0,39	1,00
a <sub>4</sub>	0,13	0,10	1,00		0,25	0,46	1,00
a <sub>5</sub>	0,20	0,07	1,00	1,00		1,00	1,00
a <sub>6</sub>	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00		1,00
a <sub>7</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	

Tabelle 18: Diskordanzmatrix – ELECTRE

Konkordanz-Schwelle  $c'$ : 0,5536

Diskordanz-Schwelle  $d'$ : 0,5546

Beide Schwellen werden mit *Formel (5.6)* berechnet.

F	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>	a <sub>7</sub>
a <sub>1</sub>		1	1	1	1	0	0
a <sub>2</sub>	0		1	1	1	0	0
a <sub>3</sub>	0	0		1	0	0	0
a <sub>4</sub>	0	0	0		0	0	0
a <sub>5</sub>	0	0	1	1		0	0
a <sub>6</sub>	1	1	1	1	1		1
a <sub>7</sub>	1	1	1	1	1	0	

Tabelle 19: Konkordanz-Dominanz-Matrix – ELECTRE

G	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>	a <sub>7</sub>
a <sub>1</sub>		0	0	0	0	0	0
a <sub>2</sub>	1		0	0	0	0	0
a <sub>3</sub>	1	1		1	1	1	0
a <sub>4</sub>	1	1	0		1	1	0
a <sub>5</sub>	1	1	0	0		0	0
a <sub>6</sub>	1	1	0	0	1		0
a <sub>7</sub>	1	1	1	1	1	1	

Tabelle 20: Diskordanz-Dominanz-Matrix – ELECTRE

E	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>	a <sub>7</sub>
a <sub>1</sub>		0	0	0	0	0	0
a <sub>2</sub>	0		0	0	0	0	0
a <sub>3</sub>	0	0		1	0	0	0
a <sub>4</sub>	0	0	0		0	0	0
a <sub>5</sub>	0	0	0	0		0	0
a <sub>6</sub>	1	1	0	0	1		0
a <sub>7</sub>	1	1	1	1	1	0	

Tabelle 21: Aggregierte Dominanz-Matrix – ELECTRE

## G Beispielanwendung – PROMETHEE Rechenschritte

P <sub>1</sub> (a <sub>k</sub> ,a <sub>i</sub> )		a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>	a <sub>7</sub>
		0	0	1	1	0	0	1
a <sub>1</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
a <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
a <sub>3</sub>	1	1	1	0	0	1	1	0
a <sub>4</sub>	1	1	1	0	0	1	1	0
a <sub>5</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
a <sub>6</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
a <sub>7</sub>	1	1	1	0	0	1	1	0

Tabelle 22: Quasi-Kriterium 1 – PROMETHEE

P <sub>2</sub> (a <sub>k</sub> ,a <sub>i</sub> )		a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>	a <sub>7</sub>
		-72.626.957	-73.676.113	-74.727.269	-76.996.681	-74.274.113	-61.723.106	-62.690.403
a <sub>1</sub>	-72.626.957	0,00	0,10	0,21	0,44	0,16	0,00	0,00
a <sub>2</sub>	-73.676.113	0,00	0,00	0,11	0,33	0,06	0,00	0,00
a <sub>3</sub>	-74.727.269	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00	0,00	0,00
a <sub>4</sub>	-76.996.681	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
a <sub>5</sub>	-74.274.113	0,00	0,00	0,05	0,27	0,00	0,00	0,00
a <sub>6</sub>	-61.723.106	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,10
a <sub>7</sub>	-62.690.403	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00

Tabelle 23: Lineares Kriterium – PROMETHEE



$P_3(a_k, a_l)$		$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$
		-0,68	-0,53	-0,45	-0,46	-0,51	-0,50	-0,44
$a_1$	-0,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$a_2$	-0,53	0,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$a_3$	-0,45	0,98	0,38	0,00	0,02	0,22	0,19	0,00
$a_4$	-0,46	0,97	0,27	0,00	0,00	0,13	0,10	0,00
$a_5$	-0,51	0,89	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$a_6$	-0,50	0,90	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$a_7$	-0,44	0,99	0,47	0,01	0,05	0,31	0,27	0,00

