



SOLIT Safety of Life in Tunnels

**Leitfaden zur ganzheitlichen Bewertung
von Tunneln mit Brandbekämpfungs-
anlagen sowie deren Planung**

**Wissenschaftlicher Abschlussbericht
zum SOLIT² Forschungsvorhaben, erstellt
durch das SOLIT² Forschungskonsortium**

**Anhang 6:
Lebenszykluskosten technischer Ausrüs-
tung und ganzheitliche Bewertung**

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

© SOLIT² Konsortium 2012

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 19S9008 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Dieses Dokument wurde nach bestem Wissen und mit großer Sorgfalt erstellt. Das Dokument sowie seine Anhänge sind nur für den Gebrauch durch erfahrene Brandschutzexperten bestimmt. Eine Beurteilung über die Anwendbarkeit dieses Dokuments auf seinen spezifischen Anwendungsfall muss durch den Leser erfolgen.

Alle Rechte in Bezug auf den Inhalt, insbesondere das Urheberrecht betreffend, sind vorbehalten.

Einordnung

Im Rahmen des Verbund-Forschungsprojektes SOLIT² - Safety of Life in Tunnels, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 19S9008 aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages haben die Mitglieder des Forschungskonsortiums wissenschaftliche Einzelberichte zu den jeweils von ihnen bearbeiteten Teilprojekten und Arbeitspaketen erstellt. Wesentliche Ergebnisse der Einzelberichte wurden in dem vorliegenden Leitfaden zusammengefasst. Der Leitfaden wurde gemeinsam von den Konsortialmitgliedern erstellt und ist der gemeinsame wissenschaftliche Abschlussbericht des SOLIT²-Konsortiums. Daneben ist der Leitfaden ein Teil der Arbeitspakete. Die Einzelberichte sind über den Projektkoordinator erhältlich.

Impressum:

Leitfaden zur ganzheitlichen Bewertung von Tunneln mit Brandbekämpfungsanlagen sowie deren Planung Anhang 3: Planungsleitfaden für Brandbekämpfungsanlagen in Tunneln

Dieses Dokument ist ein Anhang zur Richtlinie „Leitfaden zur ganzheitlichen Bewertung von Tunneln mit Brandbekämpfungsanlagen sowie deren Planung“. Folgende weitere Anhänge sind verfügbar:

Anhang 1: Stand der Technik

Anhang 2: Ausgewählte Ergebnisse von Brandversuche

Anhang 4: Beispielhafte Anwendung der Risikoanalyse

Anhang 5: Sicherheitsevaluierung technischer Ausrüstung

Anhang 6: Lebenszykluskosten technischer Ausrüstung und ganzheitliche Bewertung

Anhang 7: Brandversuche und Brandszenarien zur Evaluierung von BBA in Tunneln

Folgende Personen haben bei der Erstellung des Dokuments mitgewirkt:

BUNG AG, Beratende Ingenieure

Wolfgang Baltzer

Uwe Zimmermann

FOGTEC Brandschutz GmbH & Co. KG

Tobias Hoffmann

Max Lakkonen

Dirk Sprakel

Sascha Wendland

Ruhr Universität Bochum

Markus Thewes

Götz Vollmann

Peter Vogt

Sissis Kamariankis

STUVA Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V.

Frank Leismann

Roland Leucker

Antonio Piazzola

TÜV Süd Rail GmbH

Jürgen Heyn

Jakob Zaranek

Lutz Neumann

IFAB Institut für angewandte Brandschutzforschung GmbH

Stefan Kratzmeir

Rajko Rothe

Institut der Feuerwehr Sachsen Anhalt

Mario Koch

Horst Starke

Die Mitglieder des Forschungskonsortiums danken dem wissenschaftlichen Beirat für wertvolle Hinweise und Anregungen im Vorfeld der Durchführung der Brandversuche: Felix Amberg (ITA-COSUF), Frank Heimbecher, Jürgen Krieger (Bundesanstalt für Straßenwesen), Ingrid Ortlepp (Innenministerium Thüringen), Werner Thon (Feuerwehr Hamburg), Bernhard Koonen (Projekträger Mobilität und Verkehr des BMWI), Robert Sauter (ADAC e.V.).

Herausgeber:

SOLIT² Forschungskonsortium, bestehend aus:

BUNG AG – Beratende Ingenieure

FOGTEC Brandschutz GmbH & Co. KG

Ruhr Universität Bochum – Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb

STUVA Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V.

TÜV Süd Rail GmbH

Druck und Verlag:

Die Dokumente erscheinen im Eigenverlag und sind über contact@SOLIT.info erhältlich.

Köln

Version: 2.0; Bearbeitungsstand: November 2012

Der Leitfaden wird durch das Forschungskonsortium weiter überarbeitet. Neue Bearbeitungsstände können über das Forschungskonsortium unter contact@SOLIT.info angefragt werden.

Projektkoordinator: FOGTEC Brandschutz GmbH & Co. KG, Schanzenstraße 19, 51063 Köln

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	5
1.1	Allgemeine Erläuterungen.....	5
1.2	Vorgehensweise	5
2.	Vergleichende LZK-Berechnungen für den Modelltunnel	5
2.1	Aufbau des LZK-Berechnungsmodells.....	5
2.2	Die Entwicklung der nominalen Zeit-/Kostenmatrix	12
2.3	Vergleichende LZK-Analyse für den Modelltunnel mit Basisausstattung vs. kompensierte Lösung	15
3.	Einsatz von multikriteriellen Bewertungsverfahren zur	18
3.1	Grundlagen zur multikriteriellen Bewertung	18
3.1.1	Nutzwertanalytische Methoden	19
3.1.2	Der Analytische Hierarchie Prozess	19
3.2	Der Analytische Hierarchie Prozess (AHP) im Projekt SOLIT ²	20
3.2.1	Allgemeines	20
3.2.2	Die Axiome der AHP-Methodik	20
3.2.3	Planungsphase	21
3.2.4	Bewertungsphase	22
3.2.5	Ergebnisphase	25
3.3	Umsetzung in SOLIT ²	26
3.3.1	Struktureller Ansatz der Bewertungssituation.....	26
3.3.2	Umsetzung der Bewertung für den Bereich Nutzersicherheit (User safety).....	27
3.3.3	Umsetzung der Gesamtstruktur	28
3.3.4	Beispielrechnung	29
3.3.5	Ergebnisdiskussion und Bewertung	30
4.	Literatur	32

1. Einleitung

1.1 Allgemeine Erläuterungen

Dieser Anhang ist Bestandteil des Planungsleitfadens zum Forschungsprojekt SOLIT² „Leitfaden zur ganzheitlichen Bewertung von Tunneln mit Brandbekämpfungsanlagen“. Ziel dieses Anhangs ist zum Einen die vollständige Darstellung der korrekten Vorgehensweise zur Ermittlung der Lebenszykluskosten (LZK) von Tunnelbauwerken und die Durchführung einer solchen Analyse am SOLIT²-Modelltunnel. Das entwickelte Modell ist dabei nicht auf den Vergleich verschiedener Ausstattungsvarianten sich im Prinzip ähnlicher Tunnel beschränkt, sondern wurde zur ganzheitlichen Erfassung und Ermittlung von LZK für unterirdische Infrastruktur entwickelt. Dies inkludiert auch die vergleichende LZK-Bewertung von verschiedenen Bauwerkstypen über ihren Lebenszyklus hinweg, inklusive bautechnischer Lösungen und Besonderheiten.

Zum Anderen soll mit diesem Anhang das im Zuge der Projektbearbeitung für die Sicherheitsbewertung von unterirdischer Infrastruktur weiterentwickelte ganzheitliche Bewertungsmodell (DEMUS) in Grundzügen skizziert und vorgeführt werden, welches neben den Ergebnissen der LZK-Analysen auch die Untersuchungen zur Nutzersicherheit inkludiert und Möglichkeiten für die Integration und vergleichende Bewertung weiterer bauwerksspezifischer Untersuchungsparameter liefert.

Die maßgeblichen Arbeiten zur Modellbildung wurden für beide Themenbereiche im Zuge der Projektdurchführung am Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum umgesetzt und im Rahmen verschiedener wissenschaftlicher Arbeiten integriert. Zentral zu nennen sind hierbei die Dissertationen von Herrn Dr.-Ing. Peter Vogt (bereits veröffentlicht) und die sich in Vorbereitung befindende Dissertation von Herrn Dipl.-Ing. Sissis Kamarianakis. In diesem Zusammenhang verweisen wir auch auf die angefügte Literaturliste.

1.2 Vorgehensweise

Im Zuge des SOLIT²-Projektes wurden für beide Bewertungsmodelle Software gestützte Umsetzungen entwickelt, die sich naturgemäß in einem solchen Leitfaden und seinem Anhang nur schwer darstellen lassen. Gleichwohl werden im Folgenden die für beide Modelle notwendigen Grundlagen definiert, mit deren Hilfe die Modellbildung

erfolgt ist. Theoretisch kann der Leser mit Hilfe dieser Grundlagen und unter Zuhilfenahme der zugehörigen Basisliteratur ein eigenes Modell entwickeln und zu identischen Ergebnissen kommen. Der Anhang baut dabei auf dem Inhalt des Leitfadens auf und ergänzt ihn logisch.

Hernach werden die in anderen Teilabschnitten des SOLIT²-Projektes gewonnenen Erkenntnisse im Rahmen der ganzheitlichen Bewertung zusammengeführt und eine solche Bewertung für eine Basislösung und eine kompensierte Variante am Modelltunnel durchgeführt, sowie das Ergebnis final diskutiert.

2. Vergleichende LZK-Berechnungen für den Modelltunnel

2.1 Aufbau des LZK-Berechnungsmodells

Zu Beginn ist zunächst der Zeithorizont festzulegen, über den die Lebenszykluskosten für ein Tunnelbauwerk analysiert werden sollen. Es ist davon auszugehen, dass der Betrachtungszeitraum für alle zu untersuchenden Bauwerks- bzw. Ausstattungsvarianten identisch lang ist und maßgeblich durch die Widerstandsfähigkeit der Rohbaustruktur geprägt wird. Aus bautechnologischer Sicht sind Nutzungsdauern von 130 Jahren bei einer geschlossenen und 90 Jahren bei einer offenen Tunnelbauweise zu wählen. Im Gegensatz dazu wird ein Konzessionsnehmer, der im Rahmen eines ÖPP-Vorhabens eine vertragliche Vereinbarung zur Planung, zum Bau und zum Betrieb eines Straßentunnels mit der Öffentlichen Hand eingeht, den Analysezeitraum exakt an die Vertragslaufzeit anpassen.

Anschließend erfolgt die Konfiguration des Tunnelbauwerks, d.h. alle Rohbau- und Betriebsausstattungskomponenten, die den regelwerkskonformen und sicheren Betrieb des Tunnels garantieren, müssen festgelegt und in sogenannte Modultabellen übernommen werden. Jede Modultabelle umfasst einen abgegrenzten Leistungsumfang, der keine funktionalen Überschneidungen mit anderen Modultabellen aufweisen darf. Inhaltlich kann es sich dabei um ein Rohbauelement, ein technisches Bauteil, Projekterlöse oder auch um eine Planungsleistung handeln. Die Anzahl der Modultabellen ist nicht beschränkt und vornehmlich von der Konfiguration des betrachteten Tunnelbauwerks abhängig. Mit der Aufstellung alternativer Lösungskonzepte, beispielsweise verschiedener Ausstattungsconfigurationen oder gänzlich unterschiedlicher Bauweisen, kann es durchaus dazu kommen, dass die Anzahl

der erforderlichen Modultabellen zwischen den einzelnen Varianten variiert. Dabei ist lediglich sicherzustellen, dass jede zu untersuchende Bauwerksvariante eine vollwertige Alternativlösung repräsentiert. Als vollwertig wird jede Variante bezeichnet, die alle an das Tunnelbauwerk gestellten Funktionen vollumfänglich erfüllt. Wird dieser Forderung nicht nachgekommen, so schließen sich

Bauwerksvarianten gegenseitig aus und die Voraussetzungen, einen Variantenvergleich auf Basis der Lebenszykluskosten durchzuführen, sind nicht gegeben. Aus der erörterten Problematik erwächst die Forderung, dass die Konfiguration jeder einzelnen Bauwerksvariante vom Planungsingenieur ein hohes Maß an Sorgfalt erfordert.

