

## 2 BEWERTUNGS- UND OPTIMIERUNGSVERFAHREN

### 2.1 Übersicht

In diesem Kapitel werden die theoretischen und mathematischen Grundlagen von Bewertungs- und Optimierungsverfahren dargestellt. Das Bewertungssystem bildet die Grundlage für die nachfolgenden Bewertungen und Optimierungen der Grundwasserbewirtschaftung. Aus diesem Grund wird zunächst eine allgemeine Übersicht über bekannte und in der Praxis erprobte Bewertungsverfahren gegeben. Diese Bewertungsverfahren werden im Hinblick auf die Einbindung in ein Optimierungssystem für die Grundwasserbewirtschaftung überprüft. Aus den verfügbaren Bewertungsverfahren wird dasjenige als Bewertungssystem ausgewählt, das die Aufgabenstellung in optimaler Weise operationalisiert. Die Methodik dieses Bewertungsverfahrens wird im Anschluss ausführlich dargestellt.

Das Bewertungssystem ist die Grundlage für die Optimierung der Grundwasserbewirtschaftung. Es ist daher notwendig, das Bewertungssystem in einen Algorithmus einzubinden, der die Optimierungsgrößen selbständig intelligent variiert und optimiert. Die mathematischen Grundlagen des gewählten Optimierungsprogramms werden ebenfalls ausführlich diskutiert.

### 2.2 Begriffsdefinitionen

In den folgenden Kapiteln wird begrifflich nach **Bewertungsverfahren** und **Bewertungssystem** unterschieden. Dabei wird der Begriff Bewertungsverfahren allgemein für Verfahren verwendet, die der Entscheidungsfindung oder -vorbereitung dienen. Der Begriff Bewertungssystem bezieht sich speziell auf das im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelte System zur Optimierung des Gebietswasserhaushalts, das auf der Grundlage eines Bewertungsverfahrens entwickelt wird.

Weiterhin werden in diesem Kapitel die Begriffe Bewertungsgröße, Zielgröße und Optimierungsgröße eingeführt. Diese sind wie folgt definiert:

- **Bewertungsgrößen:** Größen, die den Einfluss der Optimierungsgrößen auf Natur (Ökologie), Landwirtschaft und/oder Wasserversorgung beschreiben.
- **Zielgrößen:** Optimum der Bewertungsgrößen. Bei Erreichen der Zielgrößen liegen optimale Bedingungen für Naturschutz, Landwirtschaft und/oder Wasserversorgung vor.
- **Optimierungsgrößen:** Durch Variation der Optimierungsgrößen lassen sich die Bewertungsgrößen so verändern, dass nach Möglichkeit die Zielgrößen erreicht werden.

### 2.3 Übersicht Bewertungsverfahren

Bewertungsverfahren dienen der Entscheidungsfindung bzw. deren Vorbereitung. In allen Bewertungsverfahren werden verschiedene Alternativen auf ihre Auswirkungen hin überprüft

und schließlich die beste Alternative mit den meisten positiven bzw. den wenigsten negativen Auswirkungen ausgewählt. In aller Regel haben die Alternativen eine sehr große Anzahl unterschiedlichster Auswirkungen auf die verschiedensten Bereiche, aus diesem Grund muss zu Beginn des Bewertungsprozesses die Anzahl der schließlich zur Entscheidung herangezogenen Parameter auf wenige entscheidungsrelevante Bewertungsgrößen reduziert werden. Nur so ist es möglich, den Überblick zu bewahren und zu einer rationalen und nachvollziehbaren Entscheidung zu gelangen.

Die Bewertung von wasserwirtschaftlichen Projekten begann in Deutschland Ende der 60er Jahre. Zu jener Zeit wurden finanzmathematische Rechenmodelle mit rein ökonomischen Zielfunktionen zur Beurteilung von Investitionsmaßnahmen auf wasserwirtschaftliche Projekte übertragen. Parallel zur Weiterentwicklung der monetären Bewertungsverfahren entstand ab ca. 1970 eine zweite Gruppe von Entscheidungsmodellen mit mehrdimensionalen Zielsystemen. Im folgenden sind die bedeutendsten Bewertungsverfahren zur Beurteilung wasserwirtschaftlicher Projekte zusammengestellt (RICKERT et al., 1993):

Beim Kostenvergleich werden nur die Kosten der Alternativen verglichen. Dies setzt allerdings die Gleichheit der Nutzen und sonstigen nicht-monetären Wirkungen (Sozialkosten) voraus. Abhilfe wurde mit der Erweiterten Kostenvergleichsrechnung geschaffen. Hier lassen sich auch Alternativen vergleichen, die unterschiedliche Nutzen erzielen. Der monetär erfassbare Differenznutzen verschiedener Alternativen wird dabei von den Kosten abgezogen.

Die Kosten-Nutzen-Analyse entwickelte sich aus den einfachen Kosten- und Nutzenvergleichsrechnungen und stellt das höchstwertige monetäre Bewertungsverfahren dar. In der Kosten-Nutzen-Analyse werden sämtliche monetär bewertbare Kosten und Nutzen in Währungseinheiten beschrieben und so miteinander vergleichbar gemacht. Kosten und Nutzen, die bei Dritten entstehen, können als sog. externe Effekte oder soziale Kosten und Nutzen berücksichtigt werden. Die Kosten-Nutzen-Analyse hatte für die Bewertung wasserwirtschaftlicher Projekte in der Vergangenheit eine große Bedeutung. Sie hat allerdings den Nachteil, dass monetär nicht bewertbare Größen (z.B. Artenvielfalt, Grundwasserstand, Wasserqualitätsparameter usw.) nicht berücksichtigt werden können. Solche Projektwirkungen werden meistens nur verbal beschrieben oder müssen über aufwändige Befragungen monetarisiert werden. Im speziellen Fall des Umweltschutzes führt die Kosten-Nutzen-Analyse meist zu einer Scheinrationalität bei der Entscheidungsfindung, da die großen Unsicherheiten bei der quantitativen Risikoabschätzung und Wertungsprobleme bei Gütern ohne Marktpreis keine eindeutigen rational begründete Ergebnisse zulassen (MURSWIEK, 2002).

Das 4-Konten-Modell stellt eine ökonomische Methodik zur Bilanzierung von Umwelt- und Ressourcenkosten dar. Methodisch gesehen ist es eine Weiterentwicklung der Kosten-Nutzen-Analyse (QUADFLIEG et al., 1999). Dabei werden alle Wirkungen eines Vorhabens nach den vier Konten Gesamtwirtschaftliche Effizienz, Umweltqualität, Regionalentwicklung und Soziales Wohlbefinden ermittelt, beschrieben und bewertet. Innerhalb eines jeden Kontos werden die Wirkungen bilanziert, wobei dies nicht notwendigerweise in Geldeinheiten geschehen muss. Eine eindeutige Rangfolge für verschiedene Projektalternativen lässt sich

aus dem 4-Konten-Modell nicht ableiten, es eignet sich somit nicht für Optimierungsprobleme.

Wie bei der Nutzwertanalyse (s. unten) werden bei der Kosten-Wirksamkeits-Analyse die nicht-monetären Wirkungen in einem Ordnungsindex zusammengefasst, der anschließend den monetär bewertbaren Kosten gegenübergestellt wird. Nicht-monetär bewertbare Maßnahmenwirkungen können beispielsweise mittels der Nutzwertanalyse bewertet werden, während die monetär bewertbaren Wirkungen mit Hilfe der Kostenvergleichsrechnung oder der Kosten-Nutzen-Analyse bewertet werden. Problematisch stellt sich bei der Kosten-Wirksamkeits-Analyse dar, wie die monetären und nicht-monetären Größen zueinander ins Verhältnis gesetzt werden.

Die Nutzwertanalyse ist ein multikriterielles, nicht-monetäres Bewertungsverfahren, welches in der Lage ist, verschiedene Kriterien mit unterschiedlichen Dimensionen vergleichbar zu machen. Multikriterielle Bewertungsverfahren erlangen dann Bedeutung, wenn der Entscheidungsträger verschiedene Ziele bei seiner Entscheidung zu berücksichtigen hat. Bei der Nutzwertanalyse werden alle Wirkungen, soweit dies methodisch möglich ist, in einem dimensionslosen Ordnungsindex, dem sog. Nutzwert, zusammengefasst. Wegen ihres strengen Formalismus' und der einfachen Nachvollziehbarkeit findet die Nutzwertanalyse der 1. Generation (ZANGEMEISTER-Version) in der Praxis häufig Anwendung. Der Vergleich verschiedener Alternativen liefert eine eindeutige Rangfolge der Präferenz, die über den dimensionslosen Gesamtnutzwert ausgedrückt wird. Häufig sind aber auch Bewertungssysteme zu finden, die an den Formalismus der Nutzwertanalyse angelehnt sind. Diese werden als „nutzwertanalytische Ansätze“ bezeichnet.

