



**THM**

TECHNISCHE HOCHSCHULE MITTELHESSEN

**WI**

Wirtschafts-  
ingenieurwesen

Claus Hüselmann, Rolf Litzenberger, Nikolas Schick,  
Lukas M. Spannenberger

## Sensitivitätsanalyse von Nutzwerten

Systematische Betrachtungen zur Nutzwertanalyse



### WI-[Reports]

– Arbeitspapiere des Fachbereichs Wirtschaftsingenieurwesen –

---

Nr. 009

ISSN: 2568-0803

## Impressum

**Reihe:** WI-[Reports] – Arbeitspapiere Wirtschaftsingenieurwesen

**Herausgeber:** Fachbereich 14 der THM  
vertreten durch den

**Herausgeberbeirat:** Prof. Dr. rer. oec. Claus Hüselmann  
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schulz-Nigmann

THM Technische Hochschule Mittelhessen  
Fachbereich 14 Wirtschaftsingenieurwesen

Wilhelm-Leuschner-Straße 13

61169 Friedberg

online <https://www.thm.de/wi/>

Die Arbeitspapiere der Reihe WI-[Reports] sind einschließlich aller Abbildungen urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urhebergesetzes ist ohne Zustimmung des Herausgebers unzulässig. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmung, Einspeicherung sowie Be- und Verarbeitung in elektronischen Systemen. Copyright FB 14 THM

---

---

## WI-[Report] Nr. 009

---

- Autoren:** Claus Hüsselmann, Rolf Litzenberger, Nikolas Schick, Lukas M. Spannberger
- Titel:** Sensitivitätsanalyse von Nutzwerten  
Systematische Betrachtungen zur Nutzwertanalyse
- Zitation:** Hüsselmann, C.; Litzenberger, R.; Schick, N.; Spannberger, L. M. (2019): Sensitivitätsanalyse von Nutzwerten. Systematische Betrachtungen zur Nutzwertanalyse, WI-[Report] Nr. 009, Friedberg, THM 2020, ISSN 2568-0803
- Kurzfassung [dt.]:** Nutzwertanalysen sind eine bekannte und verbreitete Methode der systematischen Bewertung von Handlungsalternativen zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen. Zu den Einsatzdomänen gehören Entwicklung und Konstruktion, Finanzinvestitionen und nicht zuletzt das Projekt-Portfoliomanagement. Ihre Stärke entfalten sie insbesondere, wenn die Alternativen, z.B. Projekte, hinsichtlich nicht direkt quantifizierbarer, vielfach subjektiver Kriterien bewertet werden sollen. Im Ergebnis liefern sie eine quantifizierte Bewertung, die als Basis für die Bildung einer Rangfolge der betrachteten Alternativen und insbesondere zur Auswahl der präferierten Alternative dient.
- Allerdings ist festzustellen, dass aufgrund von immanenten Unsicherheiten bei der Aufstellung und Gewichtung der Kriterien sowie insbesondere der à priori Bewertung der Alternativen hinsichtlich dieser Kriterien Unschärfen entstehen, die bei der Ableitung einer Entscheidung zu berücksichtigen sind. Die systematische Analyse dieser Sensibilität ist bis dato mit Blick auf die multidimensionale Nutzwertanalyse nicht bekanntermaßen beleuchtet und erfordert eine mathematisch fundierte Herangehensweise.
- Der vorliegende Beitrag will diese Lücke weitgehend schließend und dem Leser entsprechende Instrumente und Vorgehensweisen an die Hand geben, die auch in einem Fallbeispiel veranschaulicht werden.
- Schlagwörter (dt.):** Nutzwertanalyse, Scoringmodell, Portfoliomanagement, Sensitivitätsanalyse
-

---

## Inhaltsverzeichnis

Motivation und Einordnung.....	1
Fachliche Grundlagen.....	2
Aufbau einer Nutzwertanalyse.....	2
Aufbau der Bewertungsskala .....	3
Gewichtung der Kriterien.....	4
Kritische Betrachtung der Nutzwertanalyse .....	5
Betrachtungen zur Sensitivität .....	8
Formale Betrachtung der Nutzwertanalyse.....	9
Mathematische Modellierung .....	9
Systematische Sensitivitätsanalyse.....	12
Sensitivität der Gewichte.....	13
Sensitivität der Bewertungen.....	16
Heatmap zur Nutzwertanalyse.....	20
Umgang mit Unschärfen.....	21
Ursachen und Auswirkungen .....	21
Handhabung .....	22
Praktische Anwendung.....	23
Vorgehensmodell.....	23
Fallbeispiel Einführung Personalverwaltungssystem.....	24
Szenario.....	24
Prüfung der Möglichkeit einer Rangfolgeänderung .....	25
Prüfung der Homogenität des Scoringmodells .....	28
Zielgerichtete Variation einzelner Bewertungen .....	30
Unschärfebetrachtung ausgewählter Bewertungen .....	32
Resümee .....	34
Anhang.....	35
Literatur- und Quellenverzeichnis.....	35
Parameterverzeichnis.....	37
Mathematische Grundlagen.....	38
Gradient einer Funktion .....	38
Skalarprodukt zweier Vektoren .....	38
Totales Differential einer Funktion .....	38

---

Absoluter Fehler .....	39
Relativer Fehler.....	39
Transformationsfunktionen .....	39

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispielhafte Darstellung einer Nutzwertanalyse .....	1
Abbildung 2: Beispiel Nutzwertanalyse.....	3
Abbildung 3: Konstruktion einer ordinalen Skala .....	4
Abbildung 4: Geometrische Interpretation der Scorefunktion.....	11
Abbildung 5: Visualisierung lokaler Sensitivität.....	12
Abbildung 6: Partialnutzen in Abhängigkeit sich ändernder Gewichtung $w_1$ .....	13
Abbildung 7: Zahlenstrahl zur Dominanz.....	15
Abbildung 8: Partialnutzen in Abhängigkeit sich ändernder Bewertung.....	16
Abbildung 9: Gezielte Variation der Bewertungen .....	20
Abbildung 10: Darstellung der Unschärfen bezüglich Bewertungen .....	22
Abbildung 11: Zusammenhang Unsicherheit und Heatmap der NWA.....	23
Abbildung 12: Vorgehensmodell zur Sensitivitätsanalyse .....	24
Abbildung 13: Nutzwertanalyse Fallbeispiel.....	25
Abbildung 14: Möglichkeit einer Bewertungsschwankung (maximaler Fehler).....	26
Abbildung 15: Score-Bandbreite der Projektalternativen.....	27
Abbildung 16: Dominanz und relative Dominanz .....	28
Abbildung 17: Zahlenstrahl zur Dominanz.....	28
Abbildung 18: Grafische Darstellung der Dominanz und der relativen Dominanz.....	29
Abbildung 19: Bewertungsvariation in Heatmap-Darstellung.....	31
Abbildung 20: Unschärfespennen bei der Bewertung der Kriterien.....	33
Abbildung 21: Verschiedenen Transformationstypen .....	40

---

## Motivation und Einordnung

Um Projekte innerhalb einer Multiprojektlandschaft zu priorisieren, wird häufig auf Scoring-Modelle zurückgegriffen. Anhand dieser können die Projekte quantifiziert bewertet und verglichen werden. Jene Projekte mit dem besten Score werden infolge dessen als am ehesten erstrebenswert eingeschätzt. Eines dieser angesprochenen Scoring-Modelle ist die Nutzwertanalyse (NWA). In einer NWA werden Handlungsalternativen, wie zum Beispiel Projekte, hinsichtlich mehrerer festgelegter und gewichteter Kriterien bewertet. Abbildung 1 zeigt eine solche NWA schematisch:

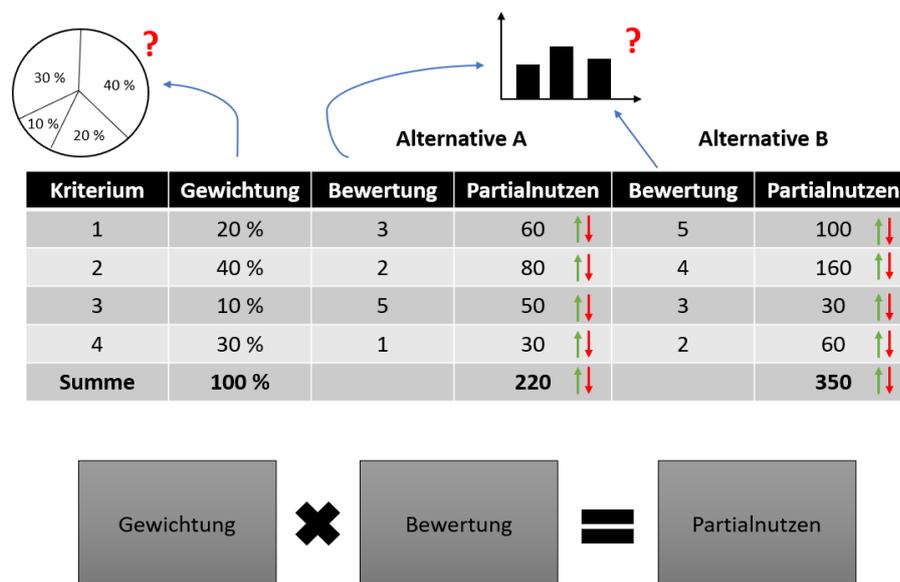


Abbildung 1: Beispielhafte Darstellung einer Nutzwertanalyse

Allerdings ist zu beobachten, dass bei realen Entscheidungen oftmals die Berechnung des Nutzwerts nicht zu Rate gezogen wird, sondern vielmehr die Intuition der Entscheider. Eine These hierzu ist, dass die NWA letztlich für das Management eine Blackbox ist, in der mit Hilfe mathematischer Berechnungen die Prioritäten intransparent festgelegt werden. Ein anderer, offensichtlicher Aspekt ist die Aussagekraft der errechneten Nutzwerte, insbesondere wenn diese nahe beieinanderliegen. Schließlich hat eine NWA viele Freiheitsgrade, wie z.B. die Kriteriengewichtung und die Bewertung der einzelnen Projekte. Daher sind die sich ergebenden Nutzwerte mit Vorsicht zu betrachten.

So können kleinere Änderungen an den Eingangsparametern (besonders Kriteriengewichtung oder Bewertung) das Ergebnis der Nutzwertanalyse nachhaltig beeinflussen und sogar die ermittelte Rangfolge ändern.

Aus diesem Grund ist eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen, die Aufschluss darüber gibt, welche Eingangsfaktoren besonders kritische Nutzwertänderungen verursachen können. Dabei ist zu beobachten, dass regelmäßig mit willkürlicher Variation der Eingangswerte vorgegangen wird, was eine angemessene Systematik vermissen lässt. Für eine systematische Sensitivitätsanalyse ist vielmehr eine methodische Vorgehensweise auf Basis grundlegender mathematischer Zusammenhänge notwendig.

Ziel ist daher die Entwicklung eines mathematisch fundierten Sensitivitätsanalyse-Tools für NWA – mit Fokus, aber ohne Einschränkung auf das Projektportfoliomanagement. Die Methode soll kritische Werte für einzelne Faktoren aufzeigen und zulässige Bandbreiten (also Schwankungen der Bewertung) für die Bewertungsfaktoren ermitteln.

Können im Rahmen der Sensitivitätsanalyse besonders sensitive Eingangsfaktoren identifiziert werden, kann der Durchführende auf eine valide Bewertung oder Gewichtung dieser Größen besonders achten. Der Fokus liegt dabei auf der Ermittlung der lokalen Sensitivität aus Sicht der variablen Bewertung und Gewichtung. Diese Vorgehensweise wird durch eine mathematische Herleitung fundiert. Ergebnis ist eine einfache visuelle Darstellung, mit der leicht Schlüsse auf die Sensitivität gezogen werden können.

## Fachliche Grundlagen

### Aufbau einer Nutzwertanalyse

Die NWA ist ein mehrdimensionales, relatives und nicht monetäres Bewertungsverfahren zum Vergleich verschiedener Entscheidungsalternativen auf Basis von quantitativen und qualitativen Faktoren und Einschätzungen. Sie wird im Projektportfoliomanagement angewendet, da die monetäre Bewertung des Nutzens von Projekten oftmals nicht möglich oder ungenügend ist und die nicht-monetären Aspekte in der Regel eine große Bedeutung haben.<sup>1</sup>

Bei der NWA wird die Bewertungsaufgabe in verschiedene Kriterien gegliedert, die sich aus den Zielen der Organisation herleiten lassen. Die einzelnen Kriterien werden für jede Alternative entsprechend einer definierten Bewertungsskala bewertet. Die Erfüllung der Kriterien wird separat beurteilt, wodurch der Vergleich von Alternativen ermöglicht werden soll.

Anhand der Summe der Einzel- beziehungsweise Partialnutzwerte, die sich aus dem Produkt zwischen Gewichtung und Bewertung ergeben, wird der Gesamtnutzwert gebildet. Mittels der Gesamtnutzwerte lässt sich im Anschluss eine Rangfolge (Ranking) unter den Handlungsalternativen bilden, anhand derer Prioritäten abgeleitet werden können. Das Ergebnis ist der Nutzwert (Score) der jeweiligen Alternative.<sup>2</sup>

In Abbildung 2 wird beispielhaft eine Nutzwertanalyse dargestellt.

Eine Nutzwertanalyse besteht demzufolge also aus einer Scorecard, das heißt einem Satz gewichteter Kriterien, einem Satz von Handlungsalternativen, die zu bewerten sind, und der Bewertung dieser Alternativen hinsichtlich der Kriterien der Scorecard.

Sind verschiedene Interessengruppen an der NWA beteiligt, kann zudem festgestellt werden, welche Kriterien für diese wichtig sind und wie sie den Nutzen einer bestimmten Alternative einschätzen. Dabei fließt neben der rein sachlichen Information auch die subjektive Meinung der Beteiligten mit ein, was Vorteile für die Akzeptanz im weiteren Verlauf mit sich bringt.<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> s. Fritsch, 2004, S. 3.1; Lock/Wagner, 2019, S. 248 ff.

<sup>2</sup> s. Kühnapfel, 2017, S. 74.

<sup>3</sup> s. Fritsch, 2004, S. 3.1.

---

Kriterium	Gewichtung	Projekt A		Projekt B		Projekt C	
		Bewertung	Nutzwert	Bewertung	Nutzwert	Bewertung	Nutzwert
Strategiebeitrag	33%	3	0,99	2	0,66	5	1,65
Ressourcenbedarf	23%	4	0,92	4	0,92	2	0,46
Projektkosten	20%	2	0,40	3	0,60	3	0,60
Abwicklungskomplexität	7%	5	0,35	5	0,35	4	0,28
Projektdauer	7%	3	0,21	1	0,07	2	0,14
Organisatorische Veränd.	10%	2	0,20	4	0,40	1	0,10
Score		3,07		3,00		3,23	
Ranking		2.		3.		1.	

Abbildung 2: Beispiel Nutzwertanalyse

### Aufbau der Bewertungsskala

Die Bewertung der Alternativen kann auf einer sachlich-objektiven (Sachdimension) und einer subjektiven Ebene (Wertedimension) durchgeführt werden.

Für die objektive Bewertung wird mittels Indikatoren, die für jedes Kriterium zu definieren sind, der jeweilige Erfüllungsgrad gemessen. Die durch die Indikatoren bestimmten Zielerträge werden mittels **Transformationsfunktionen** in dimensionslose Größen (Bewertungen) umgewandelt.<sup>4</sup> Die Transformationsfunktionen können bspw. linear, mit progressiver oder mit degressiver Steigung konstruiert werden – je nach fachlichem beziehungsweise technischem Zusammenhang.<sup>5</sup> Die zugrundeliegende Bewertungsskala entspricht letztlich innerhalb einer NWA derjenigen für die subjektive Bewertung.

Die subjektive Bewertung erfolgt durch die befragten Stakeholder (direkt oder indirekt betroffenen Personen und Interessenskreise) gemäß ihrer individuellen Einschätzung anhand einer ordinalen Bewertungsskala.

Die Wahl dieser Bewertungsskala ist bezüglich deren Feingliedrigkeit und Stufigkeit von Bedeutung für die Granularität der Alternativenbewertung. In der Praxis sind verschiedene Ausprägungen anzutreffen – bspw. von der 3-stufigen (schlecht / neutral / gut) bis zu 11-stufigen (0 bis 10) mit entsprechend feingliedriger Semantik. Teilweise wird in der praktischen Anwendung eine gerade Anzahl von Elementen gewählt, um vom Bewerter eine Entscheidung in eine eindeutige Richtung zu erzwingen.

Generell lässt sich eine Skala ganzzahliger Bewertungselemente von  $-n \cdot a$  (Minimum, schlechteste Bewertung) bis  $+n \cdot a$  (Maximum, beste Bewertung) bilden, wobei  $a$  den Parameter für die Granularität der Bewertungsstufen darstellt (je größer  $a$ , desto feingliedriger ist die Skala) und  $n$  die Anzahl der semantischen Abstufungen. Für z.B.  $a=2$  und  $n=2$  (entsprechend z.B. „sehr“ und „relativ“) ergibt sich eine Skala wie in Abbildung 3:

<sup>4</sup> vgl. Fritsch, 2004, S. 3.11.

<sup>5</sup> siehe auch Anhang *Mathematische Grundlagen*, S. 37.