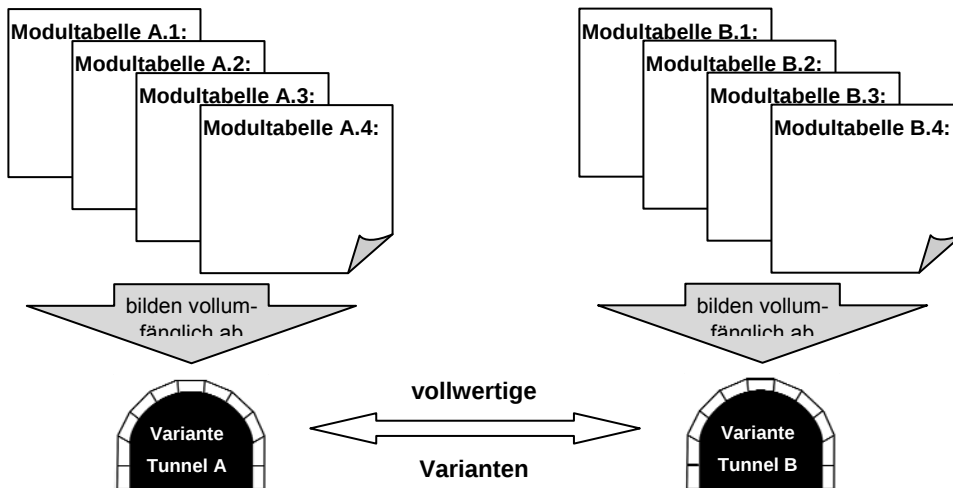


Abbildung 2-1: Aufbau der Modultabellen

In die Modultabellen müssen sämtliche Daten einfließen, die für die Errechnung der gesamten Lebenszykluskosten eines Tunnelbauwerks erforderlich sind. Zum Umfang dieser Daten gehören theoretische Nutzungsdauern aller benötigten Bauteile und Komponenten sowie die damit im Zusammenhang stehenden Kosten. Voraussetzung für die Ermittlung der Kosten ist, dass ein eindeutiger Referenzzeitpunkt festgelegt wurde. Gewöhnlich fällt der Referenzzeitpunkt mit der Inbetriebnahme des Bauwerks zusammen oder er markiert einen Wendepunkt für den Betrieb eines Bestandsbauwerks, beispielsweise im Zuge einer Umrüstung, Instandsetzung oder technischen Aufwertung. Dieser Wendepunkt stellt für ein bestehendes Tunnelbauwerk den Zeitpunkt dar, ab dem die Bewirtschaftung nach dem Lebenszykluskostenkonzept erfolgt. Die Einflüsse, unter denen die Modultabellen aufzustellen sind, gehen zusammenfassend aus nachfolgender Abbildung hervor.

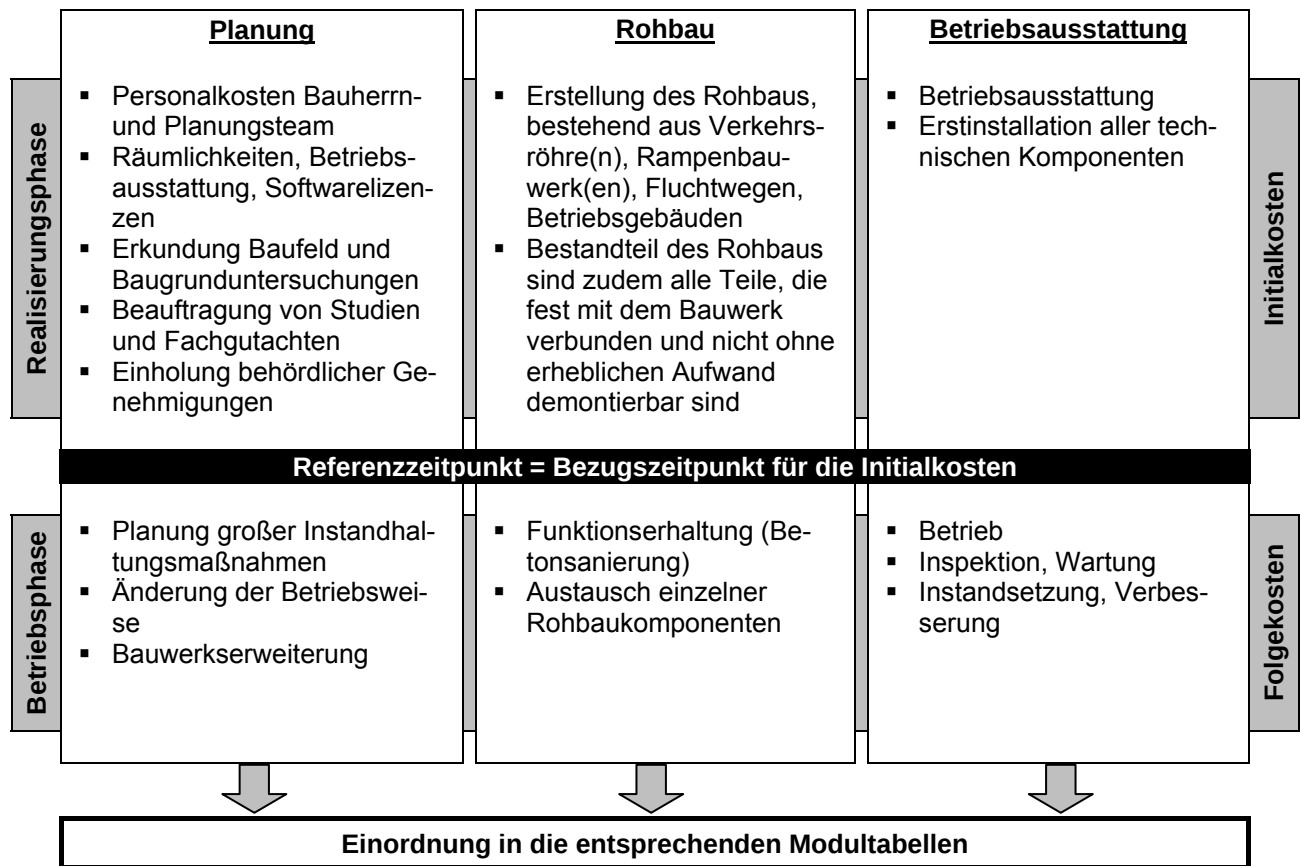


Abbildung 2-2: Durch die Modultabellen abzudeckender Umfang

Die verschiedenen Parameter, die in eine Modultabelle eingehen, sollen im Folgenden für eine beliebige Komponente j schrittweise erörtert werden. Neben Erläuterungen werden auch ggf. erforderliche Berechnungsschritte aufgezeigt, die für die Bestimmung einzelner Eingangsparameter benötigt werden.

In einer übergeordneten Modultabelle sind zunächst elementare Angaben zum Tunnelbauwerk zu verankern. Hierzu zählt der zeitliche Horizont d [a], über den die Lebenszykluskosten für einen Tunnel analysiert werden sollen. Der Beginn des Analysezeitraums entspricht dem Jahr „0“, welches durch die Angabe einer konkreten Jahreszahl präzisiert wird. Im Weiteren sind die kostenverursachenden Elemente zusammenzustellen. Bei diesen Elementen handelt es sich beispielsweise um eindeutig abzugrenzende Rohbauabschnitte, Bauteile, technische Komponenten oder sonstige Einheiten, die mit monetär erfassbaren Leistungen in Verbindung stehen. Als Synonym für ein derartiges Element wird im Folgenden der Begriff „Komponente“ verwendet. Die Anzahl der unterschiedlichen Komponenten, die die vollumfängliche Konfiguration des Tunnelbauwerks wiedergeben, werden durch die Variable n [-] ausgedrückt. Die Anzahl n entspricht genau der erforderlichen Anzahl an Modultabellen. In jeder Modultabelle ist ferner anzugeben, in welcher Anzahl a_j [-] baugleich errichtete Komponenten zur Anwendung kommen und welcher Wert für die theoretische Nutzungsdauer s_j [a] einer spezifischen Komponente j zugrunde zu legen ist. Aus der theoretischen Nutzungsdauer s_j sowie der Dauer des Analysezeitraums d lässt sich die Anzahl der erforderlichen Austauschvorgänge q_j [-] ermitteln. In Abbildung 2-3: Grafische Darstellung der Variablen j , d , a_j , s_j und q_j

Abbildung sind die zuvor aufgeführten, komponentenspezifischen Angaben zum besseren Verständ-

nis in eine Grafik integriert und in den Kontext der Lebenszykluskostenanalyse eingeordnet.

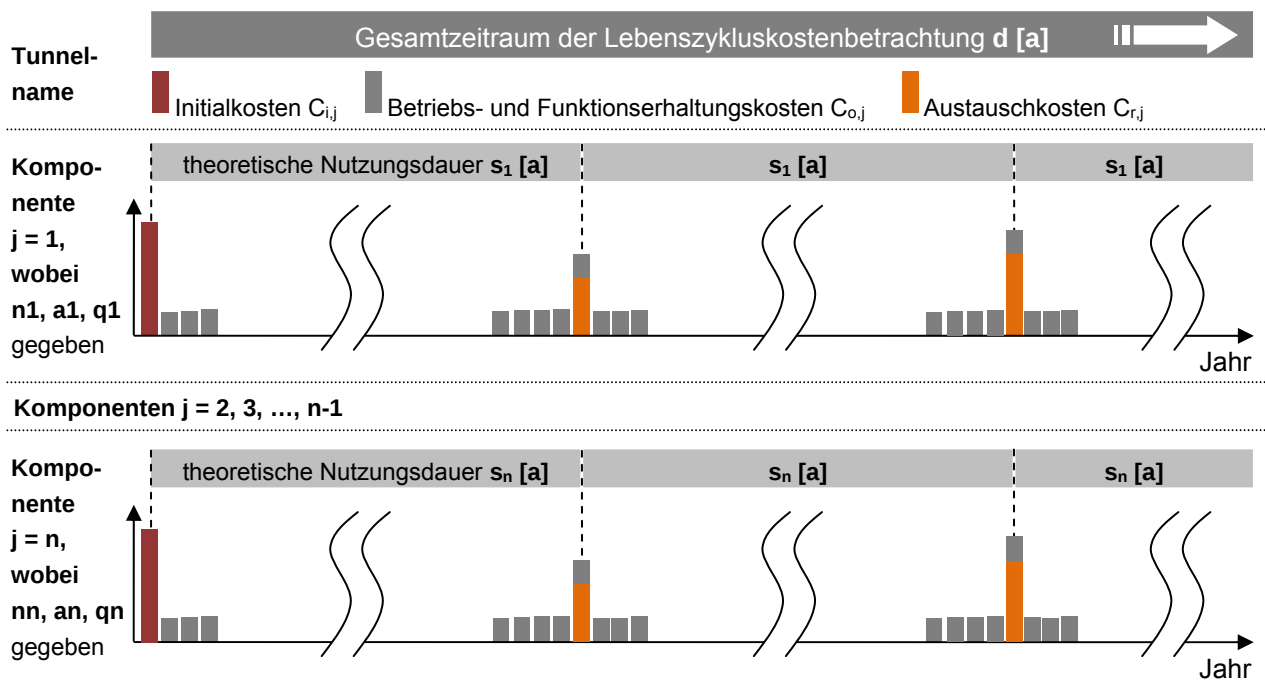


Abbildung 2-3: Grafische Darstellung der Variablen j , d , a_j , s_j und q_j

Die mit Beginn der Komponentennutzungsdauer aufgetragenen Initialkosten $C_{i,j}$ umfassen die Ausgaben, die für die betriebsbereite Herstellung oder Beschaffung der Komponenten j zum gewählten Referenzzeitpunkt aufzuwenden sind. Je nach Stand der Planungsphase ist es erforderlich, die Initialkosten mit einem Faktor $w_j [-]$ zu beaufschlagen. Der Faktor w_j drückt die Unsicherheit bzw. Schwankungsbreite aus, die der Bestimmung der Initialkosten für die Komponente j in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Lebenszykluskostenbetrachtung innewohnt. Die Bandbreite der Initialkosten wird somit durch drei charakteristische Stützstellen vorgegeben:

- Den Charakter eines Mittelwertes, mit dem mutmaßlich die größte Eintrittswahrscheinlichkeit verbunden ist, drücken die Kosten $C_{i,j}$ aus,
- Das ungünstigste Szenario ist den Initialkosten der Höhe $(1 + w_j) \cdot C_{i,j}$ zugeordnet,
- Das vermeintlich vorteilhafteste Szenario wird durch die Initialkosten $(1 - w_j) \cdot C_{i,j}$ repräsentiert.