Das Composite Programming stellt eine Fortentwicklung der Nutzwertanalyse dar. Es greift einen Hauptkritikpunkt an der Nutzwertanalyse (volle Kompensation von Teilnutzwerten) auf und begegnet diesem durch die Einführung eines Verstärkungsfaktors, der die Kompensierbarkeit von Teilnutzen einschränkt. Das Composite Programming findet insbesondere dort Anwendung, wo ein starker Konflikt zwischen einzelnen Teilnutzen existiert und eine Mittelwertbildung zur Ermittlung des Gesamtnutzwertes nicht gerechtfertigt erscheint. Wie die Nutzwertanalyse liefert auch das Composite Programming eine eindeutige Präferenz-Reihenfolge, aus der sich die beste Alternative ableiten lässt.

Der paarweise Vergleich von Alternativen kann angewendet werden, wenn bereits eine überschaubare Anzahl von Projektalternativen vorliegt. Die Alternativen werden hinsichtlich jedes Einzelkriteriums paarweise miteinander verglichen. Dabei wird keine eindeutige Rangfolge, sondern lediglich die Dominanz einer Alternative über eine andere ermittelt. Bekannte Vertreter dieser Art der Bewertung sind das ELECTRE-, das NAIADE- und das PROMETHEE-Verfahren. Mit Hilfe von Konkordanz- und Diskordanzmatrizen nähert man sich schrittweise der überlegenen Alternative, indem Schwellenwerte nach und nach gelockert werden. Da beim paarweisen Vergleich keine Rangfolge der Alternativen ermittelt wird, ist es für Optimierungen ungeeignet.

Die Ökologische Risikoanalyse stellt kein multikriterielles Bewertungsverfahren im eigentlichen Sinn dar. Das Verfahren, welches vor allem in Umweltverträglichkeitsprüfungen angewandt wird, wurde für die Abschätzung von ökologischen Beeinträchtigungen konzipiert. Nicht-ökologische Wirkungen aber auch ökologische Verbesserungen sind ohne eine Modifizierung der Begrifflichkeiten nicht integrierbar (TGU, 2002). Während die ökologische Risikoanalyse bei Untersuchungen von Beeinträchtigungen des Naturhaushaltes wie z.B. beim Straßenbau durchaus Vorteile aufweist, ist sie durch den gering ausgeprägten Formalismus nur bedingt für eine Bewertung mit weitergehenden Maßnahmenwirkungen geeignet.

Auf weitere Bewertungsverfahren wie beispielsweise Dominanzverfahren, Rangaggregation, Portfolios oder neuronale Netze soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Sie werden umfassend in SCHUH (2001) beschrieben und diskutiert. In den vergangenen Jahren ist eine Vielzahl weiterer multikriterieller Bewertungsverfahren entstanden, so dass es für den Anwender mitunter schwierig ist, den Überblick zu wahren (TECLE, 1992). Die Entscheidung, welches Bewertungsverfahren zum Einsatz kommt, kann letztendlich nur anhand der konkreten Fragestellung getroffen werden, die es zu beantworten gilt. Jedes der genannten Bewertungsverfahren besitzt Vor- und Nachteile, Stärken und Schwächen. Es existiert kein Bewertungsverfahren, das in allen denkbaren Entscheidungssituationen uneingeschränkt anwendbar ist. Ein wichtiger Schritt bei der Bewertung ist daher die Auswahl des am besten an die Fragestellung angepassten Bewertungsverfahrens. Die Auswahl des zum Zuge kommenden Bewertungsverfahrens stellt bereits ein Meta-Entscheidungsproblem dar (SCHUH, 2001).

### **2.3.1 Eignung von Bewertungsverfahren zur Optimierung der Grundwasserbewirtschaftung**

Mit der Optimierung der Grundwasserbewirtschaftung ist das Ziel der Umsetzung einer nachhaltigen Entwicklung verbunden. SCHUH (2001) überprüft in seiner Arbeit 18 monetäre und multikriterielle Bewertungsverfahren im Hinblick auf ihre Eignung zur Umsetzung einer nachhaltigeren Entwicklung:

- Dominanzverfahren
- Künstliche neuronale Netze
- Lexikographische Ordnung
- Dominierende Kriterien
- Portfolios
- Kostenwirksamkeitsanalyse
- Goal-Programming
- Kostenvergleichsrechnung der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)
- Rangaggregation
- Direct Choice
- Anspruchsniveaus
- Aspektweise iterative Bewertung
- Verbal-argumentative Verfahren
- Kosten-Nutzen-Analyse
- Nutzwertanalyse
- Prävalenzverfahren
- Analytic Hierarchy Process (AHP)
- Multi Attribute Utility Theory (MAUT)

Dabei bewertet er die Bewertungsverfahren nach neun Kriterien (Tab. 2.1).

Tab. 2.1: Anforderungen an Bewertungsverfahren zur Umsetzung einer nachhaltigeren Entwicklung (nach SCHUH, 2001)

Anforderung	Konkretisierung
Vollständigkeit	Werden als Voraussetzung für aussagefähige Ergebnisse alle relevanten Kriterien der Alternativen erfasst? Grundsätzliche Voraussetzung hierfür ist, dass vor Anwendung eines Entscheidungsverfahrens bei der Lösung der Ansatzproblematik alle relevanten Kriterien ermittelt und erfasst werden. Dies stellt gleichzeitig eine Voraussetzung für die Strukturähnlichkeit von Modell und Realität dar.
Transparenz, Nachvollziehbarkeit, Objektivität	Sind die Regeln der Vorgehensweise offengelegt, klar formuliert und damit auch das Ergebnis und dessen Zusammensetzung nachvollziehbar und überprüfbar? Die Nachvollziehbarkeit hat direkten Einfluss auf die Akzeptanz des Verfahrens bei Anwendern und Stakeholdern und stellt damit eine unabdingbare Voraussetzung für dessen Anwendung dar.
Genauigkeit und Validität	Wird eine angemessene Lösungsqualität erreicht? Wird das gesteuert, was zu steuern beabsichtigt wurde (Effektivität) ?
Reliabilität	Wird zuverlässig gesteuert, d.h. führt auch eine mehrmalige Anwendung zum gleichen Ergebnis? Wird das Ergebnis von allen gleich verstanden?
kein Einfluss neuer Alternativen auf die bisherige Bewertung	Bleibt die Bewertung bei neu hinzukommenden Alternativen stabil? Ist dies nicht der Fall, muss bei neu hinzukommenden Alternativen die gesamte Bewertung neu durchgeführt werden.
Offenheit der Modellstrukturen, Integrierbarkeit neuer Kriterien	Ist das Verfahren anpassbar an verschiedene Anwendungssituationen, Veränderungen der Ziele, Rahmenbedingungen oder Präferenzen und können neue relevante Entscheidungskriterien, die sich erst im Laufe der Entscheidungsvorbereitung ergeben, in das gerade angewendete Bewertungskonzept integriert werden?
Praktikabilität und Wirtschaftlichkeit	Steht der Aufwand zur Entscheidungsfindung in einem angemessenen Verhältnis zu den erwarteten Ergebnissen (Effizienz)? Ist das Konzept praktisch anwendbar und beherrschbar von Entscheidungsträgern, d.h. auch Nicht-Experten hinsichtlich der methodischen Vorgehensweise? Für eine nachhaltigere Entwicklung und eine möglichst breite Anwendung bei einer Vielzahl von Entscheidungsträgern und Entscheidungen kommt diesem Kriterium eine hohe Bedeutung zu.
Eindeutigkeit	Folgt aus dem Verfahren eine eindeutige Aussage, welche Handlungsalternative die beste ist?
erforderlicher Dateninput	Liegen die Inputdaten in der benötigten Skalierung vor? Sind Präferenzaussagen der Entscheidungsträger in der benötigten Genauigkeit zu erwarten?

Ergebnis: Die Nutzwertanalyse stellt das einzige der untersuchten Bewertungsverfahren dar, das mit einer positiven Bewertung in allen Punkten aufwarten kann. Sie erscheint daher in besonderem Maße geeignet zur Umsetzung einer nachhaltigeren Entwicklung und zur Anwendung bei der Optimierung der Grundwasserbewirtschaftung.

TECLE (1992) untersucht 15 multikriterielle Bewertungsverfahren auf ihre Eignung bei Ressourcenmanagementproblemen in Wassereinzugsgebieten:

- Analytic Hierarchy Process
- Composite Programming
- Compromise Programming
- Cooperative Game Theory
- Displaced Ideal
- ELECTRE

- Evaluation and Sensitivity Analysis Program
- Goal-Programming
- Multi Attribute Utility Theory
- Multicriterion Q-Analysis
- Probabilistic Tradeoff Development Method
- Zionts-Wallenius
- Step Method
- Surrogate Worth Trade-off
- PROMETHEE

Er bewertet dabei nach 24 Kriterien, die er in die vier Gruppen zusammenfasst.