	-2a		-a		0	a		2a	
z.B.:	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
Semantik:	sehr ...		relativ ...		neutral	relativ ...		sehr ...	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- schlecht</li> <li>- klein</li> <li>- gering</li> <li>- unwichtig</li> <li>- ...</li> </ul>		negative Bewertung			<ul style="list-style-type: none"> <li>- gut</li> <li>- groß</li> <li>- hoch</li> <li>- wichtig</li> <li>- ...</li> </ul>		positive Bewertung	

Abbildung 3: Konstruktion einer ordinalen Skala

Die semantisch fundierte Skala ist naturgemäß ordinal und enthält damit einen diskreten Wertebereich. Eine Abweichung einer einzelnen Bewertung um  $\Delta x$  ist nur mit der normierten Granularität 1 möglich, wobei die semantische Granularität von  $a$  abhängt. Da die Granularität  $a$  aber beliebig wählbar ist und eine Konstruktion wie in Abbildung 3 äquidistante Werte ergibt, kann ohne Einschränkung angenommen werden, dass die Skala stetig zwischen dem minimalen und dem maximalen Wert ist. Dies ermöglicht grundsätzlich eine Bewertung zwischen den Stufen, etwa „zwischen relativ gut bis sehr gut“. Ferner wird auch die Mittelwertbildung, etwa bei einer Bewertung durch mehrere Stakeholder, möglich. Gerade bei einer kleinen Stichprobengröße (= geringen Anzahl von Bewertern) ist in der Regel das arithmetische Mittel besser geeignet als der Median, der jedoch zur Beurteilung von Ausreißereffekten einbezogen werden sollte.<sup>6</sup> Beide Vorgehensweisen sind erlebte Praxis und sollen daher in diesem Beitrag auch zu Anwendung kommen.

Es lässt sich leicht feststellen: Eine feingliedrige Skala ermöglicht es dem Bewerter, eine genauere Bewertung vorzunehmen, eine gröbere Skala ermöglicht eine einfachere Bewertung und bei mehreren Bewertern ist eine eindeutiger Einordnung zu erwarten. Wichtig ist, dass die Bewertungsstufen semantisch beschrieben werden (qualitative Kriterien, z.B. Strategiebeitrag) beziehungsweise eindeutig über eine Transformationsfunktion abgebildet werden (quantitative Kriterien, z.B. Budget in [€]).

Aufgrund der Linearität der Berechnungen innerhalb einer NWA gelten die oben genannten Aussagen ohne Einschränkung – gegebenenfalls kann äquivalent eine lineare Verschiebung der Skala vorgenommen werden, ohne dass sich die Aussagen der NWA verändern. Falls sich daraus eine Einschränkung ergibt, wird dies im Folgenden entsprechend angemerkt.

### Gewichtung der Kriterien

Die Gewichtung der Kriterien kann grundsätzlich im Sinne einer absoluten Gewichtung oder einer relativen Gewichtung erfolgen.<sup>7</sup> Ohne Beschränkung der Allgemeinheit kann in beiden Fällen angenommen werden, dass der Wert normiert wird, dies ist aber wegen der zugrunde liegenden Linearität keine Erfordernis. Der Definitionsbereich der Gewichte wird demzufolge in diesem Beitrag auf alle reellen Zahlen zwischen 0 und 1 gelegt, was einer feingliedrigen Ausprägung von 0% bis 100% entspricht. Die äußeren Grenzen des Intervalls, konkret 0% und

<sup>6</sup> vgl. Fritsch, 2004, S. 5.17.

<sup>7</sup> s. ebd., S. 5.7.

100%, werden vom Definitionsbereich ausgeschlossen. Der Grund für den Ausschluss der Außengrenzen vom Definitionsbereich liegt darin, dass eine Kriteriengewichtung von 0% das Kriterium selbst für die Nutzwertanalyse obsolet macht. Eine Betrachtung des Kriteriums ist für die Nutzwertanalyse folglich nicht relevant.

Im entgegengesetzten Fall, nämlich einer Kriteriengewichtung von 100%, würde jenes betroffene Kriterium alle anderen Kriterien überflüssig machen und das einzige Kriterium der Nutzwertanalyse darstellen. Die Partialnutzwerte, die sich bei Bewertung dieses Kriteriums ergeben, würden gleichzeitig dem Gesamtnutzwert der Projektalternative entsprechen.

Beide hypothetische Fälle entsprechen nicht dem Wesen einer Nutzwertanalyse, sodass diese für die folgende Betrachtung ausgeschlossen werden.

Bei der relativen Gewichtung geben die Stakeholder an, welches der Kriterien sie relativ zu den anderen als wichtig oder weniger wichtig ansehen. Bei einer normierten Variante verteilen sie dabei gemäß ihrer Wertung 100 Prozentpunkte auf die Kriterien,<sup>8</sup> z.B. bei drei Kriterien  $K_1$  bis  $K_3$  20, 70 beziehungsweise 10 Prozentpunkte. Alternativ kann auch ein Paarweiser Vergleich durchgeführt werden,<sup>9</sup> bei dem jedes alternative Kriterium mit jedem anderen einzeln verglichen wird anhand der Frage „Ist Kriterium A für mich wichtiger, gleichwichtig oder weniger wichtig als Kriterium B?“. Über eine einfache, summarische Berechnungslogik entsteht auch hier eine relative Gewichtung der Kriterien.

Bei der absoluten Gewichtung wird für jedes Kriterium unabhängig von anderen Kriterien eine Gewichtung vorgenommen. Die Stakeholder vergeben jeweils pro Kriterium einen Prozentpunktwert zwischen 0 und 100, je nachdem wie wichtig oder unwichtig sie dieses ansehen. Dabei wird jedes Kriterium unabhängig von den anderen betrachtet.<sup>10</sup>

### Kritische Betrachtung der Nutzwertanalyse

Wie zuvor erläutert, wird das Ergebnis der NWA durch einen Score für die verschiedenen Projektalternativen abgebildet. Anschließend lassen sich die Projektalternativen, entsprechend der Höhe des Scores, in absteigender Rangfolge sortieren. Auf diese Weise lässt sich ein Ranking zur Güte der Alternativen bilden. Diese Rangfolge stellt in der Praxis meist die Entscheidungsgrundlage für die Auswahl einer Alternative dar. Da die Gesamtnutzwerte der Alternativen die einzigen relevanten Parameter zur Bildung eines Rankings sind, bedürfen diese im Nachfolgenden einer kritischen Betrachtung.

Der Gesamtscore der Alternativen ist abhängig von mehreren Parametern, die ihrerseits gewissen Unschärfen unterliegen. So sind einerseits die Gewichtungen der Kriterien mit Unsicherheiten behaftet, andererseits können die Bewertungen der Projektalternativen in Bezug auf die Kriterien Fehleinschätzungen unterliegen. In Abbildung 1 ist dies bereits schematisch dargestellt.

---

<sup>8</sup> s. Fritsch, 2004, S. 5.7.

<sup>9</sup> s. Drews/Hillebrand, 2010, S. 131.

<sup>10</sup> s. Fritsch, 2004, S. 5.7.

---

Nachfolgend werden die beiden Inputgrößen für die Nutzwertanalyse näher beleuchtet. Dabei wird zunächst auf die Kriteriengewichtung, anschließend auf die Alternativenbewertung eingegangen.

### Kriteriengewichtung:

Die Gewichtungsanteile der Kriterien können durch Einsatz verschiedener Methoden gebildet werden (siehe oben). Die Güte dieser methodischen Ansätze beeinflusst dabei maßgeblich die Unsicherheit der ermittelten Gewichtungsanteile.

Der Paarweise Vergleich gilt in der Literatur als einfache Methode, dessen Anwendung keine besonderen Qualifikationen voraussetzt.<sup>11</sup> Ihre intuitive Subjektivität und methodische Einfachheit sind in der Praxis als spezifische Stärke zu sehen. Der Ansatz offenbart jedoch mehrere Schwachstellen, die im Folgenden erläutert werden.

Die normierten Gewichtungsanteile der Kriterien, als Ergebnis des Paarweisen Vergleichs, erwecken den Eindruck, es handle sich um ein durchweg objektives Vorgehen. Der Vergleich eines Kriterienpaars miteinander findet jedoch auf subjektiver Ebene statt. Der Durchführende trifft eine individuelle Entscheidung aus seiner persönlichen Sicht heraus.<sup>12</sup> Dies ist aufgrund unterschiedlichster Zielbezüge der Kriterien auch gar nicht objektiv möglich, was folgendes Beispiel veranschaulichen soll: Welches der beiden Kriterien „Strategiebeitrag“ und „Ressourcenbedarf“ ist im Vergleich als wichtiger anzusehen? Eine objektive, quantifizierte Entscheidung ist hier nicht möglich.

Lediglich intuitive Einschätzungen im Paarweisen Vergleich zu fällen, bedingt eine weitere Schwachstelle der Methode. Bedingt durch die rein subjektive Beurteilung zweier gegeneinander gestellten Kriterien, besteht die Gefahr, grundsätzlich inkonsistente Beurteilungen zu treffen. Das folgende Beispiel soll diesen Aspekt illustrieren. Angenommen sei folgender Zusammenhang:

- Kriterium  $K_1$  wird als wichtiger beurteilt als Kriterium  $K_2$ ,
- Kriterium  $K_2$  wird als wichtiger beurteilt als Kriterium  $K_3$ .
- Kriterium  $K_3$  müsste entsprechend der Logik zwingend unwichtiger eingestuft werden, als Kriterium  $K_1$ .

Im Rahmen der Durchführung des Paarweisen Vergleichs in einem umfangreichen Kriterienkatalog könnte allerdings für den letzten Vergleich zwischen Kriterium  $K_3$  und  $K_1$  in der subjektiven Einschätzung resultieren, dass  $K_3$  als bedeutender eingestuft wird. Eine logische Inkonsistenz ist die Folge, welche z.B. im Rahmen des AHP-Verfahren (Analytical Hierarchy Process) analysiert und gehandhabt werden kann. Das AHP-Verfahren findet aber in der Praxis aufgrund seiner mathematischen Komplexität kaum Anwendung.<sup>13</sup>

Schließlich verlangt der Paarweise Vergleich bei einer großen Anzahl von  $N$  Kriterien (oder Alternativen analog) eine Vielzahl bilateraler Vergleiche, welche mit der Formel  $N \cdot (N - 1)/2$  zu ermitteln sind. Der Aufwand wächst also quadratisch mit der Anzahl der Alternativen.

---

<sup>11</sup> s. Kamiske, 2015, S. 66.

<sup>12</sup> s. Drews/Hillebrand, 2010, S. 137.

<sup>13</sup> vgl. Peters/Zelewski, 2004.

Bei der relativen Gewichtung fallen die Ergebnisse verschiedener Stakeholder auf Kriterien-ebene methodenbedingt oftmals markant unterschiedlich aus, insbesondere wenn die Kriterien hierarchisch aufgebaut sind (Gruppierung von Kriterien zu Hauptkriterien). Diese Deutlichkeit lässt sich gut für eine Analyse des Projekts hinsichtlich Nutzenverteilung oder für eine Interpretation von Interessenkonflikten verwenden.<sup>14</sup>

Bei der absoluten Gewichtung weisen die Faktoren oftmals eine geringere Spannweite auf. Dies ist methodenbedingt darauf zurückzuführen, dass die Kriterien jeweils unabhängig von den restlichen Kriterien gewichtet werden. Die gewichtende Person ist frei, bei jedem Kriterium wieder 100 Punkte vergeben zu können. Damit fallen die oben erwähnten Abhängigkeiten weg und die Ergebnisse sind dadurch oftmals weit weniger deutlich. Es besteht jedoch die Gefahr, dass Stakeholder alles gleich wichtig oder unwichtig ansehen und bspw. in ihrer Gewichtung immer um einen mittleren Wert schwanken.<sup>15</sup>

### **Kriterienbewertung:**

Nachdem den Zielkriterien Gewichtungen zugeteilt wurden, werden die einzelnen Projektalternativen hinsichtlich jedes einzelnen Zielkriteriums separat bewertet.<sup>16</sup> Die Bewertung stellt so den zweiten relevanten Faktor dar, aus dem sich als Produkt der Nutzwert ableitet. Demnach ist es auch, ähnlich den Gewichtungen, sinnvoll, die Bewertungen kritisch zu hinterfragen.

Ein Kritikpunkt der Einzelbewertung ergibt sich bereits aus dem Grundkonstrukt der NWA selbst. Wie in den fachlichen Grundlagen bereits erläutert, können mit Hilfe der NWA Entscheidungsalternativen auf Basis qualitativer und quantitativer Kriterienbewertungen mit einem Ranking versehen werden. Dabei ist genau jener Umstand der Möglichkeit qualitativer und quantitativer Bewertungen kritisch zu erachten.

Eine qualitative Bewertung auf ordinalskaliert Basis für ein Kriterium ist im folgenden Schritt zur Bildung eines Partialnutzwerts in eine kardinale Skala zu transformieren.<sup>17</sup> Wird beispielsweise das Kriterium „Strategiebeitrag“ ordinalskaliert mit „gut“ bewertet, ist diese Bewertung zur Ermittlung des Partialnutzwerts in einen kardinalen Wert, wie zum Beispiel „4“ umzuwandeln.

Bei ursprünglich ordinalen Bewertungen können jedoch keine Relationen zwischen den einzelnen Bewertungsklassen abgeleitet werden. Aufgrund dieser Tatsache sind betroffene Partialnutzwertwerte, die auf transformierten Ordinal-Bewertungen basieren, weniger aussagekräftig, als solche Partialnutzwerte, die aus quantifiziert kardinaler Bewertungsbasis hervorgehen.<sup>18</sup>

Dennoch erwecken die kardinalen Partialnutzwerte, auch wenn sie auf ordinalen transformierten Bewertungen fußen, einen objektiven Eindruck. Insbesondere sind knappe Abstände keine wirkliche Entscheidungshilfe. Der Grund liegt in den Ungenauigkeiten – und gegebenenfalls Willkür – bei der Aufstellung der Scorecard (Kriterien und deren Gewichtung) sowie

---

<sup>14</sup> s. Fritsch, 2004, S. 5.12.

<sup>15</sup> s. ebd.

<sup>16</sup> s. Laschet/Witte/Voigt, 1978, S. 60.

<sup>17</sup> s. ebd., ff.

<sup>18</sup> s. Figge, 2000, S. 109.

---

der Bewertungen der Alternativen. Die Werte suggerieren eine Scheingenauigkeit – besonders, wenn sie als dezimale Mittelwerte von Bewertungen verschiedener Stakeholder angegeben werden. **Generell kann ein Score nicht mit einer größeren Genauigkeit interpretiert werden, als das Ausmaß der Unschärfe der Eingangswerte es zulässt.**

### Betrachtungen zur Sensitivität

Die Sensitivitätsanalyse ist eine Methode, die in vielen technischen und wirtschaftlichen Fachbereichen Anwendung findet. Diese kann in die vergleichenden Priorisierungsmethoden eingruppiert werden.<sup>19</sup> Oftmals wird die Methode zur Überprüfung von Bewertungsergebnissen eingesetzt. Bei Anwendung von Bewertungsmethoden kann es zu einer Vielzahl von Fehlern kommen, deren Auswirkungen sich in Art, Umfang und Schwere unterscheiden können. Aufgrund dessen ist es notwendig, dass ein Bewertungsergebnis hinsichtlich seiner Sensitivität geprüft wird.<sup>20</sup>

Eine Sensitivitätsanalyse wird bei komplexen, schwer überschaubaren Zusammenhängen zwischen den Bewertungskriterien angewendet. Das Ziel ist es, zu ermitteln, wie sensitiv das Bewertungsergebnis auf eine Variation der Randbedingungen (z.B. Maßzahl oder Gewichtung) reagiert.<sup>21</sup> Somit ist bei der Analyse eines Systems das Verständnis vom Einfluss der Variation aller Faktoren (Eingangsparameter/-variablen) auf die resultierenden Abweichungen der betrachteten Systemantwort (Ausgangsparameter/-variablen) wichtig.<sup>22</sup>

Bewertungen werden oft unter der Annahme einer Scheinsicherheit getroffen. Dies bedeutet, dass eine bestimmte zukünftige Entwicklung angenommen wird und der Eintritt als sicher erachtet wird. In der Realität sind die Randbedingungen allerdings mit Unsicherheiten versehen und können somit nicht als sicher angenommen werden.<sup>23</sup>

Bei unplausiblen Bewertungsergebnissen sind diejenigen Randbedingungen zu untersuchen, die bei der Überprüfung zu Unstimmigkeiten geführt haben. Unter Umständen ist die Sensitivität von allen Kriterien zu ermitteln. Es wird damit ein detaillierter Überblick über den Einfluss und die Auswirkungen von Indikatoren aufgezeigt. Des Weiteren kann eine Abschätzung über die Streuung der Werte getroffen werden.<sup>24</sup>

Die kritische Analyse des Bewertungsergebnisses hat den Zweck, dass die Vorteilhaftigkeit der Alternative bestätigt oder widerlegt wird. Unter Umständen kann somit eine neue Rangfolge der Alternativen entstehen.<sup>25</sup> Ziel ist es, einen gezielten Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen zu ermitteln. Die angewendeten Methoden sind vielfach entweder unsystematisch (etwa durch willkürliche Variation von Parametern) oder eindimensional

---

<sup>19</sup> s. Seidl, 2011, S. 65.

<sup>20</sup> s. Feldhusen/Grote, 2013, S. 401.

<sup>21</sup> s. ebd., S. 403.

<sup>22</sup> s. Siebertz et al., 2017, S. 415.

<sup>23</sup> s. Sztuka, o.J.

<sup>24</sup> s. Feldhusen/Grote, 2013, S. 403.

<sup>25</sup> s. Sztuka, o.J.

---

(z.B. bei der Bewertung eines Kursverlaufs). Nach Siebertz et al. werden anhand mathematischer Modelle in verschiedenen Disziplinen grundsätzlich drei Arten der Sensitivitätsanalyse unterschieden:<sup>26</sup>

### Faktor Screening

Bei diesem Verfahren wird der qualitative Einfluss von Eingangsvariablen auf die Ausgangsvariablen ermittelt. Faktor Screening wird oftmals bei Unterscheidungen von signifikanten und nicht signifikanten Faktoren eingesetzt. Zu beachten ist, dass keine quantitativen Kenngrößen ermittelt werden.