Ein sachkundiger und versierter Kalkulator ist in die Lage, den Faktor w_j zur Berücksichtigung der Schwankungsbreite der Initialkosten einzuschätzen. Anhand eines einfachen Beispiels soll diese These verdeutlicht werden: In einer frühen Planungsphase ist die prozentuale Schwankungsbreite für die Kosten zur Herstellung der

Rohbaustruktur eines Tunnels aufgrund einer nur überschlägig erfolgten statischen Dimensionierung bezüglich der endgültigen Abrechnungssumme aller Voraussicht nach größer als die Kostenschwankungsbreite für ein technisches Bauteil, welches durch einen Spezialhersteller in Serienproduktion gefertigt wird. Aus dem Beispiel wird ersichtlich, dass der Anwendungsbereich Schwankungsbreite hauptsächlich die Planung von Rohbauleistungen betrifft, für technische Komponenten und Einbauteile aber durchaus andere Beurteilungsmaßstäbe zur Festlegung der Größe w_j heranzuziehen sind.

Mit Bezugnahme auf die zuvor erläuterten Initialkosten wenden sich die nachstehenden Überlegungen den Folgekosten zu. Im Zuge der Modellierung der Lebenszykluskosten setzen sich die Folgekosten grundsätzlich aus zwei Anteilen zusammen: Der erste Anteil umfasst die Kosten, die jährlich für den Betrieb und die Funktionserhaltung der Komponente j aufzuwenden sind, dem zweiten Anteil werden die Kosten zugerechnet, die nach Ablauf der theoretischen Nutzungsdauer infolge des Austausches der Komponente j kalkulatorisch zu erfassen sind. Die beiden Folgekostenanteile lassen sich wie folgt aus den Initialkosten $C_{i,j}$, die dem Preisstand zum Referenzzeitpunkt widerspiegeln, berechnen:

- Der erste Folgekostenanteil bezieht den Betrieb und die Funktionserhaltung der Komponente j bzgl. des Referenzzeitpunktes ein:

$$C_{o,j} = p_{o,j} * C_{i,j} \text{ bzw. } C_{o,j} = p_{o,j} * (1 \pm w_j) * C_{i,j}.$$

Der Faktor $p_{o,j}$ [-] ist ein Maß für den jährlichen Anteil an den Betriebs- und Erhaltungskosten in Bezug auf die Initialkosten für die Komponente j.

- Der zweite Folgekostenanteil beschreibt bzgl. des Referenzzeitpunktes die Austauschkosten, die wiederkehrend nach Ablauf der theoretischen Nutzungsdauer s_j [a] für die Komponente j aufzuwenden sind:

$$C_{r,j} = e_{k,j} * C_{i,j} \text{ bzw. } C_{r,j} = e_{k,j} * (1 \pm w_j) * C_{i,j}.$$

Der Faktor $e_{k,j}$ [-] repräsentiert den Austauschgrad, der optional individuell für jeden erforderlichen Komponentenaustausch vorgegeben oder pauschal auf $e_{k,j} = 1,0$ festzusetzen ist. Ein Wert für den Austauschgrad $e_{k,j} \neq 1,0$ drückt aus, dass der Umfang des Austauschs nicht mit dem der Erstinstallation übereinstimmt; dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn vorhandene Hilfsbauteile wie Strom- oder Datenkabel ihre theoretische Nutzungsdauer noch nicht erreicht haben und weiter genutzt werden können. Auch größere Sanierungsarbeiten an der Rohbaustruktur lassen sich mit Hilfe der Austauschkosten abbilden. Hierfür sind entsprechende Faktoren $e_{k,j}$ zu wählen.

Der erste Folgekostenanteil für den Betrieb und die Funktionserhaltung einer Komponente lässt sich entweder pauschal durch den Faktor $p_{o,j}$ beschreiben oder optional weiter in die Anteile für Energie $p_{e,j}$ [-] und Instandhaltung $p_{m,j}$ [-] untergliedern. Insbesondere dann, wenn der Betrieb einer Komponente mit einer hohen Leistungsaufnahme und demzufolge mit einem hohen Stromverbrauch einhergeht, sollten die Energiekosten – da sie in der Regel eine andere Preisentwicklung aufweisen – von der Preisentwicklung der Instandhaltungskosten abgekoppelt werden. Für diesen Fall muss die Summe der Einzelfaktoren für Energie $p_{e,j}$ und Instandhaltung $p_{m,j}$ den Wert des Faktors $p_{o,j}$ annehmen. Es gilt also: $p_{e,j} + p_{m,j} = p_{o,j}$.

Eine darüber hinaus gehende Faktorisierung kann für die Untergliederung von Instandhaltungsaufwendungen vorgenommen werden: Diese Option sollte dann zur Anwendung kommen, wenn die Zunahme von Instandhaltungskosten im Zeitraum zwischen der Inbetriebnahme und der Außerbetriebnahme einer Komponente gesondert hervorgehoben werden soll. Dabei spiegelt der Faktor $p_{m,j}$ den anfänglichen Instandhaltungsaufwand, die Faktorensomme $p_{m,j} + g_{m,j}$ den Instandhaltungsaufwand unmittelbar vor dem theoretischen Austauschzeitpunkt der Komponente wider. Dieser Überlegung liegt die Annahme zugrunde, dass im Zeitraum zwischen der Inbetriebnahme und dem Austausch einer Komponente der Instandhaltungsaufwand durch vermehrte Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen mutmaßlich linear zunimmt. Der Faktor zur Abbildung der Instandhaltungsaufwendungen muss somit als zeitabhängige Variable ausgedrückt werden:

$$p_{m,j}(t) = p_{m,j}(t_0) + \frac{g_{m,j}}{s_j} * t, \text{ wobei } t \in [0; s_j]$$

Der Quotient aus $g_{m,j}$ und s_j stellt die Steigung der Geraden dar; die Steigung ist ein Maß für die Zunahme von Instandhaltungsaufwendungen über die theoretische Nutzungsdauer.

Das entwickelte und in den vorhergehenden Abschnitten vorgestellte LZK-Modell wurde in SOLIT² im Rahmen eines Excel-basierten Berechnungstools umgesetzt und für die verschiedenen Modelltunnel mit kompensierten Lösungen im Vergleich zur Basislösung angewendet. Für die exakte Darstellung der Modelltunnel und des Mastertunnels (Basislösung) verweisen wir an dieser Stelle auf die Ausführungen des Partners BUNG Ingenieure und die korrespondierende quantitative Risikoanalyse.

Tabelle 2-1: Zusammenfassung der zur Analyse benötigten Variablen

	Variable	Beschreibung	Herkunft Variable/Index
Eigenschaften Bauwerk/ Komponente	d [a]	Zeithorizont, über den die Lebenszykluskosten des Tunnels analysiert werden, wobei $d \in \mathbb{N}$	<u>d</u> uration
	n [-]	Gesamtanzahl unterschiedlicher, kostenverursachender Komponenten, die die Konfiguration des Tunnelbauwerks vollumfänglich wiedergeben, wobei $n \in \mathbb{N}$	<u>n</u> umber
	a_j [-]	Anzahl baugleich errichteter Komponenten j, wobei $a_j \in \mathbb{N}$	<u>a</u> mount
	s_j [a]	theoretische Nutzungsdauer der Komponente j, wobei $s_j \in \mathbb{N}$	<u>s</u> ervice life
	q_j [-]	Anzahl der insgesamt erforderlichen Austauschvorgänge inkl. der Erstinstallation für die Komponente j: $q_j = \left\lceil \frac{d}{s_j} \right\rceil$ ($\lceil \dots \rceil \rightarrow$ der Term in der Klammer ist auf die nächste natürliche Zahl aufzurunden, wobei $q_j \in \mathbb{N}$)	<u>q</u> uantity
Initialkosten	$C_{i,j}$ [GE]	Initialkosten zur betriebsbereiten Herstellung oder Beschaffung für eine Einheit der Komponente j auf Preisbasis des Referenzzeitpunktes; den Initialkosten ist die Kennziffer $k = 0$ zugeordnet (zur Bedeutung der Kennziffer k wird auf die in der letzten Tabellenzeile aufgeführten Erläuterung zur Variable $e_{k,j}$ verwiesen)	<u>i</u> nitial <u>c</u> osts
	w_j [-]	Faktor zur Berücksichtigung der Schwankungsbreite der Initialkosten für die Komponente j in Abhängigkeit vom Status der Planungsphase	<u>w</u> idth
Folgekosten	$C_{o,j}$ [GE/a]	Kosten, die jährlich für den Betrieb und die Funktionserhaltung der Komponente j aufzuwenden sind	<u>o</u> perational <u>c</u> osts
	$p_{o,j}$ [-]	Faktor zur Ermittlung des jährlichen Anteils für Betrieb und Erhaltung bzgl. der Initialkosten für die Komponente j: $C_{o,j} = p_{o,j} * C_{i,j}$	<u>p</u> ercentage <u>o</u> peration
	$p_{e,j}$ [-] $p_{m,j}$ [-]	Optionale Aufteilung des Faktors für Betrieb und Erhaltung: Faktor zur Berücksichtigung der Energiekosten Faktor zur Berücksichtigung der Instandhaltungskosten $C_{o,j} = (p_{e,j} + p_{m,j}) * C_{i,j}$, wobei $p_{e,j} + p_{m,j} = p_{o,j}$	<u>p</u> ercentage - <u>e</u> nergy - <u>m</u> aintenance
	$g_{m,j}$ [-]	Optionale Zunahme der Instandhaltungskosten durch steigendes Alter der Komponente j für $a_j \geq 2$ Jahre: Faktor zur Festlegung des Steigungsmaßes $p_{m,j}(t) = p_{m,j}(t=0) + \frac{g_{m,j}}{s_j} * t$, wobei $t \in [0; s_j]$	<u>g</u> rowth <u>m</u> aintenance
	$C_{r,j}$ [GE/a]	Kosten für den planmäßigen Austausch der Komponente j nach Ablauf der theoretischen Nutzungsdauer s_j	<u>r</u> eplacement <u>c</u> osts
	$e_{k,j}$ [-]	Austauschgrad, der entweder pauschal 1,0 beträgt oder optional für jeden Komponentenaustausch individuell in Abhängigkeit von der Kennziffer k anzugeben ist. Für die Kennziffer k gilt: $k = \{1, 2, \dots, q_j - 1\}$, wobei $k = 1$ den ersten Austausch nach der Erstinstallation bezeichnet	<u>e</u> xchange <u>k</u> ey number

Mit Ausnahme der Variablen, die als optional gekennzeichnet sind, müssen für eine Lebenszykluskostenanalyse alle übrigen Informationen zur Eingabe in die entsprechenden Modultabellen zur Verfügung stehen. Das in Abbildung 2-4 gezeigte

Flussdiagramm lässt erkennen, welche Schritte bei einer Lebenszykluskostenanalyse zu durchlaufen und wie die zuvor erläuterten Variablen miteinander verknüpft sind.