Tab. 2.2: *Kriterien für den Einsatz multikriterieller Bewertungsverfahren für Managementprobleme in Wassereinzugsgebieten (TECLE, 1992)*

Kriteriengruppe	Spezifizierung
entscheidungsträger-/ bearbeiterbezogene Kriterien	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wie viel Wissen wird vom Entscheidungsträger verlangt, um die Technik zu verstehen?</li> <li>• Wie groß ist der Wunsch des Entscheidungsträgers nach Interaktion?</li> <li>• Wie viel Zeit des Entscheidungsträgers nimmt die Technik in Anspruch?</li> <li>• Wie sachkundig muss der Entscheidungsträger sein, um die Technik zu nutzen?</li> <li>• Welcher Grad der Qualifikation des Bearbeiters ist erforderlich, um die Technik anzuwenden?</li> </ul>
technikbezogene Kriterien	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berechnungsdauer</li> <li>• Anzahl der benötigten Parameter</li> <li>• Anwendungsfreundlichkeit</li> <li>• erfahrungsgemäße Rechnerbelastung</li> <li>• Effektivität der Technik</li> <li>• Programmieraufwand</li> </ul>
problembezogene Kriterien	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Können Fragestellung mit nicht-numerischen Daten gelöst werden (z.B. Ästhetik)?</li> <li>• Kann aus einer begrenzten Anzahl von Alternativen die beste ausgewählt werden?</li> <li>• Können nicht-lineare Probleme gelöst werden?</li> <li>• Können großräumige und komplexe Probleme behandelt werden?</li> <li>• Ist die Anzahl der berücksichtigten Alternativen begrenzt?</li> <li>• Können die für Wassereinzugsgebiete typischen dynamischen Probleme gelöst werden?</li> <li>• Können ganzzahlige Fragestellungen (z.B. Anwachsen einer Population) behandelt werden?</li> </ul>
lösungsbezogene Kriterien	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Konsistenz der erzielten Lösungen</li> <li>• Robustheit der Ergebnisse bei Änderungen der Parameterwerte</li> <li>• Nützlichkeit der Ergebnisse für den Entscheidungsträger</li> <li>• Zuverlässigkeit der Ergebnisse für den Entscheidungsträger</li> <li>• Dauerhaftigkeit der erzielten Lösung</li> <li>• Anzahl der pro Iteration erscheinenden Zwischenlösungen</li> </ul>

In einem zweiten Schritt werden die vier Kriteriengruppen in Form einer Bewertungsmatrix zueinander ins Verhältnis gesetzt und eine Rangfolge der untersuchten Bewertungsverfahren ermittelt. TECLE kommt zu dem Ergebnis, dass Compromise Programming und Composite Programming die geeignetsten Bewertungsverfahren zur Bewältigung von Managementproblemen in Wassereinzugsgebieten darstellen.

### 2.3.2 Gewähltes Bewertungsverfahren

Compromise Programming ist methodisch gesehen eine Weiterentwicklung der Nutzwertanalyse, Composite Programming eine Erweiterung von Compromise Programming (BÁRDOSSY et al., 1985).

**Aus diesem Grund wird Composite Programming als Bewertungsverfahren bei der Optimierung der Grundwasserbewirtschaftung ausgewählt und stellt damit die Grundlage für die weiteren Auswertungen dar. Mit Composite Programming steht ein Bewertungsverfahren zur Verfügung, das im Hinblick auf die vorliegende Fragestellung wesentliche Vorteile gegenüber anderen Bewertungsverfahren aufweist:**

- **Klare Strukturierung:** das Problem wird in einzelne Teilschritte zerlegt, die auch vom Nicht-Fachmann nachvollzogen werden können (Transparenz des Verfahrens).
- **Vollständigkeit:** alle relevanten Bewertungskriterien (seien sie numerisch oder nicht-numerisch) können im System adäquat berücksichtigt werden.
- **Robustheit der Ergebnisse:** wiederholte Bewertungen derselben Alternative liefern stets dasselbe Ergebnis.
- **Kein Einfluss neuer Alternativen:** die Bewertung weiterer Alternativen hat keinen Einfluss auf das Bewertungssystem selbst oder die Bewertungen bereits untersuchter Alternativen.
- **Einfachheit:** die Berechnungsvorschrift und das zugrundeliegende Zielsystem sind relativ einfach und können in einem gängigen Tabellenkalkulationsprogramm verarbeitet werden. Die Anforderungen an den Entscheidungsträger und den Bearbeiter (Vorwissen, Präferenzartikulation) sind als gering bis mittel zu bezeichnen.
- **Sehr gute Anpassungsfähigkeit** des Verfahrens an das Problem der Grundwasserbewirtschaftung:
  - eignet sich zur Lösung nicht-linearer Bewertungsprobleme,
  - eignet sich für großräumige und komplexe Bewertungsprobleme,
  - eignet sich zu Bewertung dynamischer Probleme (TECLE, 1992).

Im folgenden wird zunächst noch einmal auf die Methodik der Nutzwertanalyse eingegangen und anschließend darauf aufbauend der Composite Programming-Ansatz erläutert.

## 2.4 Nutzwertanalyse

### 2.4.1 Grundlagen

Die Nutzwertanalyse in ihrer klassischen Form (Nutzwertanalyse der 1. Generation [NWA I], Standardversion) entstammt den Ingenieurwissenschaften und wurde Anfang der 70er Jahre von ZANGEMEISTER in Deutschland verbreitet (SCHOLLES, 2000). Die ursprünglich in den USA entwickelte Nutzwertanalyse sollte die Probleme lösen, die sich in der Kosten-Nutzen-Analyse durch deren rein monetäre Ausrichtung ergaben. Zangemeister definiert die Nutzwertanalyse folgendermaßen (aus RICKERT, 1993): „Nutzwertanalyse ist die Analyse einer Menge komplexer Handlungsalternativen mit dem Zweck, die Elemente dieser Menge

entsprechend den Präferenzen des Entscheidungsträgers bezüglich eines multidimensionalen Zielsystems zu ordnen. Die Abbildung dieser Ordnung erfolgt durch die Angabe der Nutzwerte (Gesamtwerte) der Alternativen.“

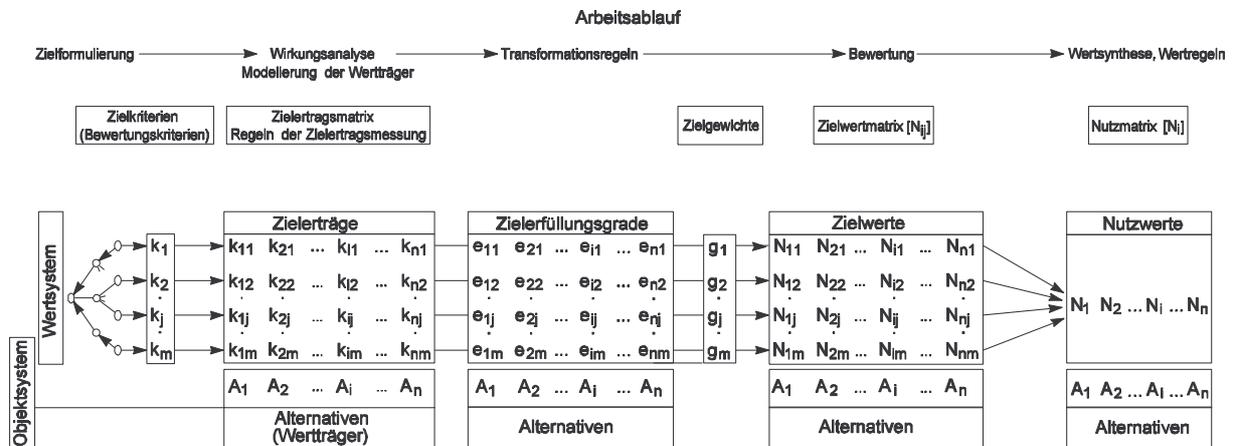


Abb. 2.1: Strukturmuster und Arbeitsablauf der Nutzwertanalyse (nach MANIAK, 2000)