### Lokale Sensitivitätsanalyse

Im Rahmen einer lokalen Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss von Faktoren bei einem bestimmten Funktionswert der Ausgangsvariable beziehungsweise bei spezieller Kombination der Eingangsfaktoren (z.B. bei einem lokalen Optimum) untersucht. Dabei wird untersucht, welche Auswirkungen kleine Variationen der Faktoreinstellung beziehungsweise -änderung auf die Ausgangsvariablen haben. Damit können z.B. Stabilitätsanalysen für ausgewählte Faktorkombinationen ermittelt werden.

### Globale Sensitivitätsanalyse

Beim Ansatz einer globalen Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss von Faktoren bei Variation über ihren gesamten Definitionsbereich untersucht. Hierbei wird ein besseres Verständnis sowohl bei der Signifikanz einzelner Faktoren in einem Modell sowie dem direkten Vergleich verschiedener Faktoren geschaffen.

## Formale Betrachtung der Nutzwertanalyse

### Mathematische Modellierung

Im Folgenden werden zunächst die formalen Grundlagen zur weiteren Analyse der NWA gelegt. Hierzu wird die NWA mathematisch modelliert.

### Definition Scorecard

Gegeben seien

- ein Kriterienkatalog, bestehend aus  $N$  verschiedenen Kriterien  $K = \{K_1, \dots, K_N\}$ ,  $N \in \mathbb{N}$  sowie
- $N$  Gewichte  $w_1, \dots, w_N$ ,  $w_i \in \mathbb{R}^+$ ,  $i = 1, \dots, N$ , die die Bedeutung der Kriterien ausdrücken.

Dann heißt  $S(K, w_1, \dots, w_N)$  **Scorecard** des betrachteten Bewertungsproblems.

*Definition 1*

<sup>26</sup> s. Siebertz et al., 2017, S. 415f.

---

**Definition Scorefunktion**


---

Gegeben seien eine Scorecard  $S$  wie in Definition 1 sowie

- eine Kardinalskala  $Z = \{z_i | [z_{\min}, \dots, z_{\max}]\} \subset \mathbb{Z}$ ,  $i = -n \cdot a, -n \cdot a + 1, \dots, n \cdot a - 1, n \cdot a$ , ( $n$  und  $a$  wie auf in Abschnitt *Aufbau der Bewertungsskala* definiert) und
- ein Bewertungsvektor  $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T \in \mathbb{R}^N$ ,  $x_i \in Z$ ,  $i = 1, \dots, N$ , der jedem Kriterium  $K_i$  einen Wert aus der Kardinalskala für eine betrachtete Alternative zuordnet.<sup>27</sup>

Dann heißt

$f: \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}$  mit

$$s = f(x_1, x_2, \dots, x_N) = \sum_{i=1}^N w_i \cdot x_i$$

eine **Scorefunktion**, der zugehörige Funktionswert  $s$  **Score** einer Alternative  $A$ .

Definition 2

Der Score repräsentiert betriebswirtschaftlich den **Nutzwert** der Alternative. Die Scorefunktion wird derart interpretiert, dass ein höherer Funktionswert eine bessere Alternative darstellt. Die Summanden  $s_i = w_i \cdot x_i$  sind die **Partialnutzen** der Alternative zum jeweiligen Einzelkriterium.

Bemerkungen:

- (1) Auf  $w_i = 0$  wird verzichtet, da Kriterien, die mit einem Gewicht von null versehen werden, im Vorfeld von allen Betrachtungen ausgeschlossen werden können.
- (2) Negative Gewichte sind ebenfalls nicht zugelassen, da ein möglicherweise negativer Wertbeitrag auch durch eine entspr. Bewertungsskala erzielt werden kann.
- (3) Der Wertebereich von  $s$  liegt damit im Intervall  $[s_{\min}; s_{\max}]$  mit

$$s_{\min} = z_{\min} \cdot \sum_{i=1}^N w_i$$

und

$$s_{\max} = z_{\max} \cdot \sum_{i=1}^N w_i \cdot$$

- (4) Die Gewichte können auch ohne Einschränkung der Allgemeinheit normiert werden, also  $\sum_i w_i = 1$ .

---

<sup>27</sup> Falls für die Ermittlung der Bewertung der Zielerreichung einer Alternative hinsichtlich eines Zielkriteriums quantifizierbare, direkt messbare Indikatoren verwendet werden, z.B. ein monetärer Wert (im technischen Anwendungsfall kann dies z.B. auch eine physikalische Größe sein) ist eine Transformationsfunktion zu verwenden. Im Zusammenhang mit den Überlegungen dieses Papers kann davon abstrahiert werden, gleichwohl finden sich einige Ausführungen im Anhang.

---

Die Scorefunktion lässt sich geometrisch interpretieren als N-dimensionale Ebene im (N+1)-dimensionalen Raum. Abbildung 4 illustriert dies anschaulich für N=2, das heißt eine (betriebswirtschaftlich unwahrscheinliche) NWA mit 2 Kriterien.

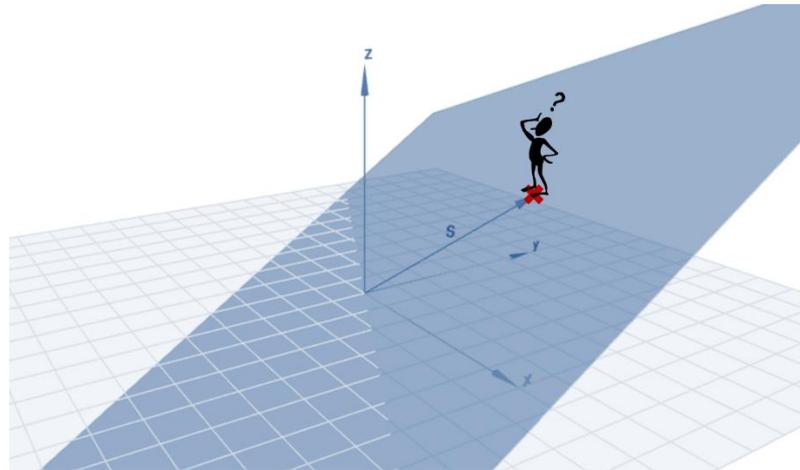


Abbildung 4: Geometrische Interpretation der Scorefunktion

Der Score  $s$  ist also eine bestimmte Position auf der Ebene zur linearen Funktion  $f(x,y)$ . Nimmt man diese Position ein, so ergibt sich bei Entfernung von dieser eine Abweichung des Scores gemäß der Steigung in Richtung der Bewegung. Dies gilt es im Folgenden mathematisch zu modellieren.

Gegeben seien eine Scorecard und eine Scorefunktion wie in Definition 1 und Definition 2 sowie des weiteren  $M$  Alternativen  $A_j$ ,  $j = 1, \dots, M$ . Dann bezeichnet

$$\vec{x}_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{Nj})^T$$

den Bewertungsvektor der Alternative  $A_j$  gemäß der Bedingung aus den genannten Definitionen.

Entsprechend der Variablendeklaration ergibt sich folgender mathematischer Zusammenhang für die Partialnutzwerte einer Nutzwertanalyse:  $s_{ij} = w_i \cdot x_{ij}$ .

Damit ergibt sich der Score der Alternative  $A_j$ ,  $j = 1, \dots, M$ , mit

$$\begin{aligned} s_j &= f(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{Nj}) \\ &= \sum_{i=1}^N w_i \cdot x_{ij}. \end{aligned}$$

Mit  $X \in \text{mat}(N \times M)$  : Bewertungsmatrix aller  $N$  Kriterien der  $M$  Alternativen,  
 $\vec{w} = (w_1, \dots, w_N)^T$  : Zeilenvektor, bestehend aus allen Gewichten der  $N$  Kriterien,  
 und

$\vec{s} = (s_1, \dots, s_M)^T$  : Zeilenvektor, bestehend aus allen Scores der  $M$  Alternativen,

lässt sich  $\vec{s}$  nach den Regeln der Matrixmultiplikation berechnen durch

$$\vec{s} = \vec{w} \cdot X.$$

Die zu präferierende Alternative  $A_{\max}$  ist damit diejenige mit dem höchsten Score und somit

$$s_{\max} = \max_{j=1, \dots, M} \{s_j\}.$$

Damit ergibt sich folgende Notation:

Ein **Scoringmodell**  $S(K, \vec{w}, Z)$  besteht aus einer Menge  $K$  gewichteter Kriterien (Kriterienkatalog) mit den zugehörigen  $N$  Gewichten  $w_i$  sowie einer Skala  $Z$  für die fachlichen Bewertungen. Auf die Konstruktion der Bewertungsskala wurde bereits in Abschnitt *Aufbau der Bewertungsskala* eingegangen.

Eine **Nutzwertanalyse**  $NWA(S, A, X)$  besteht aus einem Scoringmodell  $S$ , einer Menge  $A$  zu bewertender Alternativen  $\{A_1, \dots, A_M\}$ ,  $M \in \mathbb{N}$  sowie einem Bewertungsvektor  $\vec{x}_j$  für jede Alternative  $A_j$ , also einer Bewertungsmatrix  $X \in \text{mat}(N \times M)$ . Die Bewertung einer Alternative  $A_j$  zum Kriterium  $K_i$  wird mit  $x_{ij}$  bezeichnet,  $x_{ij} \in \mathbb{R}$ . In einer einzelnen Bewertung sind die  $x_{ij}$  ganzzahlige Werte, zum Beispiel durch die Betrachtung durchschnittlicher Bewertungen entstehen in der Praxis de facto entsprechende Zwischenwerte, der Wertebereich wird daher auf die reellen Zahlen ausgedehnt.

### Systematische Sensitivitätsanalyse

Grundlegend ist zu beachten, dass die Sensitivität jedes einzelnen Partialnutzwerts innerhalb der Nutzwertanalyse von den beiden Eingangsfaktoren Gewichtung  $w_i$  und Bewertung  $x_{ij}$  abhängt. Sowohl eine Änderung der Kriteriengewichtung  $w_i$ , als auch eine Änderung der Bewertung  $x_{ij}$ , führt zu einer Änderung des Partialnutzwerts  $s_{ij}$ .

Unter der Annahme, dass die beiden Eingangsgrößen und die Ausgangsgröße jeweils als einzelne Dimensionen zu begreifen sind, lassen sich die erläuterten Zusammenhänge dreidimensional veranschaulichen (Abbildung 5, vgl. auch Abbildung 4):

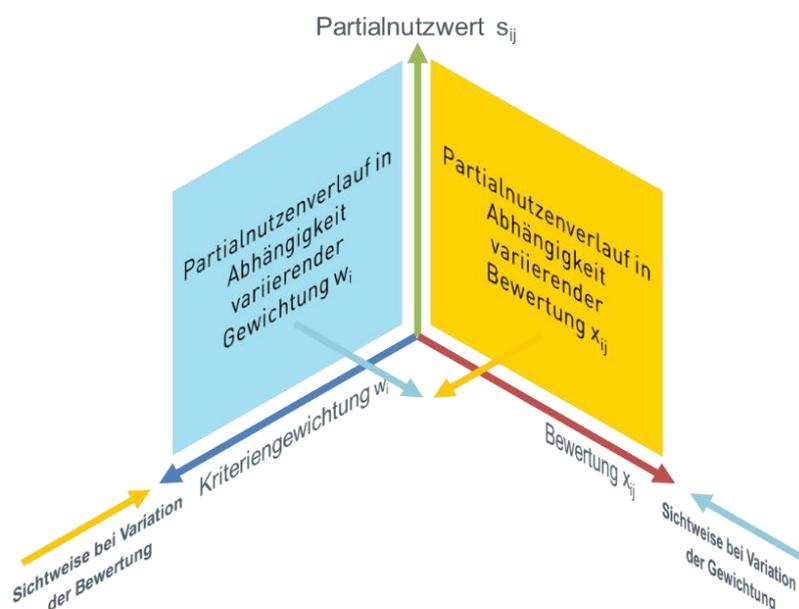


Abbildung 5: Visualisierung lokaler Sensitivität

Durch den blauen und den roten Pfeil werden die Dimensionen der Bewertung und der Kriteriengewichtung abgebildet. Die senkrechte Richtung des grünen Pfeils markiert die Dimension des Partialnutzwerts.

#### Sensitivität der Gewichte

Der Partialnutzenverlauf, der sich in Abhängigkeit einer sich ändernden Kriteriengewichtung ergibt, bewegt sich innerhalb der blauen Ebene der Abbildung 5.

Für den Partialnutzen beispielsweise dreier Projekte  $P_1, P_2, P_3$  zu einem ausgewählten Kriterium  $K_i$ , z.B. Strategiebeitrag, ergeben sich unter Beachtung des Definitionsbereichs und den als konstant angenommenen Bewertungen  $x_{i1}, x_{i2}$  und  $x_{i3}$  folgende Zusammenhänge:

$$s_{i1}(w_i) = x_{i1} \cdot w_i$$

$$s_{i2}(w_i) = x_{i2} \cdot w_i$$

$$s_{i3}(w_i) = x_{i3} \cdot w_i$$

Mathematisch stellt sich der Definitionsbereich der Gewichte folgendermaßen dar (relative Gewichtung, normierte Fassung):

$$w_i \in ]0,1[ , i = 1, \dots, N .$$

Die Partialnutzwerte, die sich in Abhängigkeit verschiedener Kriteriengewichtungen innerhalb des Definitionsraums nach dieser Überlegung ergeben, sind in der folgenden Abbildung 6 visualisiert:

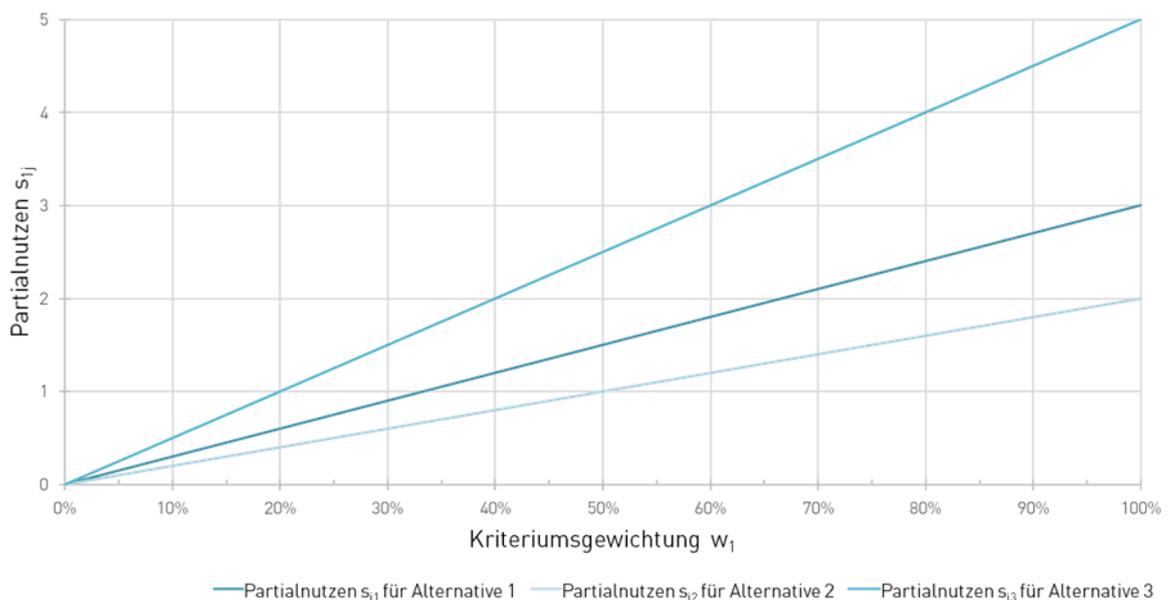


Abbildung 6: Partialnutzen in Abhängigkeit sich ändernder Gewichtung  $w_1$

Beim Studium der Partialnutzenverläufe sind die unterschiedlich stark ausgeprägten Steigungen auffällig. Wie sich erkennen lässt, entsprechen die Steigungen den Bewertungen.

Der mathematische Zusammenhang lässt sich über Differentialrechnung darstellen.<sup>28</sup>

Für die Scorefunktion  $s$  aus Definition 2 ergibt sich:

$$\begin{aligned} s &= f(x_1, x_2, \dots, x_N) \text{ mit} \\ \vec{\nabla}s &= \left( \frac{ds}{dx_1}, \frac{ds}{dx_2}, \dots, \frac{ds}{dx_N} \right)^T \\ &= (w_1, w_2, \dots, w_N)^T, \end{aligned}$$

das heißt der Gradient von  $s$  entspricht aufgrund der Linearität dem Vektor der Gewichte.

Im Folgenden werden nun einige Eigenschaften von NWA beschrieben und analysiert sowie einige Begriffe dazu eingeführt.

### Definition dominantes Gewicht

Ein Gewicht  $w_i$  nennen wir „**dominant**“, wenn gilt

$$w_i > \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N w_j.$$

Mit  $d_i := \frac{w_i}{\sum_{i \neq j} w_j}$  lässt sich die Dominanz graduell messen.

Definition 3

### Definition (vollständige) Homogenität eines Scoring-Modells

Als Homogenität eines Scoringmodell  $S$  bezeichnen wir die Charakteristik von  $S$  hinsichtlich der Verteilung der Gewichte  $w_i$ .

Wir nennen ein  $S$  „**vollständig homogen**“, wenn gilt:

$$\forall_{i=1, \dots, N}: w_i = w.$$

Definition 4

Dann gilt:

$$\forall_i: d_i = \frac{w}{\sum_{i \neq j} w} = \frac{w}{(N-1) \cdot w} = \frac{1}{N-1}.$$

Da  $N$  beliebig und  $\geq 2$  ist, gilt:

$$\forall_i: 0 < d_i \leq 1.$$

Bei beispielhaft  $N=11$  Kriterien ist dann  $d_i = 0,1 \forall_i$ .