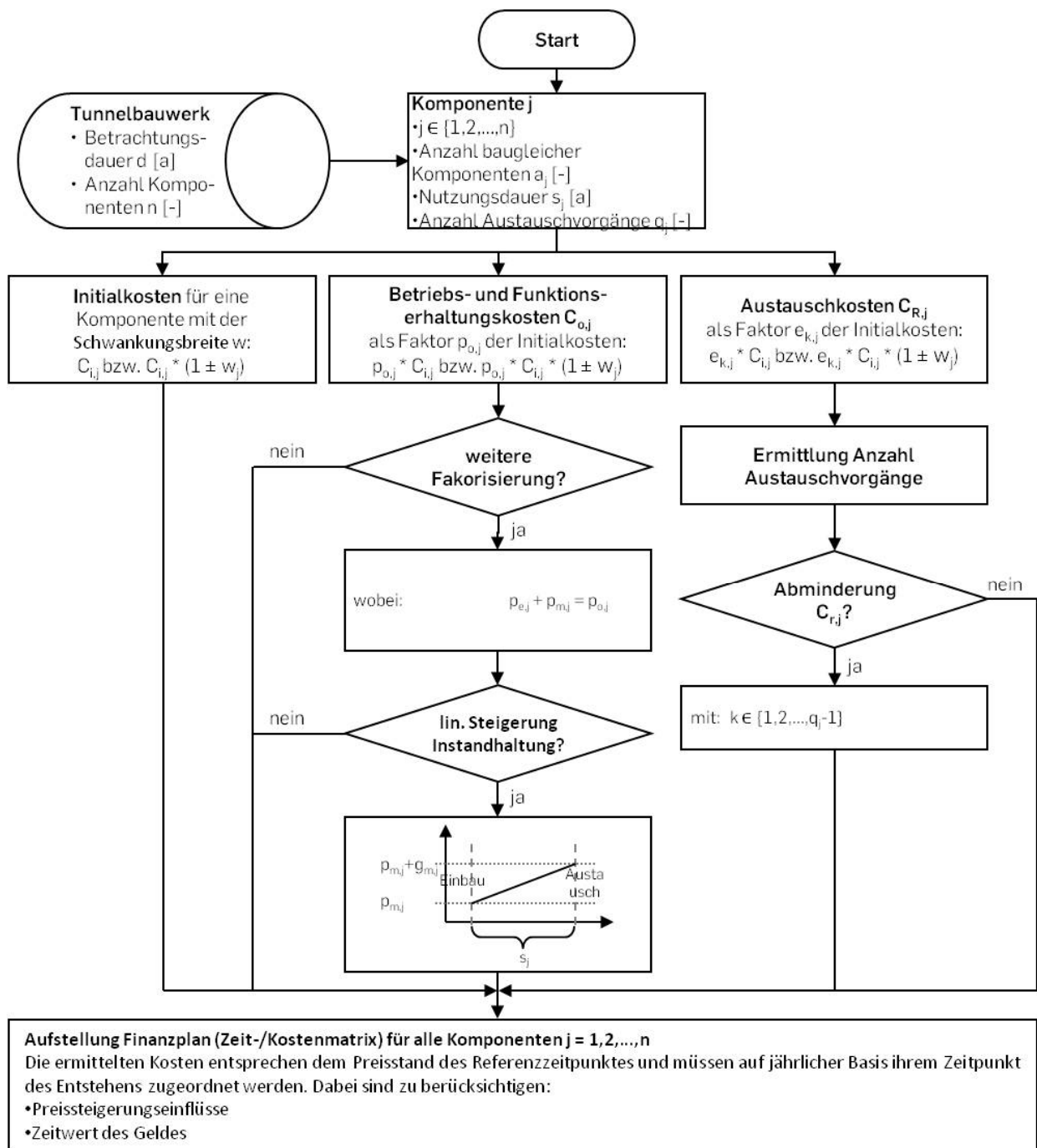


Abbildung 2-4: Die systematische Verknüpfung der Variablen

So werden sowohl die Betriebs- und Funktionserhaltungskosten $C_{o,j}$ als auch die Austauschkosten $C_{r,j}$ werden unter Zuhilfenahme entsprechender Faktoren auf die Initialkosten zurückgeführt. Mit Übertragung der Initial- auf die Folgekosten werden auch die den Initialkosten zugeordneten Schwankungsbreiten w_j fortgeschrieben. Dies bedeutet, dass mit einer sukzessiv voranschreitenden Planung nicht nur die Prognoseunsicherheit bezüglich der Initialkosten, sondern auch im Hinblick auf die Folgekosten abnimmt. Daraus lässt

sich das Resümee ableiten, dass eine Konkretisierung der Dimensionierung von Bauwerk und technischer Ausstattung synchron auch dazu führt, das mit den Initial- und Folgekosten verbundene Unsicherheitsspektrum weiter einzugrenzen.

Die Initialkosten $C_{i,j}$ und die beiden Folgekostenanteile $C_{o,j}$ und $C_{r,j}$ geben nominale Kosten wieder, die sich ausschließlich auf den gewählten Referenzzeitpunkt beziehen. Die ermittelten Kostenanteile werden unter Berücksichtigung der

Preisentwicklung sowie des Zeitwerts des Geldes ihren konkreten Entstehungszeitpunkten zugeordnet.

2.2 Die Entwicklung der nominalen Zeit-/Kostenmatrix

Für sämtliche Modultabellen, die Angaben zu Initial- und Folgekosten einzelner Komponenten enthalten, sind im Verlauf der Lebenszykluskostenanalyse zwei Arten von Zeit-/Kostenmatrizen zu errechnen. Zum einen handelt es sich dabei um die nominale Zeit-/Kostenmatrix, zum anderen um die abschließende Ergebnismatrix. Die letztgenannte Matrix beinhaltet die realen sowie die auf den Referenzzeitpunkt bezogenen bzw. abgezinsten Barwerte.

Zunächst – und dieses Vorgehen steht in Einklang mit der chronologisch zu beschreitenden Arbeitsabfolge – soll die Berechnung der nominalen Zeit-/Kostenmatrix erläutert werden. Die Grundlage zur Aufstellung dieser Zeit-/Kostenmatrix bildet das in Abbildung 2-4 dargestellte Flussdiagramm: Dabei werden die nominalen Kostenanteile für jede einzelne Komponente ihrem eigentlichen Entstehungsjahr zugeordnet. Das Jahr „Null“ entspricht dem Jahr, in dem die Lebenszykluskostenbetrachtung für das Tunnelbauwerk beginnt. Für ein Neubauprojekt entspricht das Jahr „Null“ in der Regel dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme, für ein Bestandsprojekt fällt das Jahr „Null“ mit dem Zeitpunkt der Wiedereinbetriebnahme eines Tunnels zusammen. Voraussetzung zur Anwendung der Systematik auf Bestandsbauwerke ist aber, dass zuvor ein Wechsel zugunsten der Lebenszyklusphilosophie eingeleitet wurde. Im Weiteren wird durch die Vorgabe eines konkreten Kalenderjahres das Jahr „Null“ genau definiert. Unter Ansatz der gesamten Lebenszyklusdauer d ist sodann für das Tunnelbauwerk das entsprechende Kalenderjahr zu ermitteln, mit dessen Jahresabschluss die Betrachtung vorläufig enden soll.

Wie bereits erläutert, geht die Anwendung der Kapitalwertmethode damit einher, dass zum Ende eines jeden Jahres sämtliche Zahlungen nachschüssig verzinst werden. Die Wahl von Jahresintervallen wird, wie ebenfalls an früherer Stelle diskutiert, als hinreichend genau angesehen. Aus den vorherigen Ausführungen resultiert die Konsequenz, dass dem Jahr „Null“ nur Initial- und keine Folgekosten zuzuordnen sind. Da es sich bei der theoretischen Nutzungsdauer s_j einer Komponente j um einen Wert handelt, der durch eine natürliche Zahl ausgedrückt wird, fällt der rechnerische Austauschzeitpunkt für eine Komponente folglich auch immer auf ein Jahresende. Zusammenfassend ist somit eine logische und gut einzuprägende Systematik

für die Zuordnung der Kosten in die Zeit-/Kostenmatrix geschaffen. Im Einzelnen umfasst die Erstellung der nominalen Zeit-/Kostenmatrix die folgenden Schritte:

- Dem Jahr, in dem eine Komponente erstmalig im Tunnel installiert wird, sind nur die Initialkosten zugeordnet. In den überwiegenden Fällen werden die Initialkosten im Jahr „Null“ angesetzt. Ist jedoch schon zum Betrachtungszeitpunkt absehbar, dass eine Komponente erst zu einem späteren Zeitpunkt für den sicheren Betrieb eines Tunnels notwendig wird, so sind die Initialkosten erst zum Ende des entsprechenden Jahres einzuplanen. Unabhängig davon, zu welchem Zeitpunkt die Initialkosten Berücksichtigung finden, entsprechen alle Initialkosten dem Preisstand des Referenzzeitpunktes. Somit ist sichergestellt, dass für alle Komponenten ein einheitlicher Preisstand gilt.
- Erstmalig im Folgejahr nach Ansatz der Initialkosten gehen die Folgekosten für eine Komponente in die Zeit-/Kostenmatrix ein. Diese werden solange wiederkehrend zum Ende eines Jahres fortgeschrieben, bis der zeitliche Horizont der Lebenszykluskostenanalyse erreicht wird.
- Die Folgekosten bestehen sowohl aus den Betriebs- und Funktionserhaltungskosten, als auch aus den Austauschkosten, die durch die Ersatzbeschaffung einer Komponente hervorgerufen werden. Die Betriebs- und die Funktionserhaltungskosten einerseits, aber auch die Austauschkosten andererseits können durch eine weitergehende Faktorisierung optional weiter untergliedert werden.

Im Folgenden werden die mathematischen Berechnungsformeln angeführt, mit deren Hilfe eine vollständige nominale Zeit-/Kostenmatrix unter Berücksichtigung der Schwankungsbreite der Initialkosten zu entwickeln ist. Zentrale Bedeutung bei der Ermittlung der Folgekosten nehmen dabei die Initialkosten $C_{i,j}$ für die Komponente j bezüglich des Referenzzeitpunktes an. Unter der Voraussetzung, dass die Initialkosten einer Komponente j zum Zeitpunkt $t_{i,j}$ erstmalig in die nominale Zeit-/Kostenmatrix einfließen, ergeben sich die nachfolgend aufgeführten Zusammenhänge. Die Berechnung der Initialkosten wird dabei unter dem Gliederungspunkt „I.0“ subsumiert, die Folgekosten ergeben sich aus den Anteilen für Betriebs- und Funktionserhaltung (F.1) und den Anteilen für den Komponentenaustausch (F.2). Die mit den Zusätzen a, b oder c versehenen Gliederungspunkte stellen optionale Berechnungswege dar. Während der Buchstabe a den Charakter einer überschlägigen Berechnung ausdrückt, weist der Buchstabenzusatz c darauf hin, dass ein höherer

Detaillierungsgrad bzgl. der in die Berechnung eingehenden Größen gefordert wird. Das dem Gliederungspunkt in Klammern nachgestellte „n“ weist darauf hin, dass es sich um nominale Werte handelt.