Tabelle 24: Gaußsche Kriterium – PROMETHEE

$P_4(a_k, a_l)$		$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$
		0	0	0	0	1	1	1
$a_1$	0	0	0	0	0	0	0	0
$a_2$	0	0	0	0	0	0	0	0
$a_3$	0	0	0	0	0	0	0	0
$a_4$	0	0	0	0	0	0	0	0
$a_5$	1	1	1	1	1	0	0	0
$a_6$	1	1	1	1	1	0	0	0
$a_7$	1	1	1	1	1	0	0	0

Tabelle 25: Quasi-Kriterium 2 – PROMETHEE

$\Pi$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$\varphi^+(a_i)$
$a_1$	0,0000	0,0682	0,1365	0,2840	0,1071	0,0000	0,0000	<b>0,596</b>
$a_2$	0,0813	0,0000	0,0683	0,2158	0,0389	0,0000	0,0000	<b>0,404</b>
$a_3$	0,2981	0,2379	0,0000	0,1492	0,2218	0,2186	0,0000	<b>1,126</b>
$a_4$	0,2968	0,2270	0,0000	0,0000	0,2126	0,2100	0,0000	<b>0,946</b>
$a_5$	0,1391	0,0537	0,0795	0,2270	0,0000	0,0000	0,0000	<b>0,499</b>
$a_6$	0,7905	0,7055	0,7000	0,7000	0,6502	0,0000	0,0629	<b>3,609</b>
$a_7$	0,9946	0,9472	0,7012	0,7055	0,8806	0,2270	0,0000	<b>4,456</b>
$\varphi^-(a_i)$	<b>2,600</b>	<b>2,239</b>	<b>1,685</b>	<b>2,281</b>	<b>2,111</b>	<b>0,656</b>	<b>0,063</b>	

Tabelle 26: Präferenzindex – PROMETHEE

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$
$\varphi^+(a_i)$	0,596	0,404	1,126	0,946	0,499	3,609	4,456
$\varphi^-(a_i)$	2,600	2,239	1,685	2,281	2,111	0,656	0,063
$\varphi(a_i)$	<b>-2,005</b>	<b>-1,835</b>	<b>-0,560</b>	<b>-1,335</b>	<b>-1,612</b>	<b>2,953</b>	<b>4,393</b>

Tabelle 27: Flusstabelle – PROMETHEE

$\varphi+$	0,596	0,404	1,126	0,946	0,499	3,609	4,456
0,596	I	P	xx	xx	P	xx	xx
0,404	xx	I	xx	xx	xx	xx	xx
1,126	P	P	I	P	P	xx	xx
0,946	P	P	xx	I	P	xx	xx
0,499	xx	P	xx	xx	I	xx	xx
3,609	P	P	P	P	P	I	xx
4,456	P	P	P	P	P	P	I

Tabelle 28: Ausgangsfluss – PROMETHEE

$\varphi-$	2,600	2,239	1,685	2,281	2,111	0,656	0,063
2,600	I	xx	xx	xx	xx	xx	xx
2,239	P	I	xx	P	xx	xx	xx
1,685	P	P	I	P	P	xx	xx
2,281	P	xx	xx	I	xx	xx	xx
2,111	P	P	xx	P	I	xx	xx
0,656	P	P	P	P	P	I	xx
0,063	P	P	P	P	P	P	I

Tabelle 29: Eingangsfluss – PROMETHEE

Präordnung	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$
$a_1$	I	U	xx	xx	U	xx	xx
$a_2$	U	I	xx	U	xx	xx	xx
$a_3$	P	P	I	P	P	xx	xx
$a_4$	P	U	xx	I	U	xx	xx
$a_5$	U	P	xx	U	I	xx	xx
$a_6$	P	P	P	P	P	I	xx
$a_7$	P	P	P	P	P	P	I