<sup>28</sup> Hinsichtlich der Grundlagen zur Bildung des Gradienten einer Funktion wird auf den Anhang *Gradient einer Funktion*, S. 37, verwiesen.

### Definition relative Dominanz

Wir bezeichnen die Abweichung vom Wert vollständiger Homogenität, also den Parameter

$$d_i^r := d_i - \frac{1}{N-1}$$

als „relative Dominanz“ eines Gewichts  $w_i$ .

Definition 5

Im homogenen Fall ( $\forall_{i=1,\dots,N}: w_i = w$ ) gilt deshalb:

$$d_i^r = \frac{w_i}{\sum_{i \neq j} w_i} - \frac{1}{N-1} = \frac{w}{(N-1) \cdot w} - \frac{1}{N-1} = 0.$$

Das heißt die relative Dominanz eines beliebigen Kriteriums eines vollständig homogenen Scoring-Modell S ist gleich Null.

Wenn  $d_i > 1$ , das heißt  $w_i$  ist dominant, dann gilt:

$$d_i^r = d_i - \frac{1}{N-1} > 1 - \frac{1}{N-1} = \frac{N-2}{N-1}.$$

Für ein dominantes Kriterium  $K_i$  gilt somit, dass die relative Dominanz größer als  $\frac{N-2}{N-1}$  ist.

Für alle Scorecards S gilt  $N \geq 2$ , damit ist die relative Dominanz definiert, denn:

$$d_i^r > \frac{N-2}{N-1} \geq 0.$$

Falls  $d_i \leq \frac{1}{N-1}$ , dann gilt:

$$d_i^r = d_i - \frac{1}{N-1} \leq \frac{1}{N-1} - \frac{1}{N-1} = 0.$$

Daraus kann abgeleitet werden, dass unterhalb von  $d_i = \frac{1}{N-1}$  „keine“ relative Dominanz gegeben ist. Dieser Sachverhalt kann anhand eines Zahlenstrahls visuell dargestellt werden (Abbildung 7).

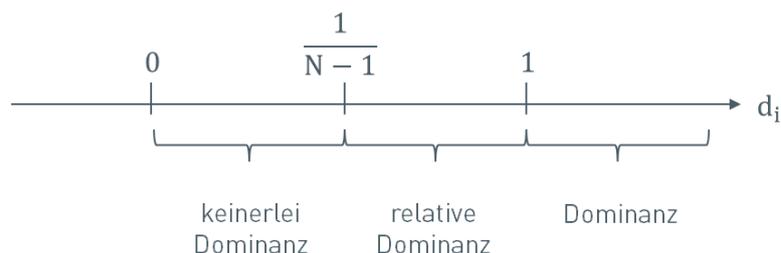


Abbildung 7: Zahlenstrahl zur Dominanz

Nachdem Erkenntnisse zur lokalen Sensitivität hinsichtlich der Kriteriengewichtungen erzielt werden konnten, ist es im nächsten Schritt nötig, den Einfluss auf sich ändernde Bewertungen abzuschätzen.

## Sensitivität der Bewertungen

An dieser Stelle wird zunächst zur Bildung des Partialnutzwerts davon ausgegangen, dass die Kriteriengewichtung fix und die Bewertung veränderlich ist. Dies entspricht genau dem umgekehrten Fall der vorhergehenden Betrachtung.

So ergibt sich folgender mathematischer Zusammenhang für die Partialnutzen der drei Projekte hinsichtlich eines Kriteriums:

$$s_{i1}(x_{i1}) = w_i \cdot x_{i1}$$

$$s_{i2}(x_{i2}) = w_i \cdot x_{i2}$$

$$s_{i3}(x_{i3}) = w_i \cdot x_{i3}$$

Entsprechend der festgelegten Bewertungsskala für die Nutzwertanalyse gilt für den Definitionsbereich:  $w_i \in \mathbb{R}^+$ .

Da sich die Partialnutzwerte von Projektalternativen in Abhängigkeit sich verändernder Bewertung für ein Kriteriumsgewicht  $w_i$  gleichen, werden die Verläufe für beispielhaft fünf verschiedene  $w_i$  in Abbildung 8 dargestellt:

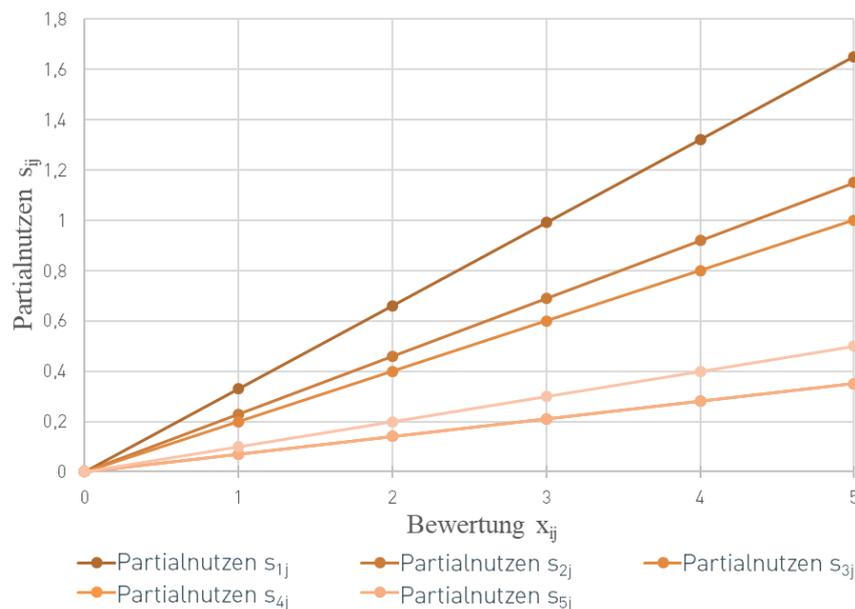


Abbildung 8: Partialnutzen in Abhängigkeit sich ändernder Bewertung

Bei der Darstellung des Partialnutzenverlaufs wurde bewusst auf eine stufenförmige Darstellung verzichtet, die sich strenggenommen aus dem Definitionsraum der natürlichen Zahlen ergibt (ordinale Skala). Stattdessen wurden die Partialnutzwerte, die sich aus dem Definitionsraum ergeben, durch Punkte hervorgehoben.

Interpretiert man den Score als eine differenzierbare Funktion  $s(x, y)$ , die jeder Bewertung den zugehörigen Nutzwert zuordnet (vgl. Abbildung 4), dann ist der Gradient von  $s$  an der Stelle  $(x, y)$  ein Vektor, der in die Richtung des größten Anstiegs von  $s$  zeigt. Der Betrag dieses Vektors gibt die größte Steigung an diesem Punkt an.

---

 Bildung des totalen Differentials der Scorefunktion
 

---

Im Falle der Score-Funktion

$$s(x_1, \dots, x_N) = w_1 \cdot x_1 + w_2 \cdot x_2 + \dots + w_N \cdot x_N$$

ist das totale Differential leicht zu berechnen.<sup>29</sup> Mit

$$\frac{ds}{dx_1} = w_1, \frac{ds}{dx_2} = w_2, \dots, \frac{ds}{dx_N} = w_N$$

ergibt sich

$$ds = w_1 \cdot dx_1 + w_2 \cdot dx_2 + \dots + w_n \cdot dx_n,$$

beziehungsweise in angenäherter Form

$$\Delta s = w_1 \cdot \Delta x_1 + w_2 \cdot \Delta x_2 + \dots + w_N \cdot \Delta x_N .$$

Bei einer Schwankung der Bewertung  $x_i$  um  $\Delta x_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) ergibt sich die Abweichung  $\Delta s$  im Nutzwert.

---

 Errechnung und Abschätzung des Absoluten Fehlers und des Worst Case
 

---

Für den absoluten Fehler<sup>30</sup> der Scorefunktion gilt damit

$$\begin{aligned} |\Delta s| &= |w_1| \cdot |\Delta x_1| + |w_2| \cdot |\Delta x_2| + \dots + |w_N| \cdot |\Delta x_N| \\ &= w_1 \cdot |\Delta x_1| + w_2 \cdot |\Delta x_2| + \dots + w_N \cdot |\Delta x_N| , \end{aligned}$$

da  $w_i > 0, i = 1, \dots, N$ .

Das heißt der absolute Fehler einer Scorefunktion  $s$  ist unabhängig von der betrachteten Stelle des Systems und hängt vielmehr ausschließlich von der Unschärfe der Bewertungen ab.

Wenn man davon ausgeht, dass ein professioneller und erfahrener Gutachter bei seiner Bewertung (z.B. Management bei Entscheidungen) sich maximal subjektiv um eine Einheit auf der Kardinalskala verschätzt (falsch einschätzt), also  $\Delta x_i \pm 1$ , erhält man aus der Herleitung des absoluten Fehler:

$$\begin{aligned} |\Delta s| &= w_1 \cdot |\pm 1| + w_2 \cdot |\pm 1| + \dots + w_n \cdot |\pm 1| \\ &= w_1 \cdot 1 + w_2 \cdot 1 + \dots + w_n \cdot 1 \\ &= w_1 + w_2 + \dots + w_n \\ &= \sum_{i=1}^N w_i . \end{aligned}$$

Damit ist der Worst Case in diesem Fall entsprechend zu ermitteln. Falls die Bewertungsskala auf 1 normiert ist, ergibt sich zudem  $|\Delta s| = 1$ .

---

<sup>29</sup> Hinsichtlich der Grundlagen zur Bildung des totalen Differentials einer Funktion wird auf den Anhang *Totales Differential einer Funktion*, S. 37, verwiesen.

<sup>30</sup> Hinsichtlich der Grundlagen zur Berechnung des absoluten Fehlers wird auf den Anhang *Absoluter Fehler*, S. 38, verwiesen.

---

Falls  $K_d$  ein dominantes Kriterium ist, ergibt sich:

$$|\Delta s| = w_d + \sum_{i \neq d} w_d$$

$$< 2 \cdot w_d .$$

Das heißt unter der Annahme, dass die Bewertung je Kriterium um maximal eine Einheit fehlerhaft ist, beträgt der Fehler des Scores maximal ( $2 \cdot w_d$ ).

Der relative Fehler gibt den prozentualen Anteil des Fehlers vom Ergebnis an. Für  $s$  ergibt sich  $\left| \frac{\Delta s}{s} \right|$ .

---

### Stabilität der Nutzwerte bei gleichförmiger Änderung der Bewertungen

---

Im Allgemeinen berechnet sich  $s_j$  wie folgt:

$$s_j = \sum_{i=1}^N w_i \cdot x_{ij}$$

Wie verhält sich der Score bei Hinzunahme eines Inkrements  $\Delta x \forall_i$ ?

Sei  $s_j^1$  der ursprüngliche Score, dann errechnet sich der veränderte Score  $s_j^2$  wie folgt:

$$s_j^2 = \sum_{i=1}^N w_i \cdot (x_{ij} + \Delta x)$$

$$= \sum_{i=1}^N w_i \cdot x_{ij} + \sum_{i=1}^N w_i \cdot \Delta x$$

$$= s_j^1 + W \cdot \Delta x \quad \text{mit } W := \sum_{i=1}^N w_i .$$

Das heißt  $\forall_j$  gilt: Der Score  $s_j$  ändert sich bei gleicher Variation aller Bewertungen mit  $\Delta x$  um den Wert ( $W \cdot \Delta x$ ). Falls die Scorecard auf 100% beziehungsweise 1 normiert ist, dann ist dabei  $W = 1$ .

Dies liegt in der Linearität der Funktion begründet. **Es macht also keinen Sinn, im Zuge der Sensitivitätsanalyse bei allen Bewertungen das identische Inkrement zu addieren.** Eine differenzierte Variation der Bewertungen ist notwendig!

---

### Dominanz einer Bewertung in den Extremen

---

Sei der Wertebereich der Bewertungen einer NWA im Intervall  $[-n \cdot a, +n \cdot a]$  (vgl. Abbildung 3, S. 4),

$(-n \cdot a)$  repräsentiere die schlechteste oder geringste Ausprägung eines Merkmals,

$(+n \cdot a)$  die beste oder höchste Ausprägung eines Merkmals.

---

Wenn Kriterium  $K_d$  dominant ist, dann dominiert die Bewertung  $x_d$  alle anderen Bewertungen für die betrachtete Alternative, falls  $x_d = -n \cdot a$  oder  $x_d = +n \cdot a$ , das heißt falls  $x_d$  eine Bewertung im Extremen ist.

Beweis: Es gilt  $w_d > \sum_{i \neq d}^N w_{id}$  und damit

$$s(x_d) = w_d \cdot x_d > \sum_{i \neq d}^N w_{id} \cdot x_d > \sum_{i \neq d}^N (w_{id} \cdot x_i) = \sum_{i \neq d}^N s_i(x_i) \quad \text{q.e.d.}$$

Es stellt sich die Frage, wie groß  $\Delta x_i$  sein muss, damit sich das Ranking verändert und bei welchem Kriterium diese angewendet werden muss.

### Zielgerichtete Variation einzelner Bewertungen $x_{ij}$

Seien  $s_k^1$  und  $s_l^1$  zwei Scores der NWA für die Alternativen  $A_k$  und  $A_l$ . Ohne Beschränkung der Allgemeinheit gelte  $s_k^1 > s_l^1$ , das heißt die Differenz  $D^1$  der betrachteten Scores ist positiv:  $0 < D^1 := s_k^1 - s_l^1$ . Sei ohne Beschränkung der Allgemeinheit  $\Delta x_{il} = 0 \forall i \neq 1$  und  $\Delta x_{1l} > 0$ , das heißt der Score der Alternative  $A_l$  soll durch Variation der Bewertung des ersten Kriteriums vergrößert werden. Es gilt:

$$\begin{aligned} s_l^2 &:= \sum_{i=1}^N w_i \cdot (x_{il} + \Delta x_{il}) \\ &= \sum_{i=1}^N w_i \cdot x_{il} + \sum_{i=1}^N w_i \cdot \Delta x_{il} \\ &= s_l^1 + w_1 \cdot \Delta x_{1l}. \end{aligned}$$

Bezeichne  $D^2$  die neue Differenz  $s_k^1 - s_l^2$  bei variierender Bewertung der Alternative  $A_l$ :

$$\begin{aligned} D^2 &= s_k^1 - s_l^2 = s_k^1 - (s_l^1 + w_1 \cdot \Delta x_{1l}) \\ &= s_k^1 - s_l^1 - w_1 \cdot \Delta x_{1l} \\ &= D^1 - w_1 \cdot \Delta x_{1l}. \end{aligned}$$

Da die Frage lautet, wann sich die Verhältnisse umdrehen, muss gelten:

$$\begin{aligned} D^2 &\leq 0 \\ \Leftrightarrow D^1 - w_1 \cdot \Delta x_{1l} &\leq 0 \\ \Leftrightarrow D^1 &\leq w_1 \cdot \Delta x_{1l} \\ \Leftrightarrow \frac{D^1}{w_1} &\leq \Delta x_{1l} \quad (\text{da } \forall_i: w_i > 0). \end{aligned}$$

Das heißt, bei  $\Delta x_{1l} = D^1/w_1$  ändert sich das Ranking der Scores  $s_l$  und  $s_k$ .

Wenn  $w_1 = \max\{w_j\}$ , dann wird  $D^1/w_1$ , das heißt  $\Delta x_{1l}$  minimal.<sup>31</sup>

<sup>31</sup> Die analoge Aussage lässt sich herleiten, wenn mit  $\Delta x_{1k} < 0$  der Score der Alternative  $K$  verringert werden soll.

Daraus folgt: Das kleinste Inkrement  $\Delta x_i$  sollte anhand der größten Gewichtung  $w_i$  gewählt werden! Insbesondere relevant sind diesbezüglich daher dominante Kriterien (siehe Definition 3, S. 14).

Ferner: Wenn die Unschärfe bezüglich der Bewertung einer Alternative A hinsichtlich eines betrachteten Kriteriums größer als  $\Delta x_1$  ist, (also  $D_1/w_1$ ), dann wird das Ranking instabil (siehe dazu folgendes Kapitel *Umgang mit Unschärfen*).

Heatmap zur Nutzwertanalyse

Wie in den vorangegangenen Ausführungen hergeleitet, ist es sinnvoll, die erstellte NWA hinsichtlich ihrer kritischen Gewichte und Bewertungen beziehungsweise Partialnutzwerte zu analysieren. Dazu bietet es sich an, die NWA im Stil einer **Heatmap** zu visualisieren, bei der die entsprechenden Elemente farblich hervorgehoben werden und somit die Identifikation relevanter Elemente erleichtert. Wie in Abbildung 9 ersichtlich, können durch grafische und farbliche Elemente beispielsweise das dominante Kriterium (falls vorhanden), die schwerwiegendsten Partialnutzwerte, die Scores sowie die Rangfolge visualisiert werden. Im Beispiel sind die rot gefärbten Werte als kritisch im Sinne der Sensitivitätsanalyse zu betrachten.