## 2.4.2 Zielsystem

Aus der Definition von ZANGEMEISTER ergibt sich, dass zunächst ein problemadäquates Zielsystem zu erstellen ist, welches die Bewertungskriterien in geeigneter Form logisch aggregiert. Das Zielsystem ist so zu strukturieren, dass die aggregierten Nutzwerte innerhalb einer zusammengehörenden (funktionalen) Gruppe auf einer beliebigen Zielebene jeweils die Bewertung für das Kriterium in der nächsthöheren Ebene ergeben. Es bietet sich daher an, das Zielsystem hierarchisch zu strukturieren. ZANGEMEISTER (1973) erkannte bereits die enorme Bedeutung eines modell- und situationsgerechten Zielsystems als Grundlage für die Ermittlung vernünftiger Nutzwertanalyseergebnisse. Mit der Auffächerung von Zielen, die auf den oberen Ebenen meist allgemeine und nicht quantifizierbare Leitsätze darstellen, ist eine zunehmende Messbarkeit der Zielerträge verbunden. Der Detaillierungsgrad muss dabei jedoch in Relation mit den für die Entscheidungsfindung verfügbaren Datengrundlagen gesehen werden. Ein zu starker Detaillierungsgrad des Zielsystems ist insbesondere dann abzulehnen, wenn an anderer Stelle wesentliche entscheidungsrelevante Tatbestände übersehen werden. „Ein grobes, dafür aber vollständiges Zielsystem ist als Bewertungsgrundlage einem detailliert, aber unvollständig formulierten Zielsystem im Hinblick auf die Gefahr einer möglichen Fehlentscheidung in jedem Fall vorzuziehen.“ (ZANGEMEISTER, 1973)

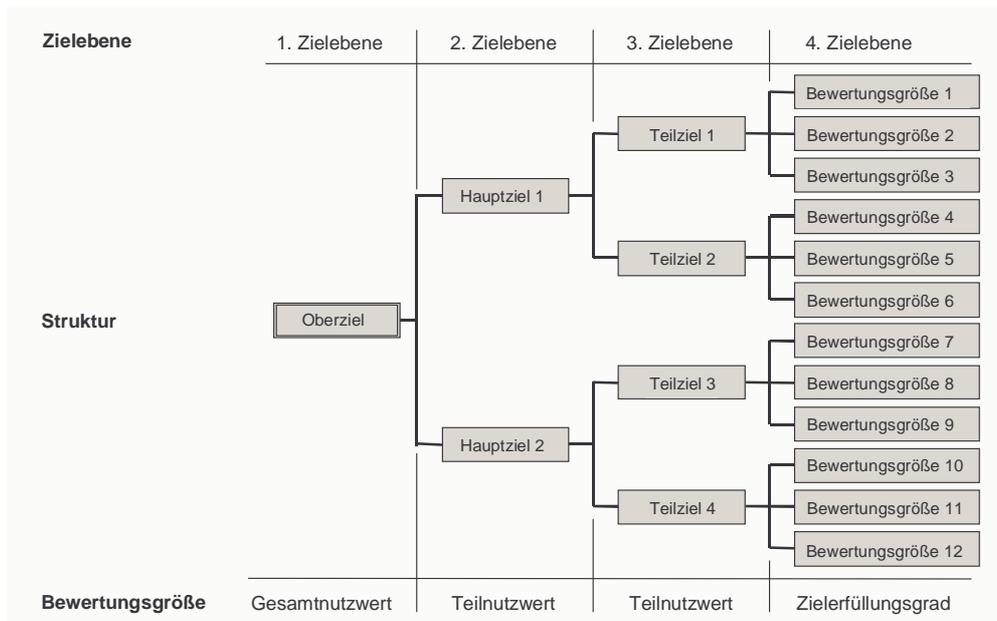


Abb. 2.1: Hierarchisches Zielsystem (Baumstruktur) von Ober-, Haupt-, Teilzielen und Bewertungskriterien (nach RICKERT et al., 1993; verändert)

Die Aggregation der Zielerfüllungsgrade über Teilnutzwerte zum Gesamtnutzwert erfolgt bei der Nutzwertanalyse schrittweise von der untersten bis zur obersten Zielebene (in Abb. 2.1 also zunächst von der 4. zur 3. Zielebene, dann von der 3. zur 2. u.s.w.) entsprechend Gl. 2.1. Die einem übergeordneten Ziel auf der nächst tieferen Zielebene zugeordneten Ziele werden auch als *funktionelle Gruppe* bezeichnet.

$$N = \sum_{j=1}^n g_j \cdot e_j \tag{Gl. 2.1}$$

mit:

- N = Teil-/Gesamtnutzwert [-]
- e = Zielerfüllungsgrad/Teilnutzwert [-]
- g = Gewichtungsfaktor [-]
- j = Indikatoren (Bewertungsgrößen)
- n = Gesamtzahl der berücksichtigten Indikatoren j

Bei jedem Zielebenenwechsel wird  $N \rightarrow e$  und die Berechnung entspr. Gl. 2.1 mit den über den Baum verknüpften Unterzielen erneut durchgeführt – solange, bis der Gesamtnutzwert auf Zielebene 1 bestimmt ist. So berechnet sich beispielsweise der Teilnutzwert des Teilziels 3 in Abb. 2.1 nach:

$$N_{\text{Teilziel 3}} = g_{BG7} \cdot e_{BG7} + g_{BG8} \cdot e_{BG8} + g_{BG9} \cdot e_{BG9} \tag{Gl. 2.2}$$

Nach Umwandlung von  $N_{\text{Teilziel 3}}$  zu  $e_{\text{Teilziel 3}}$  berechnet sich der Teilnutzwert für das Hauptziel 2 gemäß:

$$N_{\text{Hauptziel 2}} = g_{\text{Teilziel 3}} \cdot e_{\text{Teilziel 3}} + g_{\text{Teilziel 4}} \cdot e_{\text{Teilziel 4}} \tag{Gl. 2.3}$$

Der Gesamtnutzwert ergibt sich schließlich nach Umwandlung von  $N_{\text{Hauptziel 2}}$  zu  $e_{\text{Hauptziel 2}}$  gemäß der Gleichung:

$$N = g_{\text{Hauptziel 1}} \cdot e_{\text{Hauptziel 1}} + g_{\text{Hauptziel 2}} \cdot e_{\text{Hauptziel 2}} \quad \text{Gl. 2.4}$$

Bei der Aufstellung des Zielsystems sind zwei wichtige Bedingungen zu berücksichtigen:

1. zwischen den Bewertungskriterien dürfen keine Nutzenabhängigkeiten existieren und
2. die Anzahl der verwendeten Bewertungskriterien soll so gering wie möglich gehalten werden ( $\leq 10$ ; TGU, 2002), es gilt die KISS-Forderung: Keep It Small and Simple.

### 2.4.3 Zielfunktionen

Die Transformation von Zielerträgen in Zielerfüllungsgrade geschieht durch die Zielfunktionen. Dabei werden die dimensionsbehafteten Zielerträge der Bewertungskriterien (z.B. in Meter, mg/l oder €) in dimensionslose Werte transformiert. Im Regelfall wird der Zielerfüllungsgrad kardinal skaliert, er geht also von 0 (Ziel nicht erfüllt) bis 1 (Ziel voll erfüllt) (RIKERT, 1993). Der Zielerfüllungsgrad drückt aus „in welchem Umfang ein gegebener Zielertrag dem durch das Wertsystem gesetzten Bewertungsmaßstab entspricht und wie weit ein bestimmtes Ziel aus Sicht des Bewerter erreicht ist“ (MANIAK, 2001). Um die jeweiligen Zielfunktionen festlegen zu können, müssen die Spannweiten der verschiedenen Zielerträge bekannt sein.

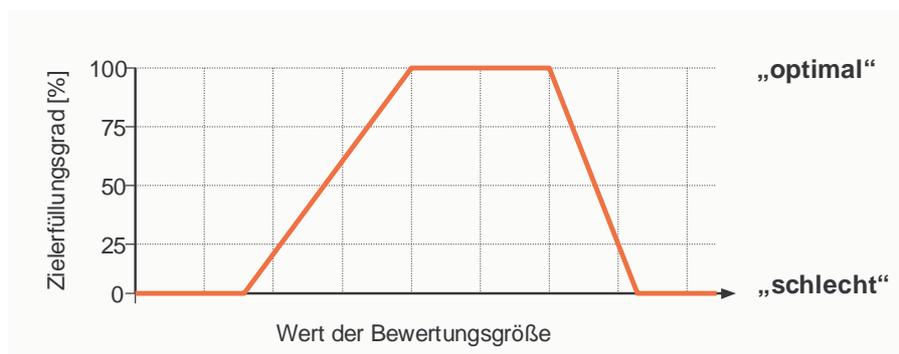


Abb. 2.1: Beispiel für eine Zielfunktion

Die Festlegung von Zielfunktionen ist mitunter komplex. Realen Werten werden durch die Zielfunktionen Wertaussagen zugeordnet. Werteeinschätzungen sind stets subjektiv und unterscheiden sich von Betrachter zu Betrachter. Der Bearbeiter trägt daher eine hohe Verantwortung, was die Objektivität des Bewertungssystems betrifft. Er muss in der Lage sein, die Bewertungen, die er bestimmten Zahlenwerten zuordnet, nachvollziehbar begründen zu können. Zielfunktionen können prinzipiell folgende Verläufe des Zielerfüllungsgrads aufweisen (MANIAK, 2001):

- Wertkonstanz
- exponentielle oder geradlinige Wertzunahme bzw. –abnahme mit wachsendem Zielertrag
- Zu- oder Abnahme bis zur Wertsättigung und anschließende Ab- oder Zunahme

Es sind auch andere monoton wachsende oder fallende Verläufe der Zielfunktion denkbar, doch fehlt meist das Wissen um den eindeutigen Zusammenhang zwischen Zielertrag und

Zielerfüllungsgrad in den Übergangsbereichen zwischen der oberen und unteren Wertsättigung. In den meisten Fällen wird daher ein linearer Verlauf der Funktion bis zur Wertsättigung unterstellt. Diese Vereinfachung ist oft zweckmäßig, da eine detaillierte Untersuchung zum Verlauf der Zielfunktion im Übergangsbereich in keinem Verhältnis zur Verbesserung der Aussagekraft des Gesamtsystems steht.