I.0(n) Initialkosten für die erstmalige Installation der Komponente j:

für $t = t_{In,j}$:

$$C_{i,j} \text{ bzw. } (1 \pm w_j) * C_{i,j}$$

F.1a(n) Jährlich wiederkehrende Betriebs- und Funktionserhaltungskosten:

für $t > t_{In,j}$:

$$C_{o,j} = p_{o,j} * C_{i,j} \text{ bzw. } C_{o,j} = p_{o,j} * (1 \pm w_j) * C_{i,j}$$

F.1b(n) Optionale Betriebs- und Funktionserhaltungskosten unter Ansatz einer separaten Faktorisierung der Energie- und Instandhaltungsaufwendungen:

für $t > t_{In,j}$:

$$C_{o,j} = (p_{e,j} + p_{m,j}) * C_{i,j} \text{ bzw. } C_{o,j} = (p_{e,j} + p_{m,j}) * (1 \pm w_j) * C_{i,j}$$

F.1c(n) Wie unter F.1b(n) beschrieben; jedoch besteht zusätzlich die Möglichkeit, den Instandhaltungsaufwand zwischen der Inbetrieb- bzw. der Wiederinbetriebnahme und dem Funktionsausfall bzw. der Außerbetriebnahme für die Komponente j eine lineare Steigung vorzusehen:

für $t_{In,j} + k * s_j \leq t \leq t_{In,j} + (k + 1) * s_j$:

$$C_{o,j}(t) = \left(p_{e,j} + p_{m,j} + g_{m,j} * \frac{t + s_j - [(k+1)*s_j + t_{In,j}]}{s_j} \right) * C_{i,j}$$

bzw.

$$C_{o,j}(t) = \left(p_{e,j} + p_{m,j} + g_{m,j} * \frac{t + s_j - [(k+1)*s_j + t_{In,j}]}{s_j} \right) * C_{i,j} * (1 \pm w_j)$$

wobei $k = \{1, 2, \dots, q_{j-1}\}$

Die Kennzahl $k = 1$ bezeichnet den ersten Austausch nach der Erstinstallation

F.2a(n) Kosten für den planmäßigen Austausch der Komponente j nach Ablauf der theoretischen Nutzungsdauer. Die Austauschkosten leiten sich aus den Initialkosten ab:

für $t = t_{In,j} + k * s_j$:

$$C_{r,j} = C_{i,j} \text{ bzw. } C_{r,j} = (1 \pm w_j) * C_{i,j}$$

F.2b(n) Optionale Kosten für den planmäßigen Austausch der Komponente j nach Ablauf der theoretischen Nutzungsdauer, wobei für jeden Austauschvorgang der Aus-

tauschgrad $e_{k,j}$ [-], welcher direkt von den Initialkosten abhängt, anzugeben ist:

für $t = t_{In,j} + k * s_j$:

$$C_{r,j} = e_{k,j} * C_{i,j} \text{ bzw. } C_{r,j} = e_{k,j} * (1 \pm w_j) * C_{i,j}$$

Neben den Ausgaben sind bei der Aufstellung der Zeit-/Kostenmatrix ggf. Einnahmen zu berücksichtigen, die mit dem Betrieb des Bauwerks generiert werden. Erfolgt der Betrieb eines Straßentunnels durch die öffentliche Hand, so stehen den Kosten in der Regel keine Erlöse gegenüber, im Falle eines ÖPP-Tunnelprojektes ist die Erzielung von Erlösen wichtiger Bestandteil der Kalkulation um die Gesamtwirtschaftlichkeit zu erreichen. Da es sich auch bei den Erlösen um nominale Werte handelt, sind diese ebenfalls mit Preisstand zum Referenzzeitpunkt in die Matrix zu implementieren. Die Ansätze zur Ermittlung der Erlöse bei ÖPP-Vorhaben können dabei auf unterschiedlichen Ansätzen beruhen: Handelt es sich nach Weber und Alfen um ein Brownfield-Projekt, d.h. ein Tunnelstreckenabschnitt ist bereits Teil des bestehenden Streckennetzes zu dem Zeitpunkt, zu dem die Umwandlung in ein ÖPP-Projekte beschlossen wird, so kann die Abschätzung der Erlöse aus Maut- oder sonstigen Verfügbarkeitszahlungen auf Grundlage der Betriebshistorie abgeleitet werden. Ist das Projekt hingegen nach der bei Weber und Alfe gegebenen Definition ein Greenfield-Projekt und hat den Stellenwert der Erschließung einer neuen Verkehrsroute, so liegen für dieses ÖPP-Vorhaben lediglich Verkehrsprognosen vor, auf denen sich die Abschätzung der Erlöse stützen muss. (Formel 2.1) Wie zuvor erwähnt, kann eine einschränkende Verfügbarkeit dazu führen, dass die Erlöse nach im ÖPP-Vertrag definierten Vorgaben reduziert werden müssen. Gleichwohl ist auch der Fall zu kalkulieren, dass das Verkehrsvolumen innerhalb der Betrachtungsdauer zunimmt und somit die Erlöse steigen. Die Variable G bzw. der Index g stehen für den erzielbaren Erlös und wurde aus dem Englischen vom Wortstamm „gains“ abgeleitet. Um eine eindeutige Kennzeichnung zu gewährleisten sind die Erlöse mit einem positiven Vorzeichen zu versehen. Wie bei den Kosten bezieht sich der vorzugebene Wert G ebenfalls auf den Referenzzeitpunkt der gesamten Lebenszykluskostenbetrachtung. Die ggf. in das Berechnungsmodell zu implementierenden Erlöse stellen sich wie folgt dar:

E.1a(n) Jährliche wiederkehrende Erlöse aus Maut oder sonstigen Verfügbarkeitszahlungen unter Berücksichtigung der Schwankungsbreite w_g [-]:

für $0 < t \leq d$:

$G \text{ bzw. } (1 \pm wg) * G$

E.1b(n) Erlöse aus Maut oder sonstigen Verfügbarkeitszahlungen, wobei die Erlöse optional in Abhängigkeit der prognostizierten Einflüsse einer separaten Faktorisierung unterliegen können:

für $0 < t \leq d$:

$eg(t) * G \text{ bzw. } eg(t) * (1 \pm wg) * G$

wobei der Faktor $eg(t)$ [-] den für jedes Betriebsjahr zu definierenden Erlösfaktor beschreibt

Eine Zeit-/Kostenmatrix bzw. eine zu untersuchende Tunnelvariante sind als vollständig anzusehen, wenn alle relevanten Angaben identifiziert und in die entsprechenden Modultabellen aufgenommen wurden. Ein wirtschaftlicher Vergleich zwischen verschiedenen Tunnelvarianten ist indes erst dann möglich, sobald für sämtliche zu untersuchende Varianten eine vollständige Erfassung in den Modultabellen abgeschlossen wurde. Exemplarisch sollen drei Komponenten über die Lebenszyklusdauer d des Bauwerks betrachtet werden. Im Einzelnen zeichnen sich die Komponenten $j = 1, 2, 3$ durch die folgenden Randbedingungen aus:

Komponente $j = 1$:

- Sowohl für die Initial- als auch für die Folgekosten ist die einheitliche Schwankungsbreite $w1$ [-] zu berücksichtigen,
- Mit Inbetriebnahme des Tunnels erfolgt die Berücksichtigung der Initialkosten für die Komponente, es gilt also $tl_{n,1} = 0$,
- Die Anzahl der baugleich errichteten Komponenten beträgt $a1$ [-],
- Die Betriebs- und Funktionserhaltungskosten sind gemäß dem Gliederungspunkt F.1b(n) zu ermitteln,
- Die theoretische Nutzungsdauer beträgt $s1 = 10 a$; die Anrechnung der Austauschkosten erfolgt gemäß Punkt F.2b(n).

Komponente $j = 2$:

- Sowohl für die Initial- als auch für die Folgekosten ist die einheitliche Schwankungsbreite $w2$ [-] zu berücksichtigen,
- Die Initialkosten der Komponente werden zum Ende des zweiten Betriebsjahres angesetzt, es gilt also $tl_{n,2} = 2$,
- Die Anzahl der baugleich errichteten Komponenten beträgt $a2$ [-],
- Die Betriebs- und Funktionserhaltungskosten sind gemäß dem Gliederungspunkt F.1c(n) zu ermitteln,
- Die theoretische Nutzungsdauer beträgt $s2 = 8 a$; die Anrechnung der Austauschkosten erfolgt gemäß Punkt F.2a(n).

Komponente $j = 3$:

- Diese Komponente beschreibt ausschließlich die Erlöse, die durch den Betrieb des Tunnelbauwerks erzielt werden; der Faktor $a3$ hat somit den Wert 1,
- Erlöse gehen ab dem ersten Betriebsjahr in die Zeit-/Kostenmatrix ein,
- Die Erlöse werden mit der Schwankungsbreite wg [-] beaufschlagt und der Erlösfaktor $eg(t)$ [-] findet in Übereinstimmung mit dem Gliederungspunkt E.1b(n) Anwendung.

Für die in der letzten Zeile der Tabelle 2-2 aufgeführte Komponente $j = n$ gelten dieselben Bedingungen wie für die Komponente $j = 1$.

Die Erlöse der Komponente $j = 3$ zeichnen sich durch ein positives Vorzeichen aus. Folgerichtig müssen die Kosten, wie in Tabelle 2-2 für die Komponenten $j = 1, 2, \dots, n$ gezeigt mit einem negativen Vorzeichen versehen werden.

Tabelle 2-2: Nominale Zeit-/Kostenmatrix

		Zeitpunkt t [a]						
		0	1	2	...	10	...	d
Komponente j	1	$-C_{i,1} \cdot (1 \pm w_1) \cdot a_1$	$-(p_{e,1} + p_{m,1}) \cdot (1 \pm w_1) \cdot C_{i,1} \cdot a_1$	$-(p_{e,1} + p_{m,1}) \cdot (1 \pm w_1) \cdot C_{i,1} \cdot a_1$	...	$[-(p_{e,1} + p_{m,1}) \cdot (1 \pm w_1) \cdot C_{i,1} - e_{1,1} \cdot (1 \pm w_1) \cdot C_{i,1}] \cdot a_1$	...	$-(p_{e,1} + p_{m,1}) \cdot (1 \pm w_1) \cdot C_{i,1} \cdot a_1$
	2			$-C_{i,2} \cdot (1 \pm w_2) \cdot a_2$	...	$[-(p_{e,2} + p_{m,2} + g_{m,2}) \cdot [t + s_j - ((k+1) \cdot s_j + t_{i,n,2})] / s_2] \cdot (1 \pm w_2) \cdot C_{i,2} - C_{i,2} \cdot (1 \pm w_2) \cdot a_2$	...	$-C_{i,2} \cdot (1 \pm w_2) \cdot a_2$
	3		$e^g(t_1) \cdot (1 \pm w^g) \cdot G$	$e^g(t_2) \cdot (1 \pm w^g) \cdot G$	...	$e^g(t_{10}) \cdot (1 \pm w^g) \cdot G$	...	$e^g(t_d) \cdot (1 \pm w^g) \cdot G$
	...	...	...	...	...	...	...	...
	n	$-C_{i,n} \cdot (1 \pm w_n) \cdot a_n$	$-(p_{e,n} + p_{m,n}) \cdot (1 \pm w_n) \cdot C_{i,n} \cdot a_n$	$-(p_{e,n} + p_{m,n}) \cdot (1 \pm w_n) \cdot C_{i,n} \cdot a_n$	...	$[-(p_{e,n} + p_{m,n}) \cdot (1 \pm w_n) \cdot C_{i,n} - e_{1,n} \cdot (1 \pm w_n) \cdot C_{i,n}] \cdot a_n$	...	$-(p_{e,n} + p_{m,n}) \cdot (1 \pm w_n) \cdot C_{i,n} \cdot a_n$

In Abhängigkeit vom Umfang der vorliegenden Projekt- bzw. Komponenteninformationen kann durch den Kalkulator gewählt werden, in welcher Detailschärfe mit den Folgekosten und den ggf. anfallenden Erlösen umzugehen ist. Durch Summation in Zeilen und Spalten werden dabei zu erwartenden Kosten

2.3 Vergleichende LZK-Analyse für den Modelltunnel mit Basisausstattung vs. kompensierte Lösung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Vergleichsrechnung für das Beispiel Modelltunnel „BBA+Längslüftung“ im Vergleich zur Basislösung „Längslüftung+Rauchabsaugung“ vorgestellt, so wie sie im Weiteren für den ganzheitlichen Vergleich der beiden konkurrierenden Systeme herangezogen wurden.

Folgende Randbedingungen wurden im Rahmen der Vergleichsrechnung hierbei berücksichtigt:

- Die beiden Bauwerke (der Modelltunnel mit der kompensierten Lösung und der Basislösung (siehe auch Anhang 4)) unterscheiden sich hinsichtlich baulich-konstruktiver Randbedingungen in keinsten Weise, exklusive der für die Rauchabsaugung notwendigen Zwischendecke. Diese wird bei Verwendung der BBA vollständig kompensiert.
- Hieraus ergibt sich, dass für die vergleichende Berechnungen auf die Einbeziehung der Lebenszykluskosten für Tunnelschale, Fahrbahnaufbau etc., also alle konstruktiven und das Bauwerk als solches beschreibenden Details,

verzichtet werden kann, da die hierbei ermittelten Werte für beide Bauwerkstypen identisch sind.