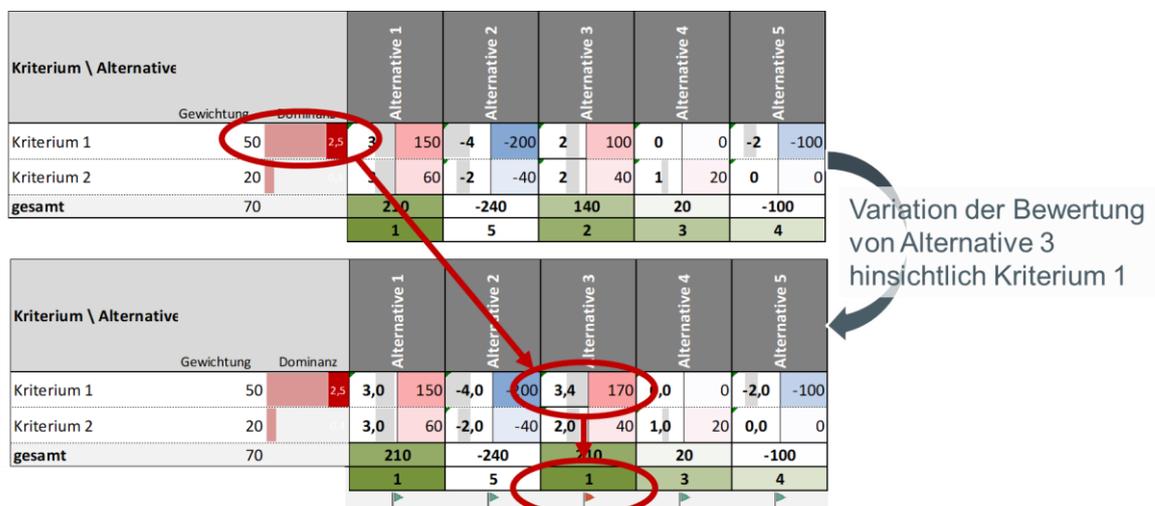


Abbildung 9: Gezielte Variation der Bewertungen

Abbildung 9 dient zur Veranschaulichung der Analyse anhand eines sehr simplen Beispiels, nämlich einer NWA mit nur zwei Kriterien, wovon Kriterium 1 dominant ist ( $d_1 = 2,5$ ). Der Score  $s_1$  der Alternative  $A_1$  beträgt 210, derjenige der zweitplatzierten Alternative  $A_3$  beträgt 140. Damit ergibt sich eine Differenz in Höhe von 70.

Das dominante Kriterium hat ein Gewicht in Höhe von 50. Damit lässt sich die für eine Veränderung der Rangfolge notwendige  $\Delta x_1$  errechnen mit  $\Delta x_1 = D_1/w_1 = 1,4$ . Eine Erhöhung der Bewertung des Kriteriums 1 der Alternative 3 um 1,4 verändert also die Rangfolge, wie in Abbildung 9, unterer Teil, zu sehen ist.

## Umgang mit Unschärfen

### Ursachen und Auswirkungen

Im vorangegangenen Kapitel wurde dargestellt, wie sich lokale Sensitivitäten in einer NWA analysieren lassen. Hintergrund dieser Überlegungen war, festzustellen, wie empfindlich die jeweiligen Partialnutzwerte auf Änderungen in puncto Bewertung und Kriteriengewichtung reagieren. In diesem Zusammenhang wurden jedoch die Aspekte möglicher Unschärfe der Bewertungen und der Gewichtungen explizit nicht betrachtet.

Wird eine hohe lokale Sensitivität eines Partialnutzwerts festgestellt, ist es zielführend bezüglich der Aussagekraft der NWA, die Unschärfe der Eingangsgrößen für jenen Partialwert klein zu halten. Der Grund liegt auf der Hand: Kleine Änderungen dieser Eingangsgrößen führen zu höheren Änderungen des Partialnutzwerts, als im Falle eines weniger sensitiven Partialnutzwerts.

Die Ursachen und die Arten der Unschärfe innerhalb einer NWA können vielfältig sein. Generell sind in der betriebswirtschaftlich Modellbildung Unschärfen aufgrund und im Sinne von Komplexität, Sprache, Zufälligkeit und Abstraktion zu erkennen.<sup>32</sup> Alle diese Ausprägungen erscheinen im Rahmen einer NWA ebenso relevant. Insbesondere sei im Folgenden auf Unschärfe aufgrund von Unsicherheiten bei der Priorisierung der Kriterien und der Bewertung der Alternativen fokussiert, da diese bei der NWA als (inter-) subjektive Methode zur ex ante Betrachtung eines betriebswirtschaftlichen Entscheidungsproblems in der Natur der Sache liegen. Die folgende Überlegung zeigt, dass bei der Sensitivitätsanalyse von Nutzwerten die Sicherheit der Eingangsgrößen betrachtet werden muss.

Ist eine festgelegte Gewichtung und Bewertung hochsicher, so spielt die Sensitivität eine geringere Rolle, als wenn die Gewichtung oder die Bewertung hochgradig unsicher ist, da sich im zweiten Fall eine viel höhere Änderung am Partialnutzwert ergeben kann. Beispielsweise könnte ein unempfindlicher Partialnutzwert, der jedoch von hohen Unsicherheiten der Eingangsgrößen geprägt ist, einen größeren Einfluss auf den Gesamtnutzwert ausüben, als ein sehr sensitiver Partialnutzwert, dessen Eingangsgrößen als sehr sicher gelten.

Unsicherheiten bestehen also hinsichtlich des Aufbaus der Scorecard und der Bewertung jeder einzelnen Alternative. Sie können unter anderem entstehen durch

- fachliche Schwierigkeiten (z.B. aufgrund der Komplexität, der Neuartigkeit etc.) bei der Ermittlung der Parameter,
- Angabe von 3-Punkt-Schätzungen (Realistic, Best und Worst Case-Werte) sowie
- unterschiedliche Meinungen der Stakeholder.

Auch wenn quantifizierbare Größe, wie z.B. das Budget, verwendet werden, ist aufgrund des Schätzcharakters mit Abweichungen zu rechnen. Andere Parameter sind per se nur ungenau, das heißt ordinal, anzugeben, z.B. „Strategische Bedeutung“ o.ä. Damit liegt im Allgemeinen eine NWA vor, bei der Ungenauigkeiten in der Bestimmung verschiedener Parameter dazu führen, dass das Ergebnis – also das Ranking auf Basis der Scores – nur mit Unsicherheit genutzt werden kann. Letztlich bestimmt die Unschärfe der Eingangsparameter die Bandbreite, in denen die Scores der Alternativen nicht unterscheidbar sind (auch wenn sie

---

<sup>32</sup> vgl. Hüsselmann, 2003, S. 43-45.

vermeintlich unterschiedliche Werte (teilweise im Nachkommabereich) aufweisen. Die manipulative Veränderung der Parameter ist zudem in der erlebten Praxis zu beobachten, jedenfalls nicht auszuschließen.

### Handhabung

Generell kann die Unsicherheit also die (Gewichte der) Kriterien betreffen sowie insbesondere die Bewertungen einer Alternative  $A_j$  hinsichtlich eines Kriteriums  $K_i$ . Im Folgenden werden (nur) die Bewertungen betrachtet, eine Betrachtung der Gewichte kann analog vorgenommen werden.

Je nach Entstehungsart (s.o.) sind verschiedene Werte für die Parameter der NWA verfügbar, dazu gehören etwa: der identifizierte Wert  $x_{ij}$ , eine Bandbreite um diesen Wert  $x_{ij}$  herum mit unterem Wert und oberem Wert (nicht notwendigerweise symmetrisch um  $x_{ij}$  herum gelegen) sowie gegebenenfalls Maximal- und Minimalwerte, etwa als Ausreißer innerhalb einer Stichprobe (siehe Abbildung 10).

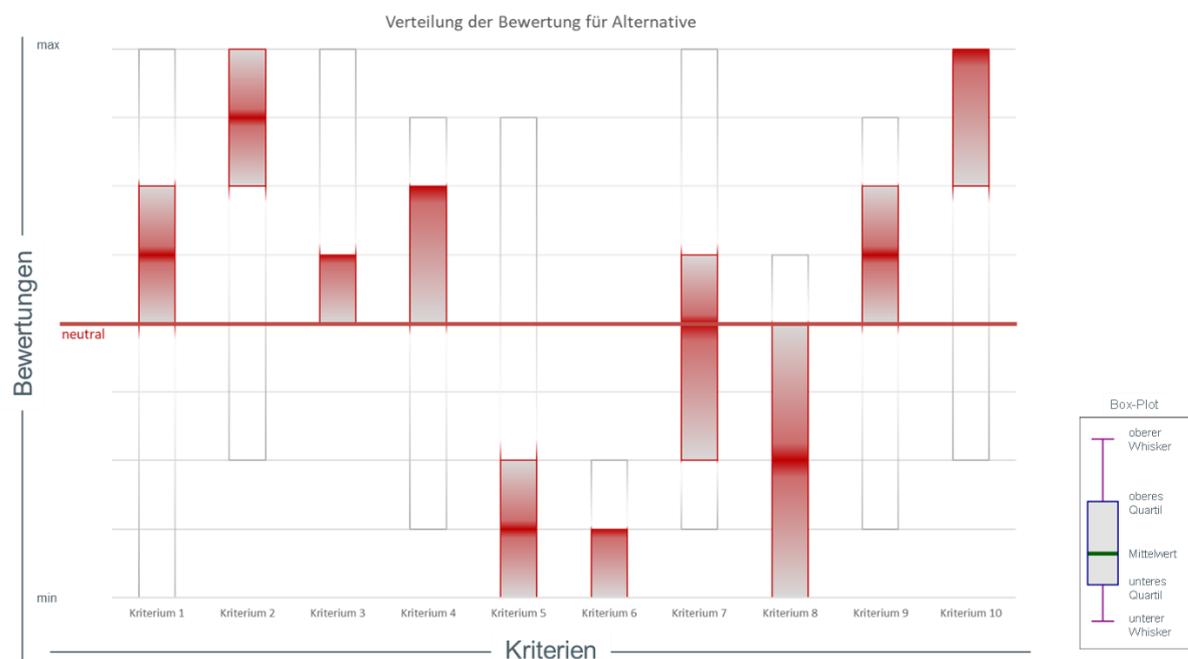


Abbildung 10: Darstellung der Unschärfen bezüglich Bewertungen

Je stärker die verschiedenen Werte von der eigentlichen Bewertung abweichen, desto größer ist die Unschärfe.

Unschärfen spielen dann eine signifikante Rolle in der NWA, wenn ausgerechnet Parameter unsicher sind, die entscheidend zum Nutzwert/Score einer Alternative beigetragen haben. Daher bietet es sich an, im Zuge der Sensitivitätsanalyse der Nutzwerte dort genau hinzuschauen, wo die Heatmap der NWA eine Indikation gibt (Abbildung 11).

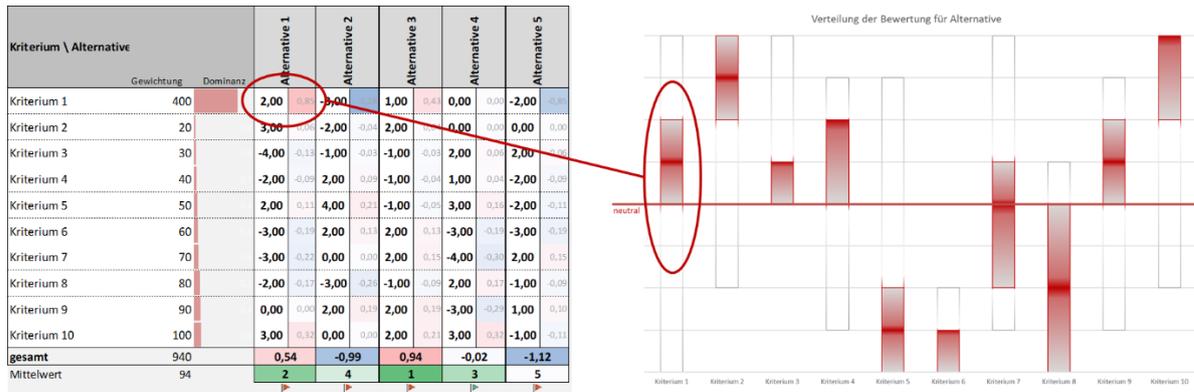


Abbildung 11: Zusammenhang Unsicherheit und Heatmap der NWA

In Kapitel *Sensitivität der Bewertungen* wurde gezeigt, wie stark die Bewertungen einer (priorisierten) Alternative variiert werden können, sodass sich eine Veränderung der Rangfolge der Alternativen ergibt. Damit ergibt sich ein entsprechender Bewertungsspielraum, der in Zusammenhang mit der Unschärfeanalyse (rechte Seite der Abbildung) gesetzt werden kann: Liegt die Bandbreite der Unschärfe bezüglich einer Kriterienbewertung innerhalb des Toleranzbereichs einer unveränderten Rangfolge, dann ist die NWA als diesbezüglich verlässlich zu bezeichnen. Andernfalls, ist also die Bandbreite der Unschärfe größer als der Toleranzbereich, sind die Ergebnisse der NWA kritisch zu hinterfragen. Gegebenenfalls kann die Sicherheit der Bewertung erhöht werden (etwa durch erneute Diskussion einer Einschätzung) oder die Rangfolge muss de facto nicht gegeben angesehen werden.

Enthält die NWA dominante Kriterien, dann sollte sich die geschilderte Analyse auf diese fokussieren.

## Praktische Anwendung

### Vorgehensmodell

Die mathematischen Betrachtungen der vorherigen Kapitel können in ein Vorgehensmodell zur Sensitivitätsanalyse transferiert werden (Abbildung 12).

Im Zuge der Analyse wird dabei zunächst die Möglichkeit eine Rangfolgeänderung untersucht. Damit wird festgestellt, wie eindeutig und klar das Ergebnis der vorliegenden NWA einzustufen ist. Wenn dabei festgestellt wird, dass die Änderung der Rangfolge einiger Alternativen um die vermeintliche beste im Bereich des Möglichen liegt, beginnt die tiefergehende Analyse der NWA. Dazu wird im zweiten Abschnitt ermittelt, wie homogen oder inhomogen das Scoringmodell ist. Ergeben sich hierbei dominante Kriterien, dann sind diese als sensibel identifiziert und werden schließlich im dritten Abschnitt einer weiterführenden Analyse unterzogen, die den Kern des Verfahrens darstellt.

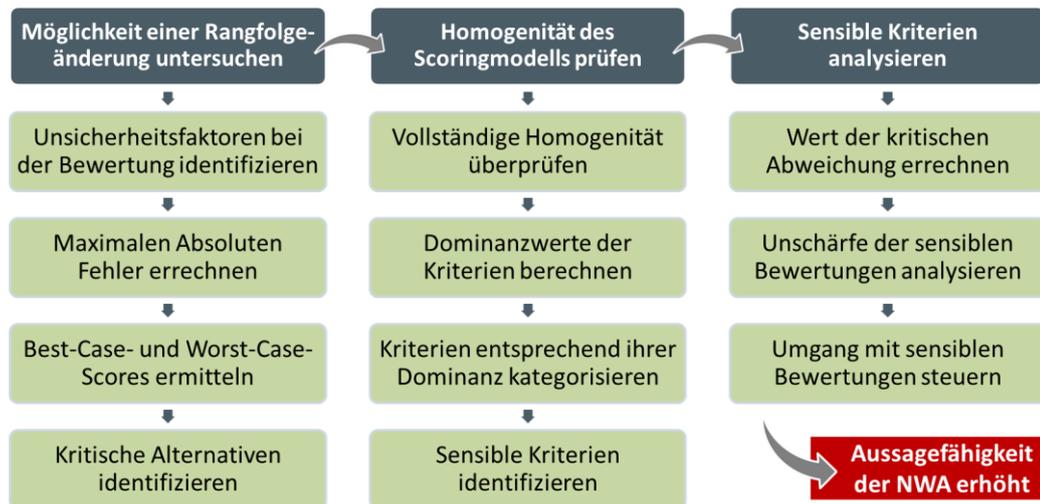


Abbildung 12: Vorgehensmodell zur Sensitivitätsanalyse

Dabei wird zunächst für die sensiblen Kriterien der Abweichungswert errechnet, also dasjenige  $\Delta x_{ij}$ , bei dem sich die Rangfolge der Alternativen bzgl. der Spitzenposition ändern würde. Dieser Wert wird nun dahingehend untersucht, ob er in der durch die Unschärfe der entsprechenden Bewertung induzierten Bandbreite der realen Bewertung liegt. Ist dies der Fall, dann ist das Ergebnis der (ursprünglichen) NWA so zu interpretieren, dass eine Aussage hinsichtlich der Rangfolge nicht getätigt werden kann und der weitere Umgang mit der NWA ist festzulegen. Dazu könnte beispielweise eine erneute Bewertungsrunde mit Experten zur Klärung von Unsicherheiten gehören.

Das geschilderte Vorgehen soll nun an einem konkreten Praxisbeispiel veranschaulicht werden.

## Fallbeispiel Einführung Personalverwaltungssystem

### Szenario

Vor einigen Jahren hat das Bundesverkehrsministerium ein Programm zur Modernisierung administrativer Aufgaben durch Geschäftsprozessoptimierung und IT-Einsatz (MaAGIE) durchgeführt. Teil dieses Programms war die Einführung eines einheitlichen Personal-, Dienstposten- und Stellenverwaltungssystems (PVS) im gesamten Ressort. Unterstützt wurde das Ministerium dabei durch Konsortium, bestehend aus den Firmen IDS Scheer, SAP Deutschland und T-Systems. Die Implementierung der personalwirtschaftlichen Geschäftsprozesse mit SAP basierte auf dem Modul HCM.<sup>33</sup> Das vorliegende Beispiel (Abbildung 13), das im Folgenden mit den entwickelten Instrumenten der vorherigen Kapitel untersucht wird, ist diesem Großprojekt entnommen.<sup>34</sup> Dabei standen zu einem bestimmten Zeitpunkt

<sup>33</sup> Villmow et al., 2008, S. 11.

<sup>34</sup> Die tatsächlichen Werte in der NWA wurden teilweise zur Verdeutlichung von Effekten leicht verändert.

während des Projektverlaufs zur Integration des neuen Tarifvertragswerks für den öffentlichen Dienst (TVÖD) vier alternative Projektvorgehensweisen zur Disposition – etwa eine parallel Bearbeitung oder ein sequenzieller Einschub (PVS 2.0).