Die Zielerträge weisen oftmals auch eine räumliche Variabilität auf (z.B. sich ändernder Grundwasserstand, wechselnde Bewuchshöhe, unterschiedliche Flächennutzung usw.). Um der Variabilität Rechnung zu tragen, müssen in diesen Fällen unterschiedliche Zielfunktionen für die Teilflächen des Untersuchungsgebiets definiert werden. Während eine bestimmte Piezometerhöhe in einigen Teilbereichen beispielsweise die optimale Zielerfüllung darstellt, kann sie in anderen Gebieten bereits im Ausschlussbereich liegen. Wie groß die einzelnen Teilbereiche sein sollen, hängt davon ab, wie detailliert die Flächendaten, aus denen sich die Zielfunktionen ableiten, vorliegen und wie genau das Bewertungssystem sein soll. Ein weiteres Entscheidungskriterium stellt die Rechnerleistung dar.

Um letztlich die flächenhaft ausgeprägten mit den punktuell ausgeprägten Zielerträgen zu der Bewertung eines Teilziels zusammenfassen zu können, ist es notwendig, die flächigen Zielerträge innerhalb einer Einheit zusammenzufassen. Bei der Zusammenfassung gehen die flächigen Informationen verloren. Gerade diese können jedoch bei der Identifizierung von Problembereichen eine wichtige Rolle spielen. Daher sollten die flächigen Informationen unbedingt gespeichert und in einem GIS zusätzlich zur Teilzielbewertung visualisiert werden.

#### **2.4.4 Gewichtung**

Zielkriterien können für die Bestimmung der Teilnutzwerte von unterschiedlicher Bedeutung sein. Sie müssen daher mit Gewichten versehen werden, welche der relativen Bedeutung des einzelnen Kriteriums innerhalb der Gruppe entsprechen (ZANGEMEISTER, 1973).

Die Festlegung der Gewichtungen – so einsichtig wie die Notwendigkeit ihres Einsatzes für die Ermittlung eines rationalen Analyseergebnisses auch ist – stellt ein zentrales Problem aller Bewertungsmethoden in Bezug auf die Objektivität der Bewertung dar. Gewichtungsfaktoren sind stets subjektiv und von der Erfahrung und den Vorkenntnissen des Bearbeiters abhängig. Die „richtige“ Festlegung würde die Allwissenheit des Bearbeiters voraussetzen. Dennoch bestimmen sie durch die Multiplikation mit dem Zielertrag in entscheidendem Maße die Größe des (Teil-/Gesamt-)Nutzwertes und stellen daher eine wichtige Vorentscheidung dar (HORSCH et al., 2001). Bei der Festlegung der Gewichtungsfaktoren ist also besondere Aufmerksamkeit geboten und wenn immer möglich sollten sie von Spezialisten in ihren Teildisziplinen vergeben werden, die über ein umfassendes Verständnis für die Zusammenhänge verfügen.

Von der formalen Seite her ist der Umgang mit den Gewichtungsfaktoren unproblematisch. Die Gewichtungsfaktoren werden innerhalb einer jeden funktionellen Gruppe normiert, so dass die Summe aller Gewichte innerhalb einer Gruppe stets gleich eins ist (Gl. 2.5).

$$\sum_{j=1}^n g_j = 1$$

Gl. 2.1

mit:

g = Gewichtungsfaktor [-]  
j = Indikatoren (Bewertungsgrößen)

### 2.4.5 Ausschlusswerte

Bei der Anwendung der Nutzwertanalyse ist es üblich, Ausschlusswerte für die Bewertung von Alternativen zu definieren, also Werte, ab denen eine Alternative nicht mehr akzeptabel ist. Die Festlegung solcher Ausschlusswerte dient dem Zweck, nur realistische bzw. realisierbare Alternativen miteinander zu vergleichen, alle anderen Alternativen werden aus der weiteren Bewertung ausgeschlossen. Im Rahmen des hier dargestellten Bewertungssystems müssen Ausschlusswerte für Grundwasserentnahmemengen der Fassungsanlagen definiert werden. Damit wird der Rahmen vorgegeben, in dem die Optimierung stattfinden kann. Ausschlusswerte können sich aus technischen Grenzen (z.B. Mindestdrehzahl der Pumpen, Rohrdurchmesser, Aufbereitungskapazität u.s.w.), gesetzlichen Vorgaben (z.B. wasserrechtlich genehmigte Maximalentnahme) oder sonstigen Randbedingungen (z.B. Brunnenergiebigkeit, Frischhaltemengen) ergeben.

Die Grundwasserentnahmen an den Brunnen stellen die Optimierungsgrößen dar. Durch Variation der Optimierungsgrößen sollen die Bewertungsgrößen in ihre Zielgrößen überführt werden. Aus diesem Grund sind weitergehende Überlegungen notwendig, innerhalb welcher Bandbreite die Grundwasserentnahmen variiert werden können. Dabei ist zwischen der Gesamtentnahme, die an allen Brunnen zusammen entnommen wird, und den Einzelentnahmen pro Brunnen zu unterscheiden.

Dies soll an einem Beispiel erläutert werden: Zur Wassergewinnung stehen drei Brunnen zur Verfügung, die alle betrieben werden sollen. Jeder dieser Brunnen hat eine Ergiebigkeit von 80 l/s. Die Gesamtentnahme soll dem Wasserbedarf entsprechen und liegt zwischen 120 l/s und 140 l/s. Brunnen 1 und 2 besitzen eine wasserrechtlich genehmigte Entnahmemenge von jeweils 60 l/s, Brunnen 3 von 80 l/s. Alle drei Brunnen sind mit baugleichen Tauchbrunnen mit einer Mindestförderrate von 10 l/s ausgestattet. Folgende Alternativen werden für eine Optimierung in Betracht gezogen:

Tab. 2.1: Die Anwendung von Ausschlusswerten

	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4	Alt. 5	Alt. 6	Alt. 7
Entnahme Brunnen 1 [l/s]	20	5	35	35	50	10	40
Entnahme Brunnen 2 [l/s]	50	50	40	50	80	10	40
Entnahme Brunnen 3 [l/s]	50	70	20	50	50	10	40
<b>Gesamtentnahme [l/s]</b>	<b>120</b>	<b>125</b>	<b>95</b>	<b>135</b>	<b>180</b>	<b>30</b>	<b>120</b>

Für den weiteren Vergleich der Alternativen müssen die Alternativen 2,3,5 und 6 ausgeschlossen werden. Alternative 2 ist nicht realisierbar, da aus dem Brunnen 1 mindestens 10 l/s gefördert werden müssen. Bei Alternative 3 wird insgesamt zu wenig Wasser bereitgestellt, ebenso bei Alternative 6. Bei der Alternative 5 wird sowohl die wasserrechtlich maximal

zulässige Entnahmemenge am Brunnen 2 als auch die notwendige Bereitstellung von max. 140 l/s überschritten. Bezüglich der Optimierung der Grundwasserentnahmen kommen daher im weiteren nur die Alternativen 1, 4 und 7 in Betracht.

## 2.5 Composite Programming

Einer der größten Nachteile der klassischen Nutzwertanalyse liegt darin, dass sehr schlechte Zielerfüllungsgrade bzw. Teilnutzwerte durch andere, sehr hohe vollständig kompensiert werden können (ZANGEMEISTER, 1973; BECHMANN, 1987; BÁRDOSSY, 2003). Das bedeutet, dass der Gesamtnutzwert aus den drei Teilnutzwerten 80%, 60% und 10% (bei gleicher Gewichtung) denselben Wert annimmt wie bei den Teilnutzwerten 50%, 50% und 50%, obwohl die zweite Variante „gerechter“ ist, da sie einen besseren Kompromiss darstellt.