- Gleiches gilt für die betriebstechnische Ausstattung abseits der kompensierten Lüftungskonfiguration: Die Bauwerke sind beide per Definition nach gültiger RABT ausgestattet, bis auf die Kompensation durch die BBA. Die zu veranschlagenden Lebenszykluskosten unterscheiden sich daher im Hinblick auf verkehrstechnische Ausstattung und sonstige Sicherheitstechnik (beispielsweise Notruftechnik, Beleuchtung etc.) in keinsten Weise. Auch diese Kosten können daher in diesem Fall vernachlässigt werden.
- Dies gilt ebenfalls für alle Kosten, die aus dem Regel- und Notfallbetrieb der Längslüftung resultieren: Da für beide konkurrierenden Systeme eine Längslüftung im Regel- und Notfallbetrieb mit identischer Leistung installiert werden muss, kann diese in diesem Fall vernachlässigt werden (Energiekosten, Wartungskosten, Austausch etc.).
- Für die Ausstattung des kompensierten Beispieltunnels wurde durch den Partner Fogtec eine auf die Randbedingungen des Tunnels angepasste Wassernebelanlage konzipiert. Die exakten Konfigurationsdaten können dem betreffenden fachlichen Bericht bzw. den korrespondierenden Anhängen zu diesem Leitfaden entnommen werden.
- Alle Kostenwerte für Anschaffung, Wartung, Unterhalt etc. für die Wassernebelanlage wurden durch Fogtec für dieses spezielle Beispiel

zur Verfügung gestellt. Diese sind auf das in Anhang 4 vorgestellte Beispiel angepasst zu sehen. Eine Übertragbarkeit einzelner Angaben auf andere Bauwerke kann nicht zugesichert werden. Zur Verdeutlichung sind im Folgenden alle wesentlichen Größen aufgeführt.

- Alle Kostenwerte für Anschaffung, Wartung, Unterhalt etc. für die Basislösung wurden bei Herstellern angefragt oder entstammen anderen Veröffentlichungen.
- Die Richtigkeit der angegebenen Zahlenwerte konnte durch den Lehrstuhl nur bedingt geprüft werden. Abweichungen zu reellen Projekten resultieren unter Umständen aus abweichenden Randbedingungen oder preislichen Veränderungen. Sie sind nicht Ergebnis der Modellmathematik als solcher.
- Aufgrund der auf diese Art in der Berechnung vorhandenen Unschärfe wird bei einer projektspezifischen Entscheidungen **dringend** empfohlen, alle hier verwendeten Zahlenwerte zu

überprüfen und gegen aktualisierte Werte zu tauschen.

Eine vollständige, alle Parameter berücksichtigende LZZ-Modellrechnung würde dann notwendig, wenn zwei Bauwerke mit unterschiedlichen Randbedingungen als infrastrukturelle Lösung miteinander konkurrieren würden, beispielsweise ein Absenktunnel mit einem gebohrten Tunnel, so wie oftmals im Bereich von Flußquerungen der Fall. Da dies nicht dem hier diskutierten Beispiel entspricht kann im Folgenden ein vereinfachter Ansatz gewählt werden, der jedoch im Prinzip in exakt dieser Weise im vollständigen Ansatz aufgeht.

Folgende Zahlenwerte wurden für diese exemplarische Modellrechnung verwendet:

LZK-Analyse SOLIT² (Basislösung vs. kompensierte Lösung)

Tunnelbauwerk		
Gegenverkehrstunnel mit 2 Röhren, erstellt im Schildvortrieb		
Tunnellänge	3.000	m
Tunnelquerschnitt "Regellösung ohne Seitenstreifen mit Nothaltebuchten" RQ 31t (RAA) bzw. RQ 26t (nach RABT)		
Anzahl der Querschläge	5	Stück
Verkehrsaufkommen (DTV) pro Tag und Tunnelröhre	20.000	
Betrachtungszeitraum	100	Jahre
Angaben Zwischendecke		
Kosten zur Realisierung inkl. 38 Zuluftauslässen	1.000	€/m
Nutzungsdauer	90	Jahre
Angaben Lüftungsklappen		
Anzahl Lüftungsklappen	64	Stück
Investitionskosten pro Absaugklappe	3.500	€
pauschaler Wartungsvertrag	30.000	€/Jahr
Nutzungsdauer	30	Jahre
Angaben Axialventilatoren		
Anzahl Axialventilatoren	4	Stück
Leistung Axialventilatoren	75	kW
Investitionskosten pro Axialventilator	100.000	€
Nutzungsdauer	20	Jahre
Vorgaben für den Regelbetrieb der Axialventilatoren		
mittlere Laufzeit pro Tag	15	Stunden
mittlere Leistung pro Tag	50	%
Strompreis	0,26	€/kWh
Instandhaltung		
Wartung und Instandsetzung Zwischendecke	24.000	€/Jahr
pauschaler Wartungsvertrag für Axiallüfter und Absaugklappen	30.000	€/Jahr
Wassernebel-Brandbekämpfungsanlage		
Investitionskosten	1.083	€/m
Wartung	65.000	€/Jahr
Nutzungsdauer	20	Jahre
Finanzmodell		
Kalkulationszinssatz	6	%
Preissteigerungsrate	3	%
Energiepreissteigerungsrate	5	%

Hieraus ergeben sich durch die Modellrechnung folgende LZK für die beiden Bauwerke:

Tabelle 2-3: Ergebnismatrix

Alternative	Kapitalwert (t=100 a)	Initialkosten	Folgekosten
Basislösung	17.726.133,19 €	1.824.000,00 €	15.902.133,19 €
Kompensierte Lösung	7.554.501,84 €	3.250.000,00 €	4.304.501,84 €

Die sich so ergebende Mittelverteilung über die gesamte Betrachtungsdauer zeigt nachfolgende Abbildung.

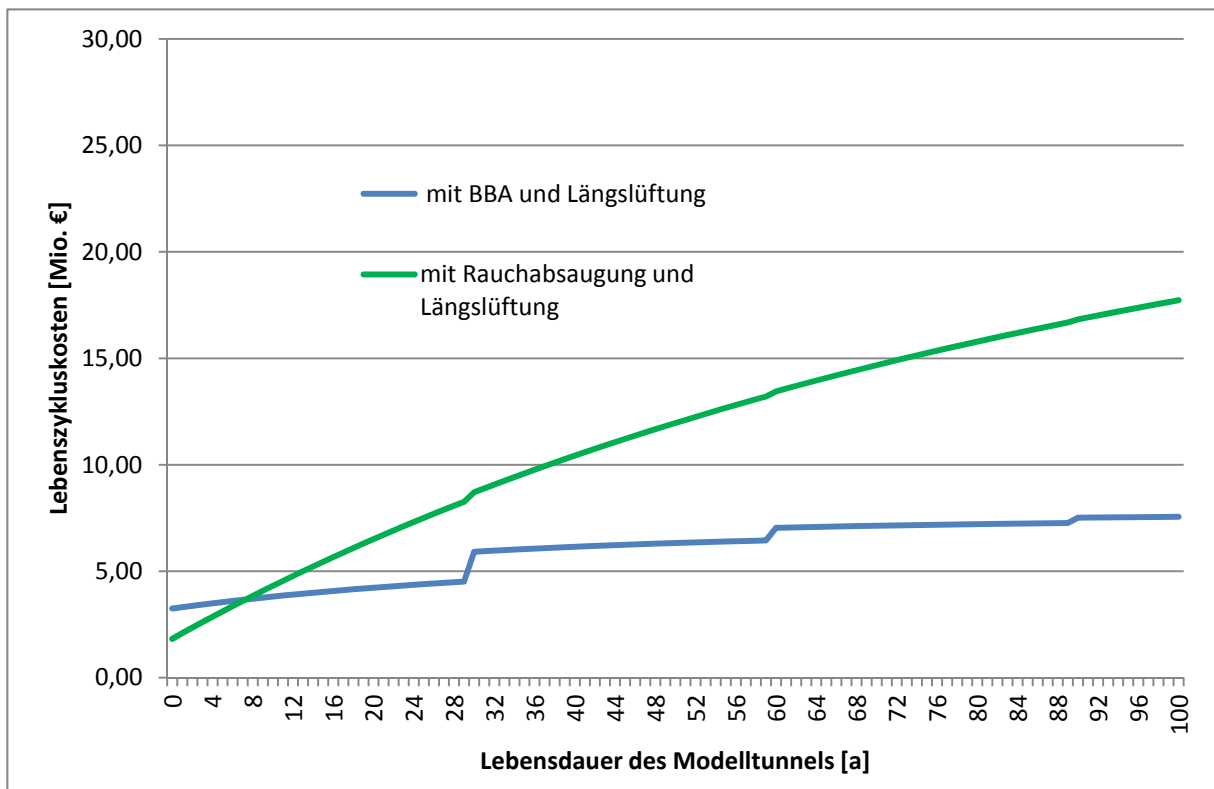


Abbildung 2-5: Vergleichende Darstellung der LZK beider Lösungen über den gesamten Lebenszyklus hinweg

Gut zu erkennen ist der anfängliche Vorteil der konventionellen Lösung aufgrund geringerer Aufwendungen für den initialen Invest. Dies kehrt sich bereits innerhalb einer Zeitspanne von 10 Jahren aufgrund höherer Kosten für den Unterhalt und Betrieb bei Verwendung einer Rauchgasabsaugung um. Der Einfluss des Re-Invests nach Ablauf der Lebensdauer der BBA sinkt mit der Laufzeit der Betrachtung, da hierfür verzinsliche Rücklagen gebildet werden können. Der Verlauf der Kurven legt zu dem nahe, dass – würde der Reinvest über die Laufzeit der Betrachtung vollständig angesetzt – sich der Kapitalwert für die kompensierte Lösung

ohne Rücklagen trotzdem unterhalb dem der Basislösung bewegen würde.

3. Einsatz von multikriteriellen Bewertungsverfahren zur

3.1 Grundlagen zur multikriteriellen Bewertung

Es existiert derzeit keine transparente und nachvollziehbare Methodik für einen ganzheitlichen Vergleich verschiedener Ausstattungsvarianten bei Tunnelbauwerken. Diesen zu entwickeln wurde als zusätzliche, über die eigentlich beantragte Forschungszuwendung hinausgehende Aufgabenstel-

lung durch den Lehrstuhl bearbeitet. Hierzu wurden Methodenkompetenzen aus anderen fachlichen Bereichen weiterentwickelt, für die hier vorvorliegende Problemstellung adaptiert und in ein Softwaretool überführt. Im Folgenden werden die theoretischen Grundlagen in Grundzügen vorgestellt und ausgewählte Ergebnisse aus der vergleichenden Untersuchung präsentiert.

3.1.1 Nutzwertanalytische Methoden

- Nutzwertanalyse in der Standardversion

Die Nutzwertanalyse dient dazu Planungsalternativen hinsichtlich verschiedenster Bewertungskriterien mit unterschiedlichen Wertdimensionen vergleichend zu bewerten und so eine Rangfolge für die Eignung von Alternativen aufzustellen (komparative Bewertung). Sinnvoll ist ihr Einsatz nur für Alternativenvergleiche, bei denen alle Alternativen eine grundsätzliche Eignung aufweisen müssen und es nur um die vergleichende Bewertung der abwägbaren Vor- und Nachteile und die Ermittlung einer Rangfolge der Alternativen geht. Wesentliches Kennzeichen von Nutzwertanalysen ist der Aufbau eines hierarchischen Zielsystems, an dessen Spitze der Gesamtnutzen und an dessen Ende kardinal skalierte Indikatoren stehen. Für jedes Unterziel wird logisch geschlossen welchen Beitrag es für seine Oberziele leistet, wodurch sich die Basis für die Gewichtung bildet. Der Zielerfüllungsgrad einer Alternative wird für jeden Indikator über Nutzenfunktionen ermittelt, um auf dieser Weise den Teilnutzen aus der Multiplikation von Zielerfüllungsgrad mit zugeordnetem Gewicht zu erhalten, während sich der Gesamtnutzen aus der Addition der Teilnutzen ergibt. Das Anliegen der Nutzwertanalyse ist die technische Optimierung. In der Standardversion erweist sie sich als ungeeignet wenn Umweltbelange bei der Bewertung von Planungsvorhaben eine Rolle spielen, da sich die-

se (z.B. Biotopschutz und Lärmschutz) nicht miteinander verrechnen lassen.