Nutzwertanalyse Projekt PVS 2.0					
Kriterium		Projekt A	Projekt B	Projekt C	Projekt D
Name	w <sub>j</sub> [%]	x <sub>iA</sub>	x <sub>iB</sub>	x <sub>iC</sub>	x <sub>iD</sub>
<b>Projektierung</b>					
Realisierungsdauer	5	0,71	1,54	-0,86	1,41
Realisierungsaufwand	10	-2,00	0,71	-1,14	1,17
Realisierungsrisiko	10	-2,00	0,71	-0,86	0,71
Schnittstellenproblematik	10	-1,29	-0,14	-1,29	1,58
Qualifizierungsaufwand	5	0,71	0,43	-0,43	-1,23
<b>Betrieb</b>					
Systemhoheit	5	-0,54	0,43	-0,57	1,63
Systempflegeaufwand	10	-1,14	1,00	-0,57	1,43
<b>Organisationsentwicklung</b>					
Akzeptanz	10	-1,14	0,71	0,71	-1,17
Strategische Ausrichtung	15	-1,29	1,29	0,29	1,86
Organisatorische Optimierung	5	-1,43	1,00	0,86	0,57
Nutzen	15	-1,14	0,86	1,00	-0,57
<b>Ergebnis</b>		<b>-122,00</b>	<b>79,15</b>	<b>-17,15</b>	<b>68,45</b>

Bewertungsspanne	Beurteilung
≥ -2,0 ... ≤ -1,2	Eindeutig negativ
> -1,2 ... ≤ -0,4	Eher negativ
> -0,4 ... ≤ +0,4	Neutral
> +0,4 ... ≤ +1,2	Eher positiv
> +1,2 ... ≤ +2,0	Eindeutig positiv

Abbildung 13: Nutzwertanalyse Fallbeispiel

Das Fallbeispiel besteht aus demnach vier alternativen Projekt(vorgehensweis)en A bis D; diese wurden anhand von elf Kriterien bewertet. In einer Zelle (z.B.  $x_{1A} = 0,71$ ) steht die Bewertung für ein Projekt in Bezug auf das betrachtete Kriterium. Die Bewerter haben in einer Bewertungsrunde jeweils ihren Worst-, Realistic- und Best-Case in der Bewertungsskala von -2 (eindeutig negativ) bis +2 (eindeutig positiv) angeben. Die eingetragenen Werte kommen durch die Mittelwertbildung der Realistic-Case-Bewertungen der verschiedenen Bewerter zustande. In der abschließenden Zeile „Ergebnis“ wird der Gesamtscore für jedes Projekt angegeben. Der Gesamtscore wird durch die Formel  $s_j = \sum_i w_i \cdot x_{ij}$  errechnet.

Die Anwendung der Vorgehensweise zur Sensitivitätsanalyse der NWA wird in den nachfolgenden Seiten anhand des Fallbeispiels erläutert und gliedert sich in folgende Hauptschritte

1. Möglichkeit einer Rangfolgeänderung prüfen
2. Homogenität des Scoringmodells prüfen
3. Zielgerichtete Variation einzelner Bewertungen  $x_{ij}$
4. Unschärfebetachtung ausgewählter Bewertungen

#### Prüfung der Möglichkeit einer Rangfolgeänderung

Zuerst ist im Rahmen der Sensitivitätsanalyse die Möglichkeit einer Rangfolgeänderung innerhalb der Bewertungsbandbreite zu analysieren. Hierbei wird die Annahme des maximalen Schätzfehlers der kompetenten Bewerter aus der theoretischen Herleitung aufgegriffen. Bei dieser wird angenommen, dass sich ein erfahrener Bewerter um maximal eine Bewertungskategorie der ordinalen Bewertungsskala verschätzt, was durch einen Zahlenwert von Eins ausgedrückt wird. Da die Bewertungsskala von -2 bis +2 abgestuft ist, kann aber der Fall eintreten, dass eine ganzzahlige Bewertungseinheit nicht mehr addiert oder subtrahiert werden kann.

Beispielhafte Rechnung für das erste Kriterium für Projekt B mit  $x_{1B} = 1,54$ :

Da die Bewertungsskala ein Maximum von +2 besitzt, würde durch das Addieren einer Bewertungseinheit der Maximalwert überschritten. In diesem Fall wird die maximal mögliche Differenz addiert, das heißt  $\Delta^+x_{1B} = 0,46$ .

Das Vorgehen wird analog für die untere Bewertungsgrenze von -2 durchgeführt.

Die nachfolgende Abbildung stellt das Vorgehen für jedes Projekt in Verbindung mit den Kriterien dar.

Nutzwertanalyse Projekt PVS 2.0														
Kriterium		Projekt A			Projekt B			Projekt C			Projekt D			
Name	$w_i$ [%]	$x_{iA}$	$\Delta^+x_{iA}$	$\Delta^-x_{iA}$	$x_{iB}$	$\Delta^+x_{iB}$	$\Delta^-x_{iB}$	$x_{iC}$	$\Delta^+x_{iC}$	$\Delta^-x_{iC}$	$x_{iD}$	$\Delta^+x_{iD}$	$\Delta^-x_{iD}$	
<b>Projektierung</b>														
Realisierungsdauer	5	0,71	1,00	-1,00	1,54	0,46	-1,00	-0,86	1,00	-1,00	1,41	0,59	-1,00	
Realisierungsaufwand	10	-2,00	1,00	-1,00	0,71	1,00	-1,00	-1,14	1,00	-0,86	1,17	1,00	-1,00	
Realisierungsrisiko	10	-2,00	1,00	-1,00	0,71	1,00	-1,00	-0,86	1,00	-1,00	0,71	0,00	-1,00	
Schnittstellenproblematik	10	-1,29	1,00	-0,71	-0,14	1,00	-1,00	-1,29	1,00	-0,71	1,58	0,42	-1,00	
Qualifizierungsaufwand	5	0,71	1,00	-1,00	0,43	1,00	-1,00	-0,43	1,00	-1,00	-1,23	1,00	-0,77	
<b>Betrieb</b>														
Systemhoheit	5	-0,54	1,00	-1,00	0,43	1,00	-1,00	-0,57	1,00	-1,00	1,63	0,37	-1,00	
Systempflegeaufwand	10	-1,14	1,00	-0,86	1,00	1,00	-1,00	-0,57	1,00	-1,00	1,43	0,57	-1,00	
<b>Organisationsentwicklung</b>														
Akzeptanz	10	-1,14	1,00	-1,00	0,71	1,00	-1,00	0,71	1,00	-1,00	-1,17	1,00	-0,83	
Strategische Ausrichtung	15	-1,29	1,00	-0,71	1,29	0,71	-1,00	0,29	1,00	-1,00	1,86	0,14	-1,00	
Organisatorische Optimierung	5	-1,43	1,00	-0,57	1,00	1,00	-1,00	0,86	1,00	-1,00	0,57	1,00	-1,00	
Nutzen	15	-1,14	1,00	-0,86	0,86	1,00	-1,00	1,00	1,00	-1,00	-0,57	1,00	-1,00	
<b>Ergebnis</b>		<b>-122,00</b>	<b>+100,00</b>	<b>-65,70</b>	<b>79,15</b>	<b>+92,95</b>	<b>-100,00</b>	<b>-17,15</b>	<b>+100,00</b>	<b>-95,70</b>	<b>68,45</b>	<b>+60,10</b>	<b>-97,15</b>	

Abbildung 14: Möglichkeit einer Bewertungsschwankung (maximaler Fehler)

Die Summen der Spalten  $\Delta^+x_{ij}$  und  $\Delta^-x_{ij}$  sind definiert als:

$$\Delta^+X_j = \sum_{i=1}^N w_i \cdot (\Delta^+x_{ij}) \quad \text{und}$$

$$\Delta^-X_j = \sum_{i=1}^N w_i \cdot (\Delta^-x_{ij}).$$

Beispielhaft für Projekt A:

$$\Delta^+X_A = 100,00 \quad \text{und}$$

$$\Delta^-X_A = -65,70.$$

Dies beschreibt die maximale Abweichung in positive und negative Richtung vom ursprünglichen Score. Um Schlussfolgerungen ziehen zu können, muss zudem der maximal und minimal mögliche Score berechnet werden. Der maximale und minimale Score ist definiert als:

$$s_j^{\max} = s_j + (\Delta^+X_j) \quad \text{und}$$

$$s_j^{\min} = s_j + (\Delta^-X_j)$$

Die nachfolgende Abbildung stellt den ursprünglichen, den maximalen und den minimalen Score der Projekte grafisch dar.

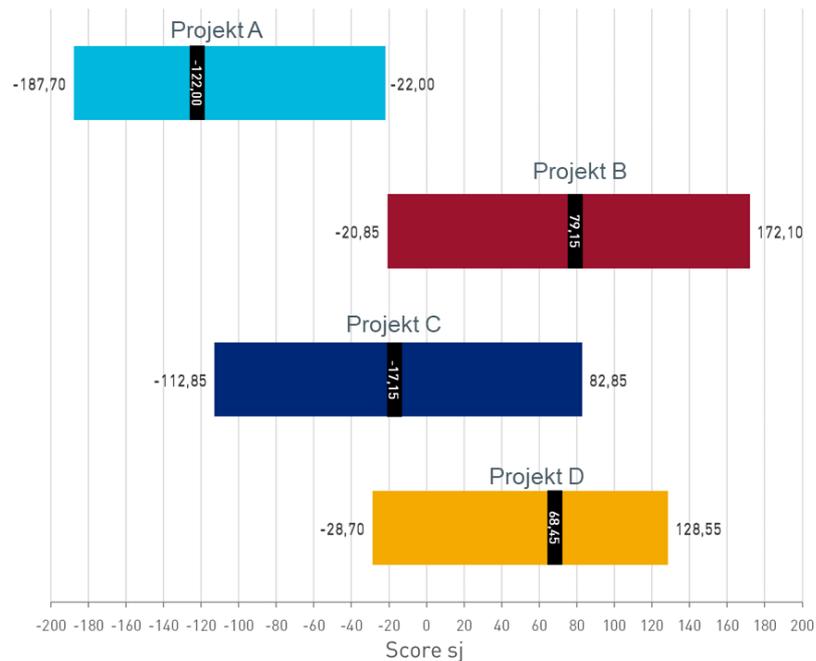


Abbildung 15: Score-Bandbreite der Projektalternativen

Anhand dessen können für die vier Projektalternativen folgende Feststellungen getroffen Schlussfolgerungen gezogen werden:

<b>Projekt A</b>	Projekt mit dem schlechtesten Ausgangs-Score, belegt somit den 4. Platz im Ranking. Der maximale Score kann -22,00 betragen. Verglichen mit dem minimalen Score von Projekt 2 (-20,85) bedeutet dies, dass Projekt A auch mit einem maximalen Score nicht übertreffen kann. Somit muss Projekt A im Weiteren nicht genauer betrachtet/analysiert werden.
<b>Projekt B</b>	Projekt mit dem besten Ausgangsscore, belegt somit den 1. Platz im Ranking. Es gilt im Nachfolgenden als Benchmark.
<b>Projekt C</b>	Projekt, das anhand des Ausgangs-Scores den 3. Platz belegt. Beim Erreichen des maximalen Scores könnte dieses Projekt den 1. Platz im Ranking erreichen. Somit wird das Projekt im Weiteren genauer betrachtet/analysiert.
<b>Projekt D</b>	Projekt, das anhand des Ausgangs-Scores den 2. Platz belegt. Beim Erreichen des maximalen Scores könnte dieses Projekt den 1. Platz im Ranking erreichen. Somit wird das Projekt im Weiteren genauer betrachtet/analysiert.

Allgemein kann aus der Grafik abgeleitet werden, dass alle Projekte, die durch ihre maximale Score-Ausprägung den Ausgangsscore des erstplatzierten Projekts übertreffen können, in die Analyse mit einbezogen werden. Im vorliegenden Fallbeispiel bedeutet dies, dass die Projekte C und D in Bezug auf Projekt B weiter analysiert werden.

Prüfung der Homogenität des Scoringmodells

Als erster Schritt wird die vollständige Homogenität (siehe Definition 4) geprüft. Ein Scoringmodell wird als vollständig homogen bezeichnet, wenn gilt:

$$\forall_{i=1,\dots,N}: w_i = w.$$

Diese Bedingung ist bei diesem Fallbeispiel nicht erfüllt, da die Gewichtungen für die Kriterien ungleich sind. Dies kann der nachfolgenden Abbildung 16 entnommen werden.

Nutzwertanalyse Projekt PVS 2.0			
Kriterium			
Name	w <sub>i</sub> [%]	d <sub>i</sub>	d <sub>i</sub> <sup>r</sup>
<b>Projektierung</b>			
Realisierungsdauer	5	0,0526	-0,0474
Realisierungsaufwand	10	0,1111	0,0111
Realisierungsrisiko	10	0,1111	0,0111
Schnittstellenproblematik	10	0,1111	0,0111
Qualifizierungsaufwand	5	0,0526	-0,0474
<b>Betrieb</b>			
Systemhoheit	5	0,0526	-0,0474
Systempflegeaufwand	10	0,1111	0,0111
<b>Organisationsentwicklung</b>			
Akzeptanz	10	0,1111	0,0111
Strategische Ausrichtung	15	0,1765	0,0765
Organisatorische Optimierung	5	0,0526	-0,0474
Nutzen	15	0,1765	0,0765

Abbildung 16: Dominanz und relative Dominanz

Falls eine vollständige Homogenität vorhanden wäre, so wäre diese:

$$\forall_{i=1,\dots,N}: d_i = \frac{1}{N-1} = \frac{1}{11-1} = 0,1$$

Das Scoringmodell des Fallbeispiels kann somit nicht als vollständig homogen bezeichnet werden.

Als zweiten Schritt wird die Dominanz (siehe Definition 3) jedes Kriteriums berechnet. Ziel ist es, jedes Kriterium in eine der drei Kategorien (keinerlei Dominanz, relative Dominanz oder Dominanz) einzuteilen. Die Wertebereiche dieser Kategorien sind (Abbildung 17):

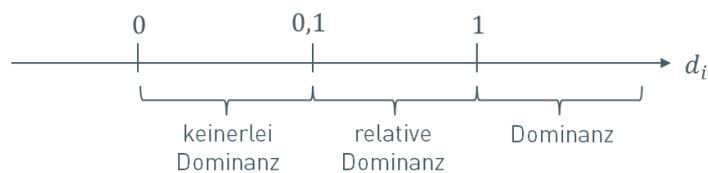


Abbildung 17: Zahlenstrahl zur Dominanz

Anhand folgender Definition kann der Dominanzgrad berechnet werden:  $d_i := \frac{w_i}{\sum_{i \neq j} w_j}$ .

Beispielhaft ergibt sich für das 1. Kriterium:

$$d_1 = \frac{5}{10 + 10 + 10 + 5 + 5 + 10 + 10 + 15 + 5 + 15} = 0,0526 .$$

Die weiteren sowie die folgenden Ergebnisse können aus der Abbildung 16 entnommen werden.

Anschließend wird die relative Dominanz berechnet. Für diese gilt:  $d_1^r = d_1 - \frac{1}{N-1}$ .

Beispielhaft ergibt sich für das 1. Kriterium:

$$d_1^r = 0,0526 - 0,1 = -0,0474 .$$

Nachfolgend wird sowohl die Dominanz als auch die relative Dominanz in zwei Grafiken veranschaulicht (siehe Abbildung 18).

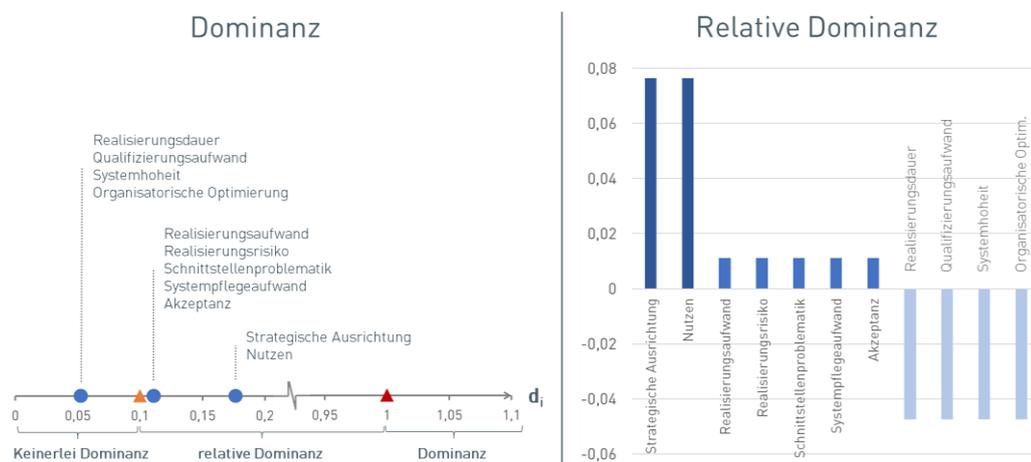


Abbildung 18: Grafische Darstellung der Dominanz und der relativen Dominanz

Anhand der Grafik zur relativen Dominanz kristallisieren sich drei Gruppen von Kriterien heraus. Dementsprechend können diese in drei Kategorien eingeteilt werden.<sup>35</sup>

Mit Hilfe dieser Einteilung können folgende Schlussfolgerungen getroffen werden:

Kategorie A	Sind Kriterien, die durch ihre Gewichtung einen <b>hohen Einfluss</b> am Gesamtscore haben. Somit müssen diese Kriterien mit <b>hoher Aufmerksamkeit</b> betrachtet werden.
Kategorie B	Sind Kriterien, die durch ihre Gewichtung einen <b>erhöhten Einfluss</b> am Gesamtscore haben. Somit müssen diese Kriterien mit <b>erhöhter Aufmerksamkeit</b> betrachtet werden.
Kategorie C	Sind Kriterien, die durch ihre Gewichtung einen <b>geringen Einfluss</b> am Gesamtscore haben. Somit müssen diese Kriterien mit einer <b>geringeren Aufmerksamkeit</b> betrachtet werden.