Aus diesem Grund wurden die sogenannten distanzbasierten Bewertungsmethoden entwickelt. Hierbei werden die Abstände einzelner Bewertungskriterien zu einem Idealwert berechnet. Der Idealwert setzt sich aus den optimalen Zielerträgen zusammen und ist praktisch nicht erreichbar (MANIAK, 2000). Ein Vertreter der distanzbasierten Verfahren ist das Composite Programming (Composite Programmierung, CP), das von BÁRDOSSY et al. (1985) entwickelt wurde. Das Verfahren ähnelt der Nutzwertanalyse stark, so dass wesentliche Bearbeitungsschritte identisch sind.

### 2.5.1 Kompensierbarkeit

Zunächst werden die Zielkriterien ausgewählt und die Zielerfüllungsgrade exakt wie bei der Nutzwertanalyse berechnet. Die Zielkriterien werden dann nach inhaltlich zusammengehörigen funktionellen Gruppen zusammengefasst (z.B. Nitratkonzentration und Gesamthärte als funktionelle Gruppe Wassergüteparameter). Die Gewichte  $g_i$  werden auf die Kriterien innerhalb der funktionellen Gruppen verteilt, wobei innerhalb der Gruppe wiederum gilt: Summe der Gewichte gleich eins.

Dann wird die Kompensierbarkeit innerhalb der Gruppe festgelegt. Der Umgang mit dem Kompensationsfaktor erfordert viel Sachverstand und Erfahrung des Bearbeiters, weshalb weiter unten noch genauer darauf einzugehen sein wird. Prinzipiell muss für alle funktionellen Gruppen dieselbe Frage gestellt werden: Wie wichtig ist ein Kompromiss innerhalb der funktionellen Gruppe?

Die nachfolgende Zusammenstellung gibt einen Überblick über die Auswirkungen des Kompensationsfaktors  $p$  innerhalb des CP (nach BÁRDOSSY, 2003; leicht verändert). Wird  $p=1$  gesetzt, so entspricht die Berechnungsvorschrift der Berechnung bei der Nutzwertanalyse. Das CP stellt somit eine Weiterentwicklung und Verallgemeinerung der NWA dar.

<b>ganz kompensierbar</b>			<b>neutral kompensierbar</b>				<b>fast nicht kompensierbar</b>		
-----> [p]									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Die Berechnung des Indikatorwerts  $I$  einer funktionellen Gruppe wird bestimmt zu:

$$I = 1 - \left[ \sum_{j=1}^n g_j \cdot (1 - e_j)^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad \text{Gl. 2.1}$$

mit:

- $I$  = Indikatorwert (entspricht in der Terminologie der NWA dem Teil-/Gesamtnutzwert) [-]
- $e$  = Zielerfüllungsgrad/Teilnutzwert [-]
- $g$  = Gewichtungsfaktor [-]
- $j$  = Indikatoren (Bewertungsgrößen)
- $n$  = Gesamtzahl der berücksichtigten Indikatoren  $j$
- $p$  = Kompensationsfaktor innerhalb der funktionellen Gruppe

Als nächstes werden die Gruppen als einzelne Zielkriterien behandelt ( $I \rightarrow e$ ) und die Schritte wiederholt, bis schließlich nur noch eine einzige Gruppe besteht (siehe auch Vorgehensweise in Kap. 2.4.2). Die Reihung der Alternativen erfolgt dann entsprechend der Wertung dieser letzten Gruppe.

Wie sich der Kompensationsfaktor auf das Gesamtergebnis auswirkt, sei anhand von zwei zu bewertenden Kriterien dargestellt. In Abb. 2.1 sind die möglichen Kombinationen dargestellt, die jeweils einen gemeinsamen Nutzwert von 0,5 besitzen. Man sieht, dass bei  $p=1$  eine vollständige Kompensierbarkeit der beiden Kriterien vorherrscht, die möglichen Kombinationen befinden sich folglich auf einer Gerade. Mit größer werdendem Kompensationsfaktor krümmen sich die Linien zunehmend, so dass 0,5 unterschreitende Teilbewertungen des Kriteriums 1 nur durch immer höhere Bewertungen des Kriteriums 2 ausgeglichen werden können.

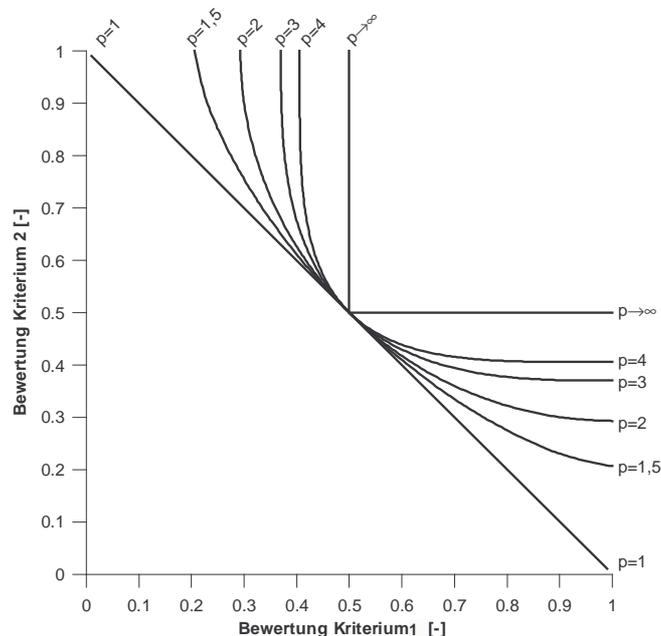


Abb. 2.1: Wirkungsweise des Kompensationsfaktors  $p$  bei einem konstantem Nutzwert von 0,5

Für den Fall  $p=2$  entsprechen sich beispielsweise die Bewertungen 0,5/0,5 und 0,3/0,9. Das Berechnungsverfahren toleriert in diesem Fall die Verschlechterung von -0,2 beim Kriterium 1 nur dann, wenn sich beim Kriterium 2 eine Verbesserung von +0,4 einstellt. Die beiden Alternativen sind im Sinne des Bewertungssystems damit gleichwertig.

Das Bewertungsverfahren Composite Programming stellt die notwendigen methodischen und mathematischen Grundlagen für die Optimierung der Grundwasserbewirtschaftung bereit. Es gilt nun, die konkrete Fragestellung so in die Methodik einzubetten, dass alle relevanten Anforderungen der Wasserversorgung, der Landwirtschaft und des Naturschutzes (Kap. 4) berücksichtigt werden und schließlich vorgegebene Bewirtschaftungsalternativen miteinander verglichen werden können.

## 2.6 Übersicht zu Steuerungs- und Managementsystemen

Die Begriffe Steuerungs- und Managementsysteme sind sehr weit gefasst. Sie reichen von der klassischen Steuerungs- und Regeltechnik im Maschinenbau bis zum sogenannten Workflow-Management, das als Optimierung bei Geschäftsprozessen verstanden wird. Für die im Rahmen des Forschungsprojekts anstehenden Fragestellungen sind die folgenden Steuerungs- und Managementsysteme relevant:

- Systemoptimierung, Linienoptimierung
- Managementsysteme und Risikoanalyse
- Parameterbestimmung anhand von Optimierungsverfahren.

Als klassisches Beispiel für eine Linienoptimierung kann das „Traveling Salesman Problem“ genannt werden. Hier wird versucht, möglichst viele Reiseziele so zu kombinieren, dass die Wege minimal werden.

Der Begriff Systemoptimierung bezieht sich meist auf Herstellungsverfahren. Durch Verbesserung der Produktionsabläufe sollen Kosten gespart und eine optimale Qualität angestrebt werden. Grundlage hierfür sind mathematische Verfahren zur linearen und nichtlinearen Optimierung (siehe Kap. 2.7), die auch für die Optimierung von physikalischen Vorgängen Gültigkeit haben. Im Bereich der Wasserversorgung werden ebenfalls Optimierungsalgorithmen z.B. zur Optimierung von Wasserversorgungsnetzen (CEMBROWICZ & ATES, 1997) eingesetzt.