- Nutzwertanalyse der 2. Generation

Um inakzeptable Alternativen ausschließen zu können, wird die Nutzwertanalyse mit Tabu-Kriterien weiterentwickelt. Diese weiterentwickelte Nutzwertanalyse ersetzt die kardinale durch ordinale Nutzenschätzungen, bildet Klassen durch Relevanzbäume und entwickelt eine Wertsynthese, die schrittweise durch Logik aggregiert und alle Wertbeziehungen (Substitution, Konkurrenz, Komplementarität, Indifferenz) zulässt. Komplexe Bewertungsaufgaben mit vielen Kriterien führen zu einem sehr hohen Aufwand und zu einer recht schwierigen Nachvollziehbarkeit für Dritte, sodass die praktischen Anwendungsmöglichkeiten dieser Methodenbausteine an ihre Grenzen stoßen. Die Nutzwertanalyse ist jedoch die Grundlage für Weiterentwicklungen bis hin zu Expertensystemen.

3.1.2 Der Analytische Hierarchie Prozess

Der „Analytische Hierarchie Prozess“ ist eine Sonderform der NWA und ein Verfahren, das von dem Mathematiker Thomas Lorie Saaty in den 70er Jahren in den USA entwickelt wurde. Mit diesem Verfahren können Entscheidungsprozesse unterstützt werden. Die Besonderheit ist die mehrstufige Anordnung von Kriterien und deren Gewichtung, die über mehrere Ebenen abläuft. Über die wachsende Feingliederung der Kriterien entsteht eine Baumstruktur. Der Grundgedanke liegt darin, die Ziele und möglichen Lösungsalternativen in einer hierarchischen Struktur zu erfassen und zu gliedern. Der AHP basiert auf Paarvergleichen, einer 9-Punkte-Skala und der Berechnung von Eigenvektoren. Dieser Prozess benötigt Rechenkraft, die dem AHP in der Praxis erst ab den 90er Jahren mit Beginn des Computer-Zeitalters erfolgreich zur Verfügung stand.

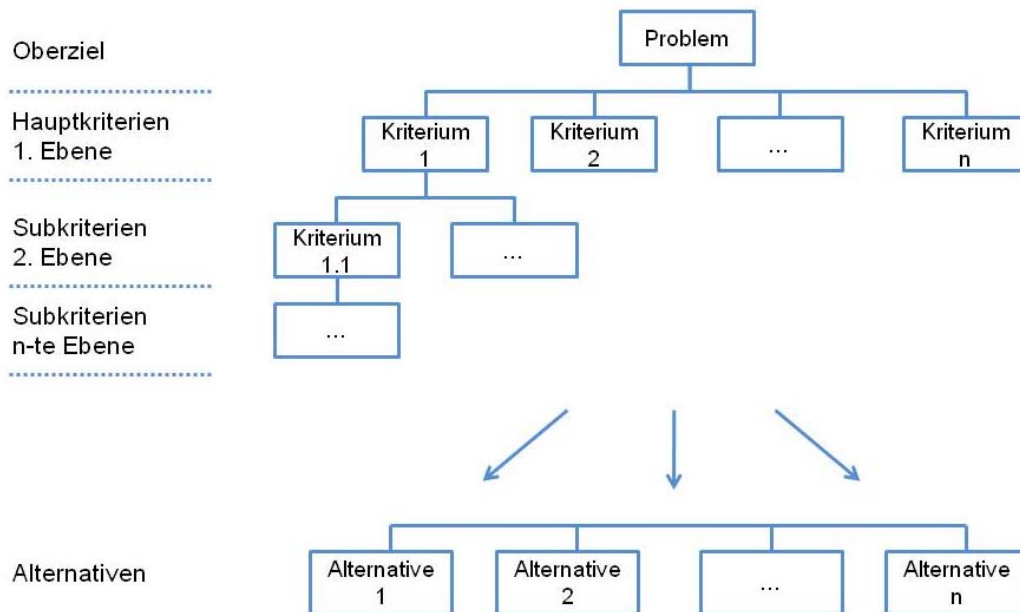


Abbildung 3-1: Hierarchie von Kriterien und Alternativen; Eigene Darstellung; in Anlehnung an

Als „analytisch“ wird der AHP bezeichnet, weil er die Problemkonstellation in all ihren Abhängigkeiten analysiert. Die entscheidungsrelevanten Informationen werden in eine „hierarchische“ Struktur gebracht und es handelt sich um einen „Prozess“, weil ein prozessualer Ablauf vorgegeben wird, wie Entscheidungen strukturiert und analysiert werden. Die Entscheidungsfindung und das Ergebnis sollen nachvollziehbar sein und Inkonsistenzen (Unbeständigkeit der Vergleichsurteile) aufgedeckt werden.

3.2 Der Analytische Hierarchie Prozess (AHP) im Projekt SOLIT²

3.2.1 Allgemeines

Der AHP wurde Anfang der 1970er Jahre von Thomas L. Saaty entwickelt. Im Gegensatz zu vielen anderen Entscheidungsverfahren ist das Verfahren nicht nur auf betriebswirtschaftliche Problemstellungen ausgerichtet, sondern ist auch in Bereichen der Sozial- und Wirtschaftswissenschaften bekannt. Ferner dient es zur Unterstützung bei komplexen Situationen, die vor allem durch subjektive Aspekte geprägt sind. Das Prinzip des AHP-Verfahrens wird vor allem an dessen drei Hauptbestandteilen deutlich: Analyse der Entscheidungssituation, Aufbau einer hierarchischen Struktur und Ablauf der Entscheidung als Prozess. Die analytische Vorgehensweise bedeutet, dass das Verfahren mit Hilfe von mathematisch-logischen Funktionen arbeitet, die nachvollziehbar

gegenüber Entscheidern dargestellt werden können. Der Aufbau einer hierarchischen Struktur führt dazu, dass das Problem in Ebenen aufgeteilt wird, deren Elemente den jeweiligen Kriterien oder Alternativen entsprechen. Der prozessartige Charakter ermöglicht es schließlich, das Verfahren mehrmals ablaufen zu lassen, Entscheidungen zu reproduzieren und den Weg der Entscheidungsfindung nachvollziehbar und für den Entscheider somit vorteilhafter zu gestalten. Der AHP ist eine Methode, ein Ranking für Alternativen zu schaffen, um mit Hilfe einer Vielzahl von Kriterien die beste Alternative zu wählen. Dabei hilft dieser den Entscheidern dahingehend, die kritischen Aspekte eines Problems zu strukturieren, indem eine Hierarchie in Form einer Baumstruktur geschaffen wird, so dass der Überblick über das Entscheidungsproblem stets gewährleistet wird.

3.2.2 Die Axiome der AHP-Methodik

Für die Anwendung des AHP müssen bestimmte Axiome erfüllt sein. Saaty formulierte insgesamt vier Axiome. Harker/Vargas haben diese Axiome in Untersuchungen weiter beschrieben, die im Folgenden zusammengefasst werden:

Axiom1: Liegen zwei Elemente, i und j aus der endlichen Menge A , vor, so ist es dem Entscheider anhand einer rationalen, reziproken Skala möglich, einen Wert a_{ij} anzugeben. Mit Hilfe dieses Wertes können diese beiden Elemente in einem Paarvergleich miteinander verglichen werden, so dass gilt:

$\in A$

$$a_{ij} = 1/a_{ji} \text{ für alle } i, j$$

Gemäß den eben genannten Ausführungen (Nutzung einer reziproken Skala) beläuft sich die Anzahl der erforderlichen Paarvergleiche nur auf $\frac{1}{2} \cdot n \cdot (n-1)$ Vergleiche bei n Alternativen.

Axiom 2: Bei zwei vorliegenden Elementen wird ein Element niemals unendlich besser als ein anderes Element bewertet. Die Nutzung einer endlichen Skala ist demnach vorgeschrieben, so dass gilt:

$$a_{ij} \neq \infty \text{ für alle } i, j \in A$$

A

Axiom 3: Der Entscheider muss in der Lage sein, das vorliegende Entscheidungsproblem in eine hierarchische Struktur zu überführen (Aufteilung in Oberziel, Unterzielen, Kriterien, Sub-Kriterien und Alternativen als unterste Ebene).

Axiom 4: In der Hierarchie müssen alle Kriterien und Alternativen enthalten sein, um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten.

Während der Entscheidungsfindung ist die Nutzung des AHP als ein Prozess zu verstehen, der einem bestimmten Ablauf folgt. Das Verfahren läuft in insgesamt drei Phasen ab, welche sich in die Phasen „Planung“, „Bewertung“ und „Ergebnis“ gliedern. Das Flussdiagramm ist in Abbildung 6-1 wiedergegeben.

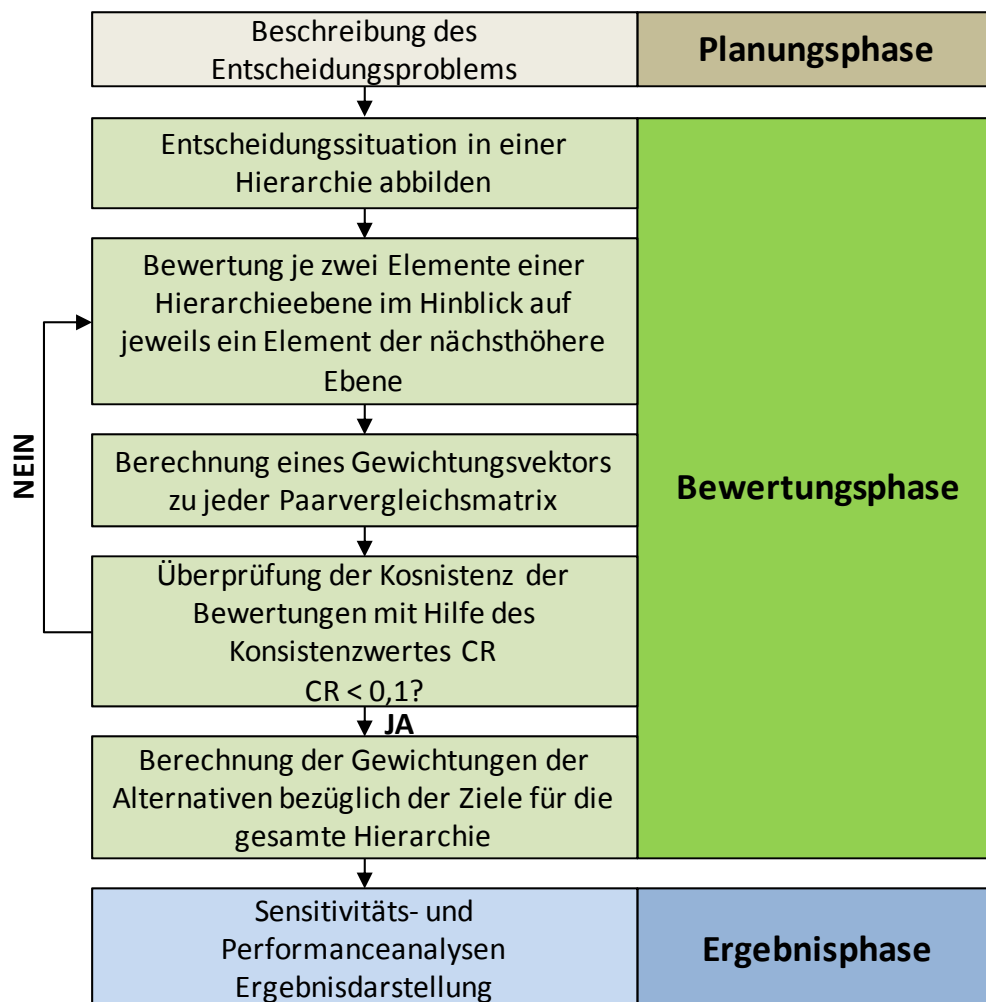


Abbildung 3-2: AHP-Flussdiagramm

3.2.3 Planungsphase

Die erste Phase einer Entscheidungsanalyse beinhaltet zunächst die Umschreibung der Aufgabe

des zu entscheidenden Sachverhaltes. Im Zuge dieses Schrittes werden nicht nur finanzielle Regelungen getroffen, sondern auch ein erster Ablauf

der unmittelbar bevorstehenden Entscheidungssituationen besprochen.

Die Projektbeteiligten gestalten zunächst aus den vorgegebenen Zielen eine Zielhierarchie. Grundsätzlich ist zu Beginn zu klären, welches Ziel die Projektbeteiligten verfolgen. Ziele wie die Ermittlung der Alternative mit dem größten Nutzen (Nutzenhierarchie), den geringsten Kosten (Kostenhierarchie) oder mit dem geringsten Risiko (Risikohierarchie) sind durchaus möglich. In diesem Zusammenhang ist ferner die Unsicherheit des Entscheidungsproblems zu bestimmen und abzubilden.

3.2.4 Bewertungsphase

Das Entscheidungsproblem wird in dieser Phase exakter formuliert. Dabei werden zur Beschreibung der Zielhierarchie Kriterien (Attribute) herangezogen, wobei diese wiederum auf einer Stufe mit denen der nächst niedrigeren Stufe in Beziehung stehen (Bezug zu den einzelnen Ebenen). Die Attribute werden schließlich gewichtet und die Alternativen evaluiert.

3.2.4.1 Bestimmung der Attribute und Alternativen

Während der Planungsphase wurden einzelne, entscheidungsrelevante Alternativen ausgewählt, die für die Entscheidungsproblematik als wichtig deklariert wurden, so dass nicht relevante Alternativen ausgeschlossen werden. Das Ausschlussverfahren kann beispielsweise durch die Festlegung von Ausschlusskriterien erfolgen. Kriterien müssen dabei klar erfassbar sein und vor allem relevante Merkmalsausprägungen aufweisen. Die darauf folgenden Bewertungen sollten dann mit den jeweiligen Experten stattfinden, die auch für die Evaluation der Kriterien herangezogen werden. Hierzu ist es erforderlich, das fachübergreifende Wissen der Experten wie bspw. Boden-, Umwelt-

und Verkehrsgutachter, in die Bewertungsphase mit einzubinden, um die Nachvollziehbarkeit und Transparenz der Entscheidung zu erhöhen.

3.2.4.2 Kriterienbewertung

Die Kriterienbewertung beinhaltet die entscheidenden Kernpunkte des AHP-Ansatzes, in denen die Kriterien eingestuft und gewichtet werden.

Einstufung der Kriterien

Als „Top-down“ und „Bottom-up“ werden zwei entgegengesetzte Arbeitsrichtungen bezeichnet, die in verschiedenen Sinnzusammenhängen für Analyserichtungen verwendet werden, so dass die Einstufung der Kriterien nach einem dieser Methoden erfolgen sollte. Nach sollte eine Strukturierung der Hierarchie beginnend beim Ziel „nach unten“ erfolgen („Top-down“).

Vergleich der Kriterien

Anhand einer 9-Punkte-Werteskala (Tabelle 6-1) werden im folgenden Schritt die Kriterien gewichtet. Die Kriterien werden untereinander paarweise im Hinblick auf alle relevanten Elemente der nächst höheren Stufe verglichen. Für eine aussagekräftige Bewertung müssen die verschiedenen Informationen gegeneinander gewichtet werden, um die Bedeutsamkeit für die Entscheidung zu verdeutlichen. Die von Saaty verwendete Skala beinhaltet ein weiteres wichtiges Element des AHP-Verfahrens, nämlich die Verwendung von reziproken Skalenwerten, die von ihm zwingend vorgeschrieben werden. D.h., wenn ein Element 3-mal so wichtig ist wie ein anderes, bedeutet dies im Umkehrschluss, dass dem anderen Element der Wert 1/3 zugeordnet wird. Bei einem umgekehrten Verhältnis werden demzufolge die Kehrwerte der in Tabelle 6-2 aufgezeigten Skalenwerte verwendet.

Tabelle 3-1: Bewertungsmatrix: 9-Punkte-Bewertungsskala nach

	Definition	Interpretation
1	Gleiche Bedeutung	Beide verglichenen Elemente haben die gleiche Bedeutung für das nächsthöhere Element
3	Etwas größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine etwas größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
5	Erheblich größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine erheblich größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
7	Sehr viel größere Bedeutung	Die sehr viel größere Bedeutung eines Elements hat sich in der Vergangenheit klar gezeigt.
9	Stark dominierend	Es handelt sich um den größtmöglichen Bedeutungsunterschied zwischen zwei Elementen.
2, 4, 6, 8	Zwischenwerte	

Tabelle 3-2: Reziproke 9-Punkte-Bewertungsskala nach

	Definition	Interpretation
1	Gleiche Bedeutung	Beide verglichenen Elemente haben die gleiche Bedeutung für das nächsthöhere Element
1/3	Etwas geringere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine etwas geringere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
1/5	Erheblich geringere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine erheblich geringere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
1/7	Sehr viel geringere Bedeutung	Die sehr viel geringere Bedeutung eines Elements hat sich in der Vergangenheit klar gezeigt.
1/9	Stark unterlegen	Es handelt sich um den größtmöglichen Bedeutungsunterschied zwischen zwei Elementen.
1/2, 1/4, 1/6, 1/8	Zwischenwerte	

Ein vorteilhaftes Charakteristikum des AHP ist es, neben qualitativen auch quantitative Informationen in den Entscheidungsprozess mit einzubeziehen. Bei der Verarbeitung quantitativer Daten ist es nicht nötig, diese Daten mit Hilfe der 9-Punkte-Skala zu bewerten. Die Gewichte können direkt berechnet werden. Beispiele für solche quantitative Daten sind Kosten, Emissionen oder auch Immissionen.

Werden im Zuge einer Untersuchung maximale Werte gesucht, lässt sich eine Verhältniszahl zwischen den einzelnen Werten und der Summe der Werte bilden. Ein Beispiel hierfür ist die Einsparung an CO₂-Emissionen. Je höher ein Wert ist, desto höher ist auch sein Nutzen. Werden jedoch beispielsweise die minimalen Werte einer Bewertung gesucht, muss das Verhältnis mit den reziproken Werten berechnet werden. Je höher ein Wert ist, desto niedriger ist sein Nutzen (siehe Formeln 1 und 2):

$$w_i = \frac{a_i}{a_1 + a_2 + \dots + a_n} \quad (1)$$

$$w_i = \frac{\frac{1}{a_i}}{\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} + \dots + \frac{1}{a_n}} \quad (2)$$

Berechnung der Kriteriengewichte

Mit Hilfe des Eigenwertverfahrens lässt sich nunmehr eine Rangfolge der Kriterien (bzw. später der Alternativen) berechnen. Dabei werden die Vergleichswerte der vorangegangenen Matrizen in Eigenwerte umgewandelt. Diese Eigenwerte werden anschließend in einen normierten Eigenvektor überführt, der die relative Wichtigkeit der verschiedenen Attribute abbildet und somit eine Gewichtung der Kriterien darstellt.

Die vereinfachte Berechnung des Eigenvektors läuft annäherungsweise nach diesem Standardverfahren ab. Alle Vergleichswerte werden dabei spaltenweise addiert und normiert. Die aufbereiteten Vergleichswerte werden zeilenweise addiert und erneut normiert. Die ausgewiesenen Spaltenwerte geben dann den Eigenvektor an. Die Vorgehensweise ist in der folgenden Tabelle 6-3 angegeben.

Tabelle 3-3: Schema zur Berechnung der AHP-Gewichtung

Attribute	A_1	A_2	A_n	Normierte Evaluationsmatrix			Zeilen-summe $\sum r_i$	Normierter Eigenvektor w_i
				A_1	A_2	A_n		
A_1	$A_{11} = 1$	A_{12}	A_{1n}	$\frac{A_{11}}{C_1}$	$\frac{A_{12}}{C_2}$	$\frac{A_{1n}}{C_n}$	r_1	$w_1 = \frac{r_1}{n}$
A_2	$A_{21} = \frac{1}{A_{12}}$	$A_{22} = 1$	A_{2n}	$\frac{A_{21}}{C_1}$	$\frac{A_{22}}{C_2}$	$\frac{A_{2n}}{C_n}$	r_2	$w_2 = \frac{r_2}{n}$
A_n	$A_{n1} = \frac{1}{A_{1n}}$	$A_{n2} = \frac{1}{A_{2n}}$	$A_{nn} = 1$	$\frac{A_{n1}}{C_1}$	$\frac{A_{n2}}{C_2}$	$\frac{A_{nn}}{C_n}$	r_n	$w_n = \frac{r_n}{n}$
Spalten-summe $\sum C_i$	$C_1 = \sum_{i=1}^n A_{i1}$	$C_2 = \sum_{i=1}^n A_{i2}$	$C_n = \sum_{i=1}^n A_{in}$	1	1	1	n	1

Die Handhabung dieser Methode ist einfach. Der Ablauf der Prioritätenberechnung läuft dabei stets gleichbleibend ab. Das exakte Verfahren hingegen, welches deutlich aufwändiger ist, lehnt sich mehr an das menschliche Urteilsvermögen an. Die Berechnung der genauen Werte ist eine iterative Prozedur, die sogenannte „präzisere Prioritätenewichtung“. Die Berechnungsregeln geben vor,

- die Matrix sukzessiv zu quadrieren,
- die Reihensumme zu berechnen und zu normalisieren,
- das Ergebnis ist die erste Näherung des Prioritätenvektors,
- die Berechnung endet nur, wenn der Unterschied zwischen zwei Rechenschritten minimal ausfällt bzw. bis ein gewisser Grenzwert erreicht wird,

Es sei angemerkt, dass die programmierte Software „DEMUS“ (siehe Kapitel 4.4.1) auf der Theorie des exakten Verfahrens basiert.

Konsistenzprüfung

Eine Evaluationsmatrix ist konsistent, wenn $a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik}$ für beliebige i, j und k gilt. Paarvergleiche erfolgen zumeist rein subjektiv. Bei komplexen Entscheidungsaufgaben mit einer Vielzahl untereinander abhängiger Kriterien kann es durchaus vorkommen, dass solche Paarvergleiche inkonsistent sind. Bis zu einem geringen Grad sind

Inkonsistenzen jedoch erlaubt und gefährden die gesamte Entscheidung nicht. Bei hoher Inkonsistenz muss der Entscheidungsprozess und somit die Bewertung erneut durchgeführt werden. Zur Überprüfung der Konsistenz wird der von Saaty eingeführte Konsistenzindex CI (consistency index) und die Konsistenzratio CR (consistency ratio) berechnet. Dafür muss zunächst der Eigenwert der Bewertungsmatrix ermittelt werden, denn die Berechnung der Gewichte beim AHP beruht auf der Theorie des größten Eigenwertes einer Matrix. Wird die lineare Abbildung f durch eine Matrix A dargestellt, so hat die Eigenwertgleichung die Form

$$A \cdot x = \lambda \cdot x \text{ oder } (A - \lambda \cdot I)x = 0, \quad (3)$$

wobei I die Einheitsmatrix ist. Zur Ermittlung des CI wird ein Vergleich des maximalen Eigenwertes $\lambda_{\max}$ und des Eigenwertes λ der Paarvergleichsmatrix durchgeführt. Je größer die Differenz zwischen $\lambda_{\max}$ und λ ist, desto inkonsistenter ist die Matrix. Die Differenz ist allerdings von der Größe der Matrix abhängig, so dass für eine Normierung die Ermittlung des CR durchzuführen ist. Hierbei wird die ermittelte Differenz, also der Konsistenzindex CI, ins Verhältnis zum Zufallskonsistenzindex RI (random index) gesetzt und somit die CR ermittelt (siehe Tabelle 6-4). Der RI wurde durch Zufallspaarvergleiche für verschiedene $n \times n$ Matrizen bestimmt. Auf eine genaue Erklärung wird an dieser Stelle verzichtet und auf weiterführende Li-

teratur verwiesen. Für die Größe von CR gilt nach Saaty 0,1 als Richtwert. Wird dieser Wert überschritten, gilt der Entscheidungsprozess als inkonsistent und wird Auswirkungen auf die Interpretierbarkeit und Logik der Ergebnisse haben. Der Entscheider sollte demnach den Bewertungsprozess überdenken und erneut durchführen.

Die Berechnung des CI und der CR wird mit den