<sup>35</sup> Im allgemeinen Fall kann dies durch eine systematische ABC-Analyse ermittelt werden.

Abschließend ist festzuhalten, dass das Scoringmodell weder als vollständig homogen bezeichnet werden kann noch ein dominantes Kriterium besitzt, sondern nur Kriterien mit relativer oder keinerlei Dominanz. Wird die relative Dominanz mit einbezogen, so ist zu erkennen, dass sowohl strategische Ausrichtung als auch Nutzen der Kategorie A zugeordnet sind. Den beiden Kriterien sollte demzufolge die maximale Aufmerksamkeit zugewendet werden.

#### Zielgerichtete Variation einzelner Bewertungen

Im dritten Schritt wird systematisch betrachtet, welcher Variation einzelner Bewertungen es bedarf, um das Ranking im Ergebnis der NWA zu beeinflussen.

Ist eine einzelne Bewertung stark zu variieren, um eine potenzielle Rangfolgeänderung herbeizuführen, weist dies auf wenig kritische Stellen innerhalb einer NWA hin. Dies begünstigt die Stabilität und die Aussagekraft des ausgegebenen Rankings. Resultiert anderenfalls bereits eine geringfügige Bewertungsvariation  $\Delta x_{ij}$  in einer Änderung der ursprünglichen Rangfolge, ist dies ein Indikator auf die Instabilität der NWA. Auf eben jene Stellen sollte das Augenmerk des Analysten gelenkt werden: **Nutzwertanalysen, die von hoher Instabilität geprägt sind, sind keine solide Basis einer Entscheidungsvorbereitung.**

Eine Änderung des Rankings wird dann eintreten, wenn die Score-Differenz zwischen dem ursprünglich höheren Score  $s_B$  und dem sich durch Bewertungsvariation ergebenden Score einer anderen Projektalternative Null ist oder negativ ausfällt.

Für die Höhe jener Bewertungsvariation, die eine Rangfolgeänderung mit sich bringt, gilt entsprechend der Herleitung zur zielgerichteten Variation von Bewertungen folgender mathematische Zusammenhang:

$$\Delta x_{ij} := \frac{\text{Differenz der Scores}}{w_i}.$$

Um die Bewertungsvariation gemäß oben abgebildeter Formel zu berechnen, gilt es die Ausgangsdifferenz  $D^1$  zwischen den Scores der beiden betrachteten Projekte, zu ermitteln. Die Gewichtung  $w_i$  kann dem Scoremodell der NWA entnommen werden.

Zur Ermittlung von  $D^1$  ist zunächst festzulegen, welche Platzierungswechsel im Ranking der Projekte Gegenstand der Betrachtung sein sollen. Vor allem Rangfolgewechsel, die die Deklaration des bestmöglichen Projekts beeinflussen, sind relevant. Folglich wird zur Ermittlung von  $D^1$  jenes Projekt mit dem höchsten Score als Referenz festgelegt. Gegenüber dieser Referenz werden die Score-Differenzen der übrigen Projekte gebildet.

Im vorliegenden Beispiel markiert Projekt B den höchsten Ausgangsscore und Platz Eins im Ranking. Dementsprechend sind die Score-Differenzen, die die übrigen Projekte zu Projekt B aufweisen, zu bilden.

Für  $D^1$  ergibt sich beim Vergleich zwischen Projekt B und Projekt D ein Betrag von

$$D^1 = s_B - s_D = 79,15 - 68,45 = 10,70.$$

Untersucht man nun, welche Bewertungsvariation von Projekt D hinsichtlich des Realisierungsrisikos eintreten müsste, um das Ranking zu beeinflussen, ergibt sich

$$\Delta x_{4D} = \frac{D^1}{w_4} = \frac{10,70}{10} = 1,07.$$

Hätte Projekt D hinsichtlich des Realisierungsrisikos statt einer Bewertung  $x_{3D}$  von 0,71, eine Bewertung von 1,78 erhalten (ursprüngliche Bewertung  $x_{3D}$  um  $\Delta x_{3D}$  erhöht), wäre das Ranking beeinflusst. Die Scores von Projekt B und Projekt D betragen in diesem hypothetischen Fall beide 79,15. Beiden Projektalternativen würden im Ranking die erste Position zugeordnet werden.

Diese Überlegung kann für jede einzelne Bewertung  $x_{ij}$  der übrigen Projekte durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Berechnung sind in untenstehender Tabelle einzusehen. Hierbei wird auf die Darstellung von Projekt B verzichtet, da es lediglich als Referenz dient.

Nutzwertanalyse Projekt PVS 2.0					
Kriterium		Projekt C		Projekt D	
Name	$w_i$ [%]	$x_{ij}$	$+\Delta x_{1C}$	$x_{ij}$	$+\Delta x_{1D}$
<b>Projektierung</b>					
Realisierungsdauer	5	-0,86	19,26	1,41	2,14
Realisierungsaufwand	10	-1,14	9,63	1,17	1,07
Realisierungsrisiko	10	-0,86	9,63	0,71	1,07
Schnittstellenproblematik	10	-1,29	9,63	1,58	1,07
Qualifizierungsaufwand	5	-0,43	19,26	-1,23	2,14
<b>Betrieb</b>					
Systemhoheit	5	-0,57	19,26	1,63	2,14
Systempflegeaufwand	10	-0,57	9,63	1,43	1,07
<b>Organisationsentwicklung</b>					
Akzeptanz	10	0,71	9,63	-1,17	1,07
Strategische Ausrichtung	15	0,29	6,42	1,86	0,71
Organisatorische Optimierung	5	0,86	19,26	0,57	2,14
Nutzen	15	1	6,42	-0,57	0,71
<b>Ergebnis</b>		<b>-17,15</b>	<b>-</b>	<b>68,45</b>	<b>-</b>



Abbildung 19: Bewertungsvariation in Heatmap-Darstellung

Entsprechend der betragsmäßigen Höhe der Bewertungsvariation wurde ein Farbskalensystem implementiert (Heatmap). Dieses soll es dem Betrachter ermöglichen, auf den ersten Blick kritische Stellen zu identifizieren. Dabei weisen Rottöne auf geringe Bewertungsvariationen hin, Blautöne auf höhere.

Bewertungsvariationen ab einem Betrag  $>4$  sind unter Beachtung der Bewertungsskala von  $-2$  bis  $+2$  nicht möglich und daher irrelevant. Aus diesem Grund sind solche Bewertungsvariationen einheitlich blau eingefärbt. Dies trifft auf jede Bewertungsvariation  $+\Delta x_{1C}$  von Projekt C zu. Die durchgängig blaue Einfärbung weist den Betrachter visuell darauf hin, dass einzelne Bewertungsvariationen bezüglich Projekt C in keinem Fall eine Beeinflussung des Rankings vermögen. Projekt C wird aus diesem Grund in der Folge nicht mehr betrachtet.

Violet- und Rottöne weisen auf berechnete Bewertungsvariationen von  $\leq 4$  hin. Diese Farben sind in der Spalte von Projekt D zu sehen und sind in Abhängigkeit der ursprünglichen Bewertung  $x_{ij}$  im Rahmen der festgelegten Bewertungsskala potenziell möglich. Die sich ergebende Bewertung nach Aufschlag der berechneten Bewertungsvariationen kann innerhalb

der definierten Bewertungsspanne liegen, sie kann diese unter Umständen jedoch auch überschreiten. Dies kann im Folgenden anhand zweier Beispiele nachvollzogen werden.

Eine Bewertungsvariation von 2,14 hinsichtlich der Realisierungsdauer von Projekt D wäre nicht möglich, da das Projekt ursprünglich schon eine Bewertung von 1,41 erhalten hat. Die maximal mögliche Bewertung von 2 wäre bei Aufschlag der Bewertungsvariation überschritten (3,55). Auf der anderen Seite kann die ermittelte Bewertungsvariation hinsichtlich des Realisierungsaufwands von Projekt D jedoch im Rahmen der festgelegten Bewertungsspezifikation erhöht werden. Bei Variation der Originalbewertung ergibt sich eine Bewertung von 1,9, was innerhalb der definierten Bewertungsspanne liegt.

Bewertungen wie letztere gelten innerhalb der NWA als besonders kritisch. Variationen jener Einzelbewertungen im Rahmen der Bewertungsspanne, können das Ranking direkt beeinflussen. Um die Aufmerksamkeit der Nutzer auf jene Stellen zu lenken, sind solche Stellen fett hervorgehoben und mit einem rautenförmigen Warnsymbol versehen.

#### Unschärfetrachtung ausgewählter Bewertungen

Im letzten Schritt wird herausgestellt, welche Bewertungsvariationen im Rahmen der definierten Bewertungsspanne von -2 bis +2 eine Beeinflussung des Rankings vermögen könnten. Diese Stellen wurden per visueller Indikation in Form eines Warnsymbols hervorgehoben. Die bloße Tatsache, dass eine Bewertungsvariation im definierten Bewertungsrahmen ein Ranking beeinflussen kann, sagt isoliert betrachtet jedoch noch nichts über die Stabilität der NWA aus. Zusätzlich gilt es, eine Unschärfetrachtung bezüglich der einzelnen Bewertungen zu tätigen.

Lediglich wenn die Unschärfe bezüglich einer Bewertung die berechnete Bewertungsvariation, die eine Rangfolgebeeinflussung vermag, übertrifft, ist die Stabilität des Rankings nicht mehr gegeben. In diesem Fall wäre das Ranking instabil und die Aussagekraft des Resultats der NWA anzweifelbar. Im Folgenden wird daher die Unschärfe der Bewertungen der berechneten Bewertungsvariation aus Schritt 3 gegenübergestellt. In diesem Kontext sind nur solche Bewertungen von Relevanz, die auch im Rahmen der festgelegten Bewertungsspanne eine Rangfolgebeeinflussung erwirken können und im vorherigen Schritt mit einem Warnsymbol versehen wurden.

Die Unschärfen werden aus Durchschnittswerten der durchgeführten Dreipunktschätzung abgeleitet. Die Differenz zwischen der durchschnittlichen Best-Case- und der durchschnittlichen Worst-Case Bewertung wird im Folgenden als Unschärfespanne angenommen. Für die vier kritischen Bewertungen sind diese Unschärfen im folgenden Diagramm (Abbildung 20) ersichtlich.

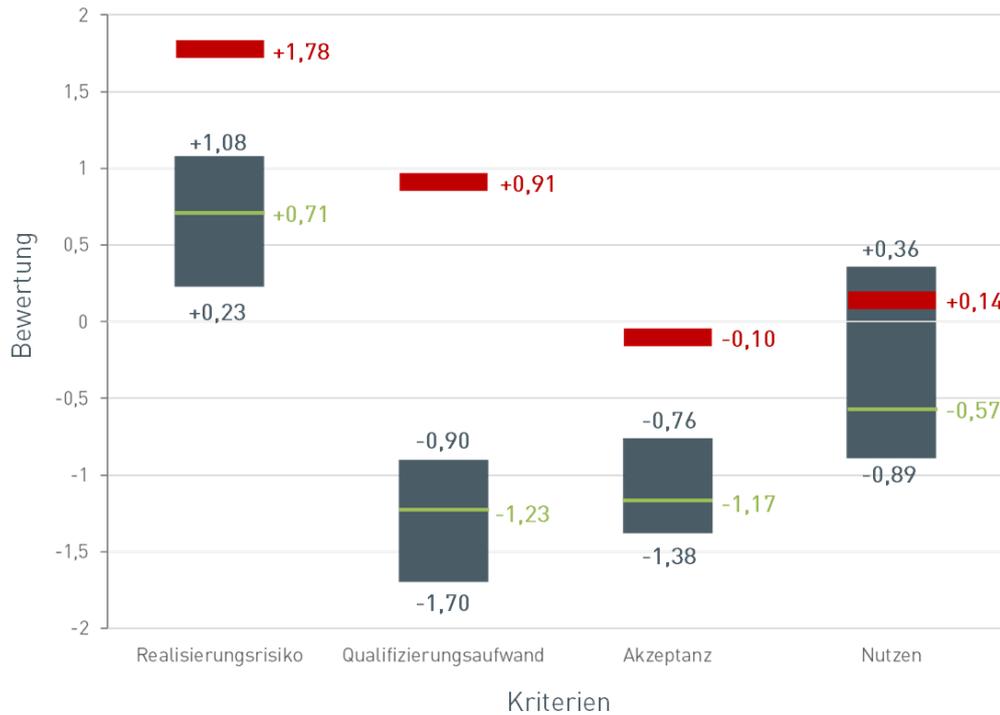


Abbildung 20: Unschärfespannen bei der Bewertung der Kriterien

Die durchschnittlichen Bewertungen des Realistic-Case hinsichtlich der Kriterien sind jeweils mit einem grünen Querstrich dargestellt. Die ober- und unterseitigen Balkengrenzen markieren die durchschnittlichen Best-Case und Worst-Case Beurteilungen. Der rote Querstrich stellt jene Absolutbewertung dar, die eine Rangfolgebeeinflussung verursachen würde.

Hinsichtlich der Kriterien „Realisierungsrisiko“, „Qualifizierungsaufwand“ und „Akzeptanz“ hat das Bewertungs-Unsicherheitsfeld keinen Kontakt zur rangfolgebeeinflussenden Bewertung. Selbst bei Eintritt des Best-Cases einer Bewertung würde das bisherige Ranking bestehen bleiben. Anders jedoch bei dem Kriterium „Nutzen“. Die rangfolgebeeinflussende Bewertung von 0,14 liegt hier innerhalb der Unsicherheitsspanne. Würde die durchschnittliche Best-Case Nutzenbewertung von Projekt D eintreten, würde Projekt D als beste Handlungsalternative in der NWA ausgegeben werden.

**Da dies völlig aber grundsätzlich unsicher ist, kann auch das Ranking nicht aussagekräftig interpretiert werden.** Die Stabilität des Rankings ist durch die geringe Score-Differenz zwischen Projekt B und Projekt D und den Unsicherheiten bezüglich der Bewertungen beeinträchtigt. Eine valide Identifikation des besten und zweitbesten Projekts ist unter diesen Umständen nicht möglich und die Alternativen sind im Rahmen der festgestellten Unschärfe als gleichwertig anzusehen.

## Resümee

Bei der Priorisierung von Alternativen kommen in der Praxis oftmals Scoring-Modelle, wie z.B. die NWA, zum Einsatz. Im Falle der NWA werden zum Teil subjektive Einschätzungen in schein-objektive Einschätzungen überführt. Neben diesem kritischen Aspekt können weitere Kritikpunkte identifiziert werden – etwa wie die Eingangsgrößen der NWA zustande kommen.

Bei der Analyse der Sensitivität liegt das Hauptaugenmerk auf den Partialnutzwerten. Es wurden mathematische Herangehensweisen entwickelt, die Partialnutzwerte in puncto lokaler Sensitivität und Sicherheit überprüfen. Dabei konnte die These bestätigt werden, dass manche Partialnutzwerte sensitiver auf eine Änderung der Eingangsgrößen reagieren, als andere Partialnutzwerte, die unempfindlicher demgegenüber sind.

Zusammenfassend wird auf die hohe Bedeutung einer kritischen Untersuchung, sowohl auf Sensitivitäten, als auch auf hohe Sicherheiten bezüglich der Eingangsgrößen hingewiesen. So können Abweichungen der Eingangsgrößen innerhalb geringer Unsicherheiten verhältnismäßig große Auswirkungen auf den Partialnutzwert haben, wenn dieser entsprechend sensitiv ist. Andersherum ist die Betrachtung der Sensitivität der Partialnutzwerte nur wenig aufschlussreich, wenn keine Untersuchung zu den Unsicherheiten der Eingangsgrößen folgt. In diesem Fall kann auch ein unempfindlicher Partialnutzwert, der aus unsicheren Eingangsgrößen gebildet wird, den Nutzwert stark beeinflussen.

Da bei der praktischen Anwendung, insbesondere bei der Bewertung von Projektalternativen, unsystematische Sensitivitätsanalysen durchgeführt wurden, stellt die entwickelte Vorgehensweise einen Mehrwert in Bezug auf die Transparenz und Strukturiertheit dar.

Ein besonderes Augenmerk wurde darauf gelegt, dass die Sensitivitätsanalyse nicht nur mathematisch fundiert hergeleitet, sondern dass die Methode in der Praxis leicht anwendbar ist. Das Ergebnis wird in einer leicht verständlichen Weise dargestellt, damit Entscheider einen einfachen Zugang zu dem Modell haben und Entscheidungen treffen können, ohne zu tief in das Modell einsteigen zu müssen, um es zu verstehen. Dies wurde erreicht, indem lokale Sensitivitäten im Modell grafisch hervorgehoben werden, um sie visuell mit anderen Sensitivitäten vergleichen zu können (Heatmap).

Ebenfalls wurde gezeigt, wie sich Unschärfen der Eingangsgrößen neben der Sensitivität auf das Endergebnis auswirken und welche Wirkzusammenhänge zwischen den Unsicherheiten und den Sensitivitäten im Hinblick auf die Ergebnisveränderung bestehen.

Im Rahmen der Steuerung des Entscheidungsprozesses obliegt es dem Management, zu entscheiden, wie mit den gewonnenen Erkenntnissen, beispielsweise der Identifikation besonders kritischer Bewertungen, umzugehen ist. Eine mögliche Konsequenz könnte die Durchführung einer weiteren Bewertungsrunde eines Delphi-Verfahrens<sup>36</sup> sein – mit dem Ziel, die Bandbreite der Bewertungen und in diesem Sinne die Unschärfe zu verringern.