Tabelle 30: Präordnung – PROMETHEE

## H Beispielanwendung – ORESTE Rechenschritte

R	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$
$a_1$	2,5	5,0	1,0	2,5
$a_2$	2,5	4,0	2,0	2,5
$a_3$	6,0	2,0	6,0	2,5
$a_4$	6,0	1,0	5,0	2,5
$a_5$	2,5	3,0	3,0	6,0
$a_6$	2,5	7,0	4,0	6,0
$a_7$	6,0	6,0	7,0	6,0

Tabelle 31: Mittelränge – normierte Zustandsmatrix – ORESTE

B	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>4</sub>
a <sub>1</sub>	5,0	20,0	3,0	2,5
a <sub>2</sub>	5,0	16,0	6,0	2,5
a <sub>3</sub>	12,0	8,0	18,0	2,5
a <sub>4</sub>	12,0	4,0	15,0	2,5
a <sub>5</sub>	5,0	12,0	9,0	6,0
a <sub>6</sub>	5,0	28,0	12,0	6,0
a <sub>7</sub>	12,0	24,0	21,0	6,0

Tabelle 32: Gewichtete Mittelränge – ORESTE

H	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>4</sub>
a <sub>1</sub>	8,5	25,0	5,0	2,5
a <sub>2</sub>	8,5	23,0	12,5	2,5
a <sub>3</sub>	19,0	15,0	24,0	2,5
a <sub>4</sub>	19,0	6,0	22,0	2,5
a <sub>5</sub>	8,5	19,0	16,0	12,5
a <sub>6</sub>	8,5	28,0	19,0	12,5
a <sub>7</sub>	19,0	27,0	26,0	12,5

Tabelle 33: Doppelränge – ORESTE

Alternative	$\psi$
a1	41,0
a2	46,5
a3	60,5
a4	49,5
a5	56,0
a6	68,0
a7	84,5

Tabelle 34: Präferenzordnung – ORESTE



~PG	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>	a <sub>7</sub>
a <sub>1</sub>		2,0	10,0	19,0	6,0	0,0	0,0
a <sub>2</sub>	7,5		8,0	17,0	4,0	26,0	0,0
a <sub>3</sub>	29,5	22,0		11,0	18,5	15,5	0,0
a <sub>4</sub>	27,5	20,0	0,0		16,5	13,5	0,0
a <sub>5</sub>	21,0	13,5	14,0	23,0		0,0	0,0
a <sub>6</sub>	27,0	21,5	23,0	32,0	12,0		1,0
a <sub>7</sub>	43,5	38,0	24,0	35,0	28,5	17,5	

Tabelle 35: Prävalenzgrade – ORESTE

PG	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>	a <sub>7</sub>
a <sub>1</sub>	0,000	0,021	0,104	0,198	0,063	0,000	0,000
a <sub>2</sub>	0,078	0,000	0,083	0,177	0,042	0,271	0,000
a <sub>3</sub>	0,307	0,229	0,000	0,115	0,193	0,161	0,000
a <sub>4</sub>	0,286	0,208	0,000	0,000	0,172	0,141	0,000
a <sub>5</sub>	0,219	0,141	0,146	0,240	0,000	0,000	0,000
a <sub>6</sub>	0,281	0,224	0,240	0,333	0,125	0,000	0,010
a <sub>7</sub>	0,453	0,396	0,250	0,365	0,297	0,182	0,000

Tabelle 36: Normierte Prävalenzgrade – ORESTE

Normierungsfaktor: 0,0104

Präordnung	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>	a <sub>7</sub>
a <sub>1</sub>	I						
a <sub>2</sub>	I	I				U	
a <sub>3</sub>	P	P	I	U	U		
a <sub>4</sub>	U	U		I			
a <sub>5</sub>	P	U		U	I		
a <sub>6</sub>	P		U	P	U	I	
a <sub>7</sub>	P	P	P	P	P	P	I

Tabelle 37: Partielle Präordnung – ORESTE