Die Lineare Optimierung war in der Wasserwirtschaft lange Zeit die Optimierungsmethode der Wahl, wenn Grundwasserentnahmen unter Berücksichtigung von Restriktionen (i.d.R. Grenzflurabstände) optimiert werden sollten (LINDNER, 1983; NILLERT et al., 2003). Bei diesem Verfahren wird eine in Abhängigkeit von der Steuergröße Förderrate zu definierende Gütefunktion minimiert oder maximiert, wobei Nebenbedingungen bezüglich der Steuergröße berücksichtigt werden können (NILLERT et al., 2003). Die Gütefunktion muss dabei die Beeinträchtigungen an bestimmten, festgelegten Restriktionspunkten in Abhängigkeit von der Förderrate beschreiben können, wobei dieser Zusammenhang linear sein muss. Die Lineare Optimierung stößt an ihre Grenzen, wenn neben dem Flurabstand weitere Parameter optimiert werden müssen. Die Gütefunktion – sofern sie überhaupt existiert – kann nur für relativ einfache Problemstellungen adäquat formuliert werden. Zudem muss durch die Festlegung von Restriktionspunkten eine Vorauswahl bezüglich der berücksichtigten Punkte im Raum

getroffen werden, für die die Entnahme optimiert wird. Die angestrebte flächige Bewertung kann mit der Linearen Optimierung praktisch nicht geleistet werden.

Im Bereich der Fertigung von Gütern beschleunigt die Computersimulation den Entwurf von Produkten und hilft, Verfahren zu optimieren. Das Ergebnis sind kürzere Entwicklungszeiten, weniger reale Experimente und die gezielte Konstruktion von Prototypen, also Kostenvorteile. (div. Quellen aus Industrie und Fertigung).

Optimierungsaufgaben stellen sich in der Industriepraxis in vielfältiger Form. Beim ressourcensparenden Einsatz von Personal und Material, bei der Auslastung von Produktionsanlagen oder bei der Planung von Transportwegen und Zulieferung – Methoden der mathematischen Optimierung helfen, unternehmerische Entscheidungen zu treffen, Prozesse zu verbessern und Kosten zu sparen. Typische Anwendungsfelder sind

- Packungs- und Zuschnittprobleme: Textilien, Leder, Bleche, Bauteileanordnung, Containerbeladung
- Logistik: Transportoptimierung, Tourenplanung, Standortwahl
- Produktion: Maschinenbelegung, Arbeitspläne, Materialverbrauch
- Planung: Flächen- und Raumnutzung, Platzierung von Sicherungsanlagen, Kommunikationsnetze

Beispielsweise bei der Bahn wird durch eine Optimierung versucht, die Anzahl der eingesetzten Züge zu verringern und durch möglichst günstige Takt- und Anschlusszeiten die Reisezeiten kurz zu halten (ZIMMERMANN et al., 1998).

Managementsysteme sind oftmals dann gefragt, wenn konkurrierende Nutzungen vorliegen und die Nutzung so gesteuert oder auch optimiert werden muss, dass die Interessen aller Nutzer gewahrt werden. Ein wichtiger Bestandteil von Managementsystemen ist die Erarbeitung von Bewirtschaftungsrichtlinien, die ein klassisches Instrument in der Wasserwirtschaft sind. Bei wasserwirtschaftlichen Fragestellungen können Managementsysteme im kleinräumigen Maßstab (z.B. auf Einzugsgebietsebene von Brunnen) oder auch auf überregionaler Ebene eingesetzt werden, wie dies beim Flusseinzugsgebietsmanagement geschieht (z.B. BARTHEL et al., 2004). Bei diesen Managementsystemen kommen oftmals Grundwassermodelle zum Einsatz, mit denen Variantenrechnungen durchgeführt werden, die dann wiederum zur Erstellung von Bewirtschaftungsrichtlinien verwendet werden. Die Einarbeitung von mathematischen Verfahren zur Abgrenzung der Variante und zur Optimierung erfolgt nicht. Als sogenannte Vorhersagemodelle wurden Grundwassermanagementsysteme insbesondere zur Abschätzung des Transports von Wasserinhaltsstoffen entwickelt. Wie in HOFMANN (2000) dargestellt, dienen diese Managementsysteme zur Risikoabschluss bei Störfällen. Ein anderes Beispiel für ein Vorhersagesystem aus der Wasserwirtschaft sind die Hochwasservorhersagemodelle, wie diese z.B. für das Rheineinzugsgebiet eingesetzt werden.

Die Risikoanalyse wurde als Methode zur Beurteilung der Nutzungsverträglichkeit bei unvollständiger Informationslage entwickelt (BACHFISCHER, 1978). Hier werden für die Verursa-

cher auf der einen und die Betroffenen auf der anderen Seite Indikatoren gebildet und in einer Präferenzmatrix bewertet. Die Weiterentwicklung dieser Methode findet heute bei der Umweltverträglichkeitsprüfung Einsatz (SCHOLLES, 1998). Die Risikoabwägung im Bereich Grundwasser spielt vor allem bei der Altlastensanierung eine wichtige Rolle. Dabei geht es im wesentlichen um die optimale Platzierung von Abwehrbrunnen und die Quantifizierung der Datenunsicherheit im Hinblick auf die Untergrundverhältnisse (z.B. RAIMONDE et al., 1998)

Das Verfahren der Parameter-Bestimmung mit Hilfe von Optimierungsverfahren findet im Bereich der hydraulischen Modellierung insbesondere im Grundwasser eine breite Anwendung. Hier werden mit Hilfe eines mathematischen Algorithmus Systemparameter automatisch ermittelt, wobei durch den Benutzer die Bandbreite der Parameter eingeschränkt werden kann. Für dieses Verfahren sind in der Literatur mehrere Verfahren und Programme beschrieben. Allerdings beschränken sich die meisten Programme auf die Schätzung von speziellen Parametern, die im Rahmen der Eichung der hydraulischen Modelle ermittelt werden müssen. Dies sind im Bereich Grundwasser vor allem die Durchlässigkeiten, die Speicherkoeffizienten oder die Leakagefaktoren, die durch eine inverse Modellierung bestimmt werden (z.B. POETER & HILL, 1998). Eine Ausnahme bildet das Programm PEST (DOHERTY, 2000). Hier können beliebige Parameter optimiert werden, für die ein funktionaler Zusammenhang zwischen Bewertungs- und Optimierungsgröße definiert werden kann. Dieser funktionale Zusammenhang kann ein hydraulisches Modell, eine beliebige Funktion oder eine aus Messwerten abgeleitete Information sein.

Die obige Zusammenstellung zeigt deutlich, dass die Optimierung der Grundwasserströmungsverhältnisse im Hinblick auf die Wasserverfügbarkeit für Natur, Landwirtschaft und Wasserversorgung Neuland ist. Die dafür notwendigen mathematischen Optimierungsalgorithmen sind bereits vorhanden und in unterschiedlichsten Anwendungen erprobt.

## 2.7 Optimierungssystem

### 2.7.1 Grundlagen

Optimierung bedeutet im Allgemeinen die bestmögliche Festlegung von Größen, Eigenschaften, zeitlichen Abläufen etc. Dem Begriff „bestmögliche“ liegt dabei eine ganz bestimmte Sichtweise zu Grunde. Optimierungsaufgaben können bei Prozessabläufen anstehen, sofern Steuer- oder Optimierungsgrößen die Prozessabläufe beeinflussen können. Eine sehr einfach zu definierende Aufgabe kann es hierbei sein, Prozesskosten zu minimieren. Für diese Aufgabenstellung muss der Zusammenhang zwischen Prozesskosten und Prozessablauf bekannt sein. Um diesen optimieren zu können (z.B. durch Minimierung der Kosten), muss dieser Zusammenhang mathematisch definiert werden. Im vorliegenden Fall, bei dem die Grundwasserentnahmen so optimiert werden sollen, dass diese zu einem größtmöglichen Gesamtnutzwert führen, wird der mathematische Zusammenhang über die Grundwasserhydraulik und das Bewertungssystem hergestellt. Die Grundwasserhydraulik lässt sich

über analytische Lösungen oder mit Hilfe eines Grundwassermodells bestimmen. Führt man diese mathematischen Zusammenhänge zwischen Grundwasserentnahme und Bewertungsgröße zusammen, so lässt sich dies in allgemeiner Schreibweise wie folgt darstellen:

$$Xb = c \quad \text{Gl. 2.1}$$

Wobei  $X$  eine Matrix ist, die den physikalischen Zusammenhang zwischen der Entnahme  $b$  und den Systemantwort  $c$ , die die Bewertungsgrößen darstellen, herstellt. Die Optimierungsaufgabe besteht nun darin, die Entnahme  $b$  so zu wählen, dass die Systemantwort  $c$  den Zielvorgaben  $c'$  entsprechen. Die Zielvorgaben  $c'$  sind die maximalen Zielerfüllungsgrade und sind zu 100% bzw. 1 definiert. Da es physikalisch nicht möglich sein wird, die Zielvorgaben vollständig zu erfüllen, besteht die Optimierungsaufgabe darin, den Unterschied zwischen der Systemantwort  $c$  und den Zielvorgaben  $c'$  zu minimieren. Deshalb wird bei der Optimierungsaufgabe auch von einem Minimierungsproblem gesprochen. Setzt man in Gl. 3.4 die Zielvorgaben  $c'$  ein, so lässt sich die sogenannte objective function bestimmen, die den Unterschied zwischen den Zielvorgaben  $c'$  und den Bewertungsgrößen  $c=Xb$  in Abhängigkeit der Entnahmen  $b$  wiedergibt:

$$\Phi = (c' - Xb)' (c' - Xb) \quad \text{Gl. 2.2}$$

Für die Minimierung dieser objective function stehen verschiedene Lösungsverfahren zur Verfügung. Im Forschungsprojekt wurde das von DOHERTY (2000) entwickelte Programm PEST verwendet.

### 2.7.2 Gewähltes Optimierungsprogramm

Das hier eingesetzte Programm PEST (Parameter ESTimation) verwendet eine nicht-lineare Optimierungstechnik, bekannt als die Gauss-Marquardt-Levenberg Methode (DOHERTY, 2000). Der Optimierung liegt eine iterative Vorgehensweise zu Grunde. Die grundsätzliche Stärke der Gauss-Marquardt-Levenberg Methode liegt in der Tatsache, dass Parameter in weniger Iterationsschritten angenähert werden können als bei jeder anderen Methode.

Zu Beginn jeder Iteration wird hier die Beziehung zwischen Systemparametern und Zielvorgaben als Taylorreihe entwickelt. Hierfür müssen die Abhängigkeiten der Bewertungsgrößen von den Systemparametern kontinuierlich differenzierbar sein. Ist die Zahl der Bewertungsgrößen gleich der Zahl der Systemparameter, so ist eine eindeutige Lösung vorhanden. Meist gibt es allerdings mehr mögliche Kombinationen zwischen Systemparametern und Bewertungsgrößen, das System ist somit überbestimmt. Die Differenz stellt hierbei den Freiheitsgrad des Problems dar. Zunächst wird jeder zu variierende Systemparameter (Entnahme) in einem vom Benutzer vorgegebenen Rahmen verändert. Jedes Ergebnis der Iterationsschritte wird ausgewertet, die Differenz zwischen Bewertungsgröße und Zielvorgabe ermittelt und auf dieser Grundlage die Veränderung der Systemparameter (Entnahmen) für erneute Iterationsschritte vorgegeben. Dieses Vorgehen wird als Vorwärtsdifferenzenverfahren be-

zeichnet. Bei Annäherung an die richtige Lösung wird dann von Vorwärts- auf Zentrale Differenzen umgestellt, da dies eine Beschleunigung erlaubt. Hierfür werden innerhalb einer Optimierung die Systemparameter in zwei Rechenläufen um den gleichen Wert verkleinert und vergrößert und dann das Optima bestimmt. Die Annäherung an das globale Minima läuft dabei entsprechend dem in Abb. 2.1 dargestellten Schema ab. Günstige initiale Parametersets beschleunigen die Optimierung und verringern die Gefahr, dass ein lokales Minima gefunden wird.

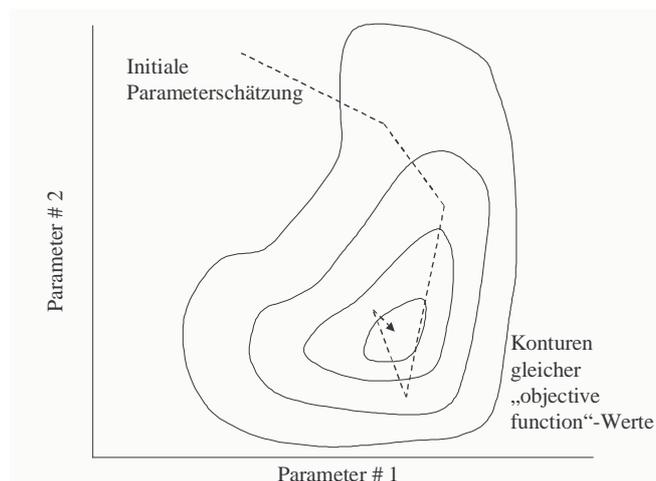


Abb. 2.1: Iterative Parameterbestimmung des Minimums der objective function

In jedem Optimierungsprozess gibt es außer den Hauptoptimierungsgrößen auch noch Werte, die nicht in den Optimierungsvorgang mitaufgenommen werden können, die aber für die Bewertung bei Erreichen bestimmter Grenzwerte ein Ausschlusskriterium bilden. Im Optimierungsprozess muss ausgeschlossen werden können, dass ein Ergebnis, bei dem die Nebenbedingungen nicht eingehalten werden können, als gut bewertet wird. Bei Wasserentnahmen können das zum Beispiel das vorhandene Wasserrecht oder eine Mindestentnahme aus betrieblichen Gründen sein. Solche Größen gehen als Nebenbedingungen in den Optimierungsprozess mit ein.

### 2.7.3 Beurteilung der Optimierungsgüte

In den meisten Aufgaben zur Optimierung sind die Systemparameter korreliert, da ein räumlicher Zusammenhang gegeben ist, so dass im Verlauf der Optimierung lineare Kombinationen der Parameter einfacher geschätzt werden können. In solchen Fällen ist auch bei einer vergleichsweise kleinen objective function die Varianz der Systemparameter hoch. Ist die Korrelation zu hoch, wird die Koeffizientenmatrix singulär und die Parameterschätzung unmöglich. Im Optimierungsprozess wird versucht, die objective function bis zu ihrem Minimum abzusenken, um das optimale Parameter-Set herauszufinden. Eine Aussage über die Güte der Anpassung ist also über den Wert der objective function möglich. Eine andere Möglichkeit, die Anpassungsgüte darzustellen, ist der Korrelations-Koeffizient  $R$ . Dieser ist unabhängig von der Anzahl der Optimierungsparameter und der Gewichtung. Mit ihm ist es möglich, verschiedene Optimierungsergebnisse direkt miteinander zu vergleichen. Der bestmögliche Korrelationskoeffizient ist Eins. Generell sollte  $R$  größer 0,9 sein. Der Korrelationskoeffizient  $R$  berechnet sich nach:

$$R = \frac{\sum (w_i c'_i - m')(w_i c_i - m)}{\left[ \sum (w_i c'_i - m')(w_i c'_i - m') \sum (w_i c_i - m)(w_i c_i - m) \right]^{1/2}} \quad \text{Gl. 2.1}$$

mit:

- $c_i$  = vom Bewertungssystem berechnete Bewertungsgröße  
 $c'_i$  = Zielvorgabe der Bewertungsgröße  
 $m_i$  = gewichteter Mittelwert der berechneten Bewertungsgrößen  
 $m'_i$  = gewichteter Mittelwert der Zielgrößen  
 $w_i$  = Gewicht der einzelnen Bewertungsgrößen

Das Gewicht der einzelnen Bewertungsgrößen berechnet sich nach dem hierarchischen Bewertungssystem. Dabei wird das Gewicht der einzelnen Bewertungsgrößen mit den Gewichten der Zielebenen multipliziert. Da die Zielgrößen  $c'_i$  jeweils 100% bzw. 1 betragen, ist das gewichtete Mittel der Zielgrößen  $m'_i$  ebenfalls 100% bzw. 1. Dadurch vereinfacht sich die Berechnung des Korrelationskoeffizienten wie folgt:

$$R = \frac{\sum (w_i - 1)(w_i c_i - m)}{\left[ \sum (w_i - 1)(w_i - 1) \sum (w_i c_i - m)(w_i c_i - m) \right]^{1/2}} \quad \text{Gl. 2.2}$$

## 2.8 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die theoretischen und mathematischen Grundlagen für das Bewertungs- und Optimierungssystem dargelegt. Als Bewertungsverfahren für die Optimierung der Grundwasserbewirtschaftung wurde das multikriterielle Bewertungsverfahren Composite Programming ausgewählt. Dieses weist gegenüber den anderen untersuchten Verfahren wesentliche Vorteile im Hinblick auf die untersuchte Fragestellung auf.

Die Methodik des gewählten Bewertungsverfahrens wurde vorgestellt. Von besonderer Bedeutung für eine zielführende Bewertung von Grundwasserbewirtschaftungsalternativen sind:

- die Festlegung eines problemadäquaten Zielsystems,
- die Ermittlung objektiv nachvollziehbarer Zielfunktionen,
- die Vergabe von Gewichtung- und Kompensationsfaktoren,
- die Anwendung von Ausschlusswerten für die Bewertung.

Als Optimierungsmethode wird die nichtlineare Parameterschätzung ausgewählt, die auf der Gauss-Marquardt-Levenberg Methode beruht. Die Stärke dieser Methode liegt in der Tatsache, dass die Gütefunktion für die Optimierung (objective function) in weniger Modellläufen minimiert werden kann als bei jeder anderen Methode. Die Methode minimiert die aus dem Bewertungssystem resultierenden Differenzen zwischen den berechneten Bewertungsgrößen und deren Zielgrößen.