Die Erkenntnisse der Arbeit lassen sich auch auf andere Bereiche – fernab des Multiprojektmanagements – anwenden, in denen Entscheidungen zu verschiedenen Handlungsalternativen mit der NWA vorbereitet werden müssen.

---

<sup>36</sup> vgl. zum Beispiel Corsten et al., 2006, S. 292-294.

## Anhang

### Literatur- und Quellenverzeichnis

BLW/suissemelio/geosuisse (Hrsg.) (2009): Wegleitung Landwirtschaftliche Planung. Position und Entwicklung der Landwirtschaft im Zusammenhang mit raumrelevanten Vorhaben. Hg. v. Bundesamt für Landwirtschaft, Schweizerische Vereinigung für ländliche Entwicklung und Schweiz. Verband für Geomatik und Landmanagement. Bern (CH), online: <https://www.meliorationen.ch>, abgerufen 17.07.2019.

Corsten, Hans/Gössinger, Ralf/Schneider, Herfried (2006): Grundlagen des Innovationsmanagements, München, 2006

Drews, Günter/Hillebrand, Norbert (2010): Lexikon der Projektmanagement-Methoden: [die besten Methoden für jede Situation; Werkzeugkasten für effizientes Projektmanagement; auf CD-ROM: Methodenbeispiele und Checklisten], 2. Aufl., Freiburg/Br., 2010

Feldhusen, Jörg/Grote, Karl-Heinrich (2013): Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung, 8., vollst. überarb. Aufl. 2013, Berlin, Heidelberg, 2013

Figge, Frank (2000): Öko-Rating: Ökologieorientierte Bewertung von Unternehmen, Berlin, Heidelberg, 2000

Fritsch, Martin (2004): Instrumente zur Planung und Durchführung moderner Meliorationen. Wegleitung zur Anwendung der Nutzwertanalyse zur Bestimmung und Bewertung des öffentlichen und privaten Nutzens moderner Meliorationen, Bundesamt für Landwirtschaft (CH), Bern 2004, online: <https://www.suissemelio.ch>, abgerufen 17.07.2019

Hüsselmann, Claus (2003): Fuzzy-Geschäftsprozessmanagement (Unscharfe Informationen in der Unternehmensmodellierung), Köln, 2003

Kamiske, Gerd F. (2015): Handbuch QM-Methoden: Die richtige Methode auswählen und erfolgreich umsetzen, 3., aktualisierte und erw. Aufl., München, 2015

Kühnapfel, Jörg B. (2017): Vertriebscontrolling: Methoden im praktischen Einsatz, 2. Aufl., Wiesbaden, 2017

Laschet, Wilhelm/Witte, Hermann/Voigt, Fritz (1978): Kritische Auseinandersetzung mit den Methoden und Modellen zur Bewertung von Verkehrsinvestitionen, Wiesbaden, 1978

Lock, Dennis/Wagner, Reinhard (Hrsg.) (2019): The Handbook of Project Portfolio Management, London New York, 2019

Peters, Malte L./Zelewski, Stephan (2004): Möglichkeiten und Grenzen des "Analytic Hierarchy Process" (AHP) als Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsanalyse, in: Zeitschrift für Planung & Unternehmenssteuerung, Volume 15, 2004, S. 295–324

Seidl, Jörg (2011): Multiprojektmanagement: Übergreifende Steuerung von Mehrprojektsituationen durch Projektportfolio- und Programmmanagement, Berlin, Heidelberg, 2011

Siebertz, Karl/van Bebber, David/Hochkirchen, Thomas (2017): Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE), 2. Aufl. 2017, Berlin, Heidelberg, 2017

---

Sztuka, Achim (o.J.): Sensitivitätsanalyse: Schwankungen der Einflussfaktoren miteinbeziehen, o.J., online: <https://www.manager-wiki.com/strategiebewertung/47-sensitivitaetsanalyse>, abgerufen 28.05.2019

Villmow, Hans-Dieter/Bürmann, Richard/Hüsselman, Claus (2008): Schnellere Personalprozesse, Personalwirtschaft Sonderheft 06/2008, Köln, 2008

## Parameterverzeichnis

Parameter	Erläuterung
$A_j$	Alternative mit dem Laufindex $j$
$A_{\max}$	Alternative $A_j$ mit dem höchsten Score
$a$	Granularität der Bewertungen
$D^1, D^2$	Ausgangsdifferenz zwischen den Scores $s_{j1}$ bzw. $s_{j2}$
$d_i$	Dominanzgrad eines Kriteriums
$d_i^r$	Relativer Dominanzgrad eines Kriteriums
$K_i$	Kriterium mit dem Laufindex $i$
$K_d$	dominantes Kriterium
$M$	Anzahl der Alternativen
$N$	Anzahl der Kriterien
$n$	Anzahl semantischer Abstufungen für Bewertung $x_{ij}$
$S$	Scorecard
$\vec{s}$	Zeilenvektor, bestehend aus allen Scores der $m$ Alternativen
$s_{ij}$	Partialnutzen der Alternative $A_j$ zum Kriterium $K_i$
$s_j$	Score der Alternative $A_j$
$W$	Summe aller Kriteriengewichtungen $w_i$
$\vec{w}$	Zeilenvektor, bestehend aus allen Gewichten der $N$ Kriterien
$w_d$	dominante Gewichtung
$w_i$	Kriteriengewichtung mit dem Laufindex $i$
$X$	Bewertungsmatrix aller $N$ Kriterien der $M$ Alternativen
$\vec{x}$	Bewertungsvektor
$x_d$	dominante Bewertung
$x_{ij}$	Bewertung von Alternative $A_j$ hinsichtlich des Kriteriums $K_i$
$Z$	Kardinalskala für Bewertungen $x_{ij}$

Mathematische Grundlagen

Gradient einer Funktion

Der Vektor, bestehend aus den N partiellen Ableitungen einer Funktion

Definition 6

$$s = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$$

$$\vec{\nabla}f = \left( \frac{df}{dx_1}, \frac{df}{dx_2}, \dots, \frac{df}{dx_N} \right)^T,$$

heißt **Gradient** von f.

Der Gradient zeigt in die Richtung der größten Änderung der Funktion, also des steilsten Anstiegs. Der Betrag des Gradienten gibt den Wert der größten Änderungsrate an diesem Punkt an.

Skalarprodukt zweier Vektoren

Gegeben seien die Vektoren  $\vec{a}, \vec{b} \in \mathbb{R}^N$  mit

Definition 7

$$\vec{a} = (a_1, a_2, \dots, a_N)^T \text{ und } \vec{b} = (b_1, b_2, \dots, b_N)^T.$$

Dann heißt

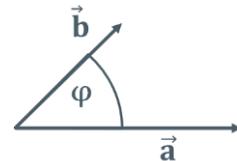
$$\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle = a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2 + \dots + a_N \cdot b_N$$

das (Standard-)Skalarprodukt der beiden Vektoren  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$ .

Für das Skalarprodukt zweier Vektoren  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$  gilt:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos(\varphi),$$

wobei  $\varphi$  der eingeschlossene Winkel ist.



Mit diesen zwei Begriffen kann allgemein das totale Differential eingeführt werden.

Totales Differential einer Funktion

Unter dem **totalen Differential** einer Funktion  $f(x_1, x_2, \dots, x_N)$  mit N Variablen versteht man den Ausdruck

Definition 8

$$ds = \langle \vec{\nabla}f, d\vec{x} \rangle$$

$$= \left\langle \begin{pmatrix} \frac{df}{dx_1} \\ \vdots \\ \frac{df}{dx_N} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} dx_1 \\ \vdots \\ dx_N \end{pmatrix} \right\rangle$$

$$= \frac{df}{dx_1} \cdot dx_1 + \frac{df}{dx_2} \cdot dx_2 + \dots + \frac{df}{dx_N} \cdot dx_N.$$

Das Totale Differential enthält also die gesamte Information über die Ableitung, während die partiellen Ableitungen nur Information über die Ableitung in Richtung der Koordinatenachsen enthalten. Es findet häufig in der Physik und den Naturwissenschaften Anwendung und beschreibt näherungsweise, wie sich ein Ergebnis  $s$  (Funktionswert) ändert, wenn die Eingangsgrößen  $x_1, \dots, x_N$  fehlerbelastet sind, das heißt wenn die einzelnen Eingangsgrößen  $x_i, i = 1, \dots, N$ , in einem bestimmten Bereich schwanken (Toleranzbereich). Somit wird folgender Zusammenhang erhalten:

Mit

$dx_i \approx \Delta x_i, i = 1, \dots, N$  und  $ds \approx \Delta s$  ergibt sich näherungsweise

$$ds \approx \frac{df}{dx_1} \cdot \Delta x_1 + \frac{df}{dx_2} \cdot \Delta x_2 + \dots + \frac{df}{dx_N} \cdot \Delta x_N.$$

Damit sich die einzelnen Summanden (Einzelfehler)  $\frac{df}{dx_i} \cdot \Delta x_i$  nicht gegebenenfalls aufheben, wird der sog. absolute Fehler betrachtet, bei dem garantiert wird, dass jeder einzelne Summand positiv sein muss.

#### Absoluter Fehler

Unter dem **absoluten Fehler**  $|\Delta s|$  versteht man die Summe

*Definition 9*

$$|\Delta s| = \left| \frac{df}{dx_1} \right| \cdot |\Delta x_1| + \left| \frac{df}{dx_2} \right| \cdot |\Delta x_2| + \dots + \left| \frac{df}{dx_N} \right| \cdot |\Delta x_N|.$$

$|\Delta s|$  gibt also den sog. „Worst case“ an, bei dem sich alle Fehler aufaddieren und damit den größten Gesamtfehler verursachen.

#### Relativer Fehler

Analog definiert man den **relativen Fehler** als Verhältnis (Quotient) des absoluten Fehlers und dem tatsächlichen Funktionswert  $s$ , d.h.

*Definition 10*

$$\left| \frac{\Delta s}{s} \right|.$$

Es gibt den prozentualen Anteil des Fehlers vom Ergebnis an.

#### Transformationsfunktionen

##### *Definition*

Bei der NWA erfolgt die Bewertung von Alternativen vielfach auf einer subjektiven (Wertdimension) und einer sachlich objektiven Ebene (Sachdimension). Für eine objektive Bewertung wird mittels Indikatoren, welche für jedes Kriterium zu definieren sind, die Erfüllung gemessen.

Um von den Messwerten der Sachdimensionen (technische Messwerte, ermittelte Kosten u.ä.) zu dimensionslosen Werten der (ordinalen) Bewertungsskala zu gelangen, sind mathe-

mathematische Transformationen notwendig. Die durch die Indikatoren ([€] etc.) bestimmten Ziel-erträge werden mittels Transformationsfunktionen in dimensionslose Größen (Zielwerte) auf der Bewertungsskala umgewandelt.<sup>37</sup>

### Gestaltung

Bei der Gestaltung der Transformationsfunktionen sind verschiedene Steigungsformen möglich beziehungsweise üblich: linear, progressiv und degressiv (siehe Abbildung 21).<sup>38</sup>

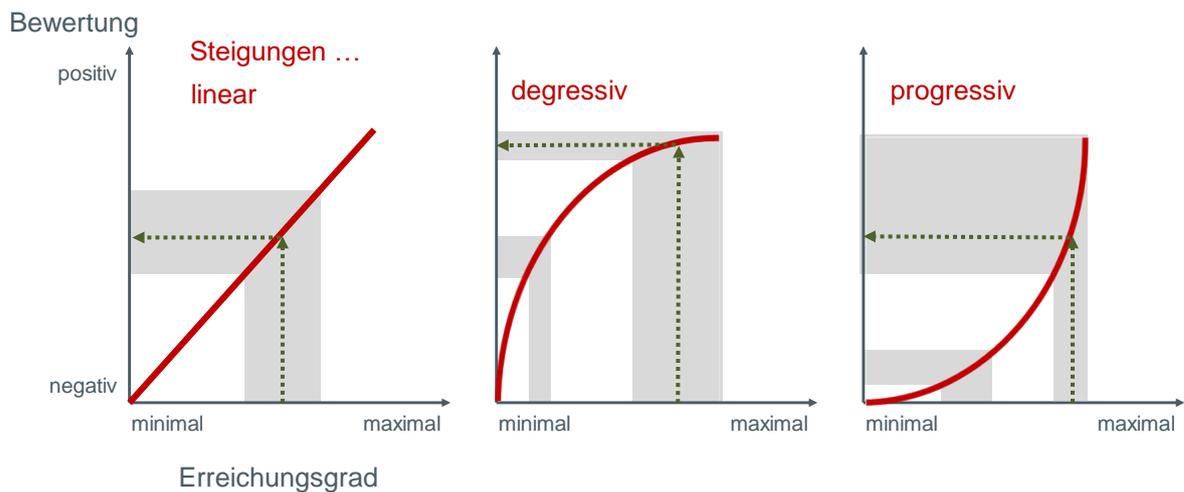


Abbildung 21: Verschiedenen Transformationstypen<sup>39</sup>

Die Wahl der Transformation erfolgt individuell für jedes Kriterium beziehungsweise die dazugehörigen Indikatoren. Der Zielwertbereich ist ein Unsicherheitsbereich innerhalb dessen eine abgeleitete Bewertung schwanken kann. Dieser "Unschärfe-Bereich" ergibt sich einerseits aus dem Zeitpunkt der NWA – die Bestimmung der Ausprägung der Indikatoren erfolgt im Sinne einer Voraussage zum Zeitpunkt der Planung. Andererseits handelt es sich nicht immer um exakte Daten, wie z.B. beim Indikator „Ausmaß einer Verbesserung in %“.

Abbildung 21 zeigt exemplarisch die Transformation der Erfüllungsgrade von Indikatoren auf die Bewertung der Kriterien am Beispiel des verschiedenen Transformationstypen.

<sup>37</sup> vgl. Fritsch, 2004, S. 3.11.

<sup>38</sup> vgl. ebd., S. 4.7 ff.

<sup>39</sup> in Anlehnung an ebd., S. 4.8-4.12.

## Über die Autoren

---

Prof. Dr. rer. oec. **Claus Hüsselmann** wirkte nach Studium der Technomathematik zunächst als leitender Entwickler in einem SAP-Systemhaus. Bei Scheer verantwortete er anschließend 20 Jahre lang mehrere (Groß-) Projekte, den weltweiten Project Operations-Bereich sowie als Partner das Beratungsgeschäft Project Performance Management. 2012 – 2015 war er als Vorstand der GPM engagiert. Seine Schwerpunkte umfassen u.a. Lean Project Management sowie Multi-Projektmanagement (Ko-Leitung der GPM-Fachgruppe). Aktuell verantwortet er das Fachgebiet Projekt- und Prozessmanagement im Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen der THM.



Prof. Dr. rer. nat. **Rolf Litzenberger** war nach dem Studium der Technomathematik im Fachbereich Mathematik der TU Kaiserslautern tätig. Seine Dissertation behandelte eine genaue Berechnung des Gravitationsfelds der Erde mit Hilfe harmonischer Wavelets. Nach seiner Promotion wechselte er als Controller und Regulierungsmanager in ein mittelständisches Energieversorgungsunternehmen. Im Jahre 2010 wurde er zum Professor an die Duale Hochschule Baden-Württemberg DHBW in Mannheim berufen. Dort hat er den neuen Studiengang Energiewirtschaft aufgebaut und fungiert als Studiengangsleiter.

**Nikolas Schick** erlangte 2018 den Bachelorabschluss im Fach Wirtschaftsingenieurwesen an der Technischen Hochschule Mittelhessen. Aktuell arbeitet er als Masterand in einem Pharmakonzern in der Abteilung Strategic Initiatives, deren Schwerpunkte im Multiprojektmanagement und der Durchführung von strategischen Großprojekten liegen.

**Lukas Maximilian Spannenberger**, B.Sc. und Student des Masterstudiengangs Wirtschaftsingenieurwesen mit der Fachrichtung Produkt- und Prozessmanagement an der Technischen Hochschule Mittelhessen. Durch Praktika und Werkstudententätigkeiten konnte er bereits einige Erfahrungen im Projektmanagement sammeln.

In den vorliegenden Arbeitsbericht sind Anregungen aus einer Studienarbeit im Masterstudiengang Wirtschaftsingenieurwesen, die im Wintersemester 2018/2019 am Fachbereich WI der THM, Labor für Prozess- und Projektmanagement, entstanden ist, eingeflossen. Ein Dank geht an die Mitautoren der ursprünglichen Arbeit.

## Zu den WI-[Reports]

Die WI-[Reports] entstehen aus Forschungs-, Abschluss-, Studien- und Projektarbeiten im Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen der THM am Campus Friedberg.

Als Zielgruppen der WI-[Reports] werden Forschende, Lehrende und Lernende sowie Praktiker der Disziplin Wirtschaftsingenieurwesen gesehen.

Die Arbeitspapiere befassen sich tiefergehend mit ausgewählten, speziellen WI-Themenbereichen. Ziel ist die verständliche Vermittlung theoretischer Grundlagen und deren Transfer in praxisorientiertes Wissen.

Bitte wenden Sie sich mit Anregungen und Kritik zu den WI-[Reports] an den Herausgeberbeirat. Dies gilt insbesondere, wenn Sie selbst ein Arbeitspapier in der Reihe veröffentlichen wollen (Kontaktdata auf Seite ii).

Informationen über die bisher erschienenen WI-[Reports] erhalten Sie unter der Adresse online [http://digdok.bib.thm.de/schriftenreihen\\_ebene2.php?sr\\_id=3&la=de](http://digdok.bib.thm.de/schriftenreihen_ebene2.php?sr_id=3&la=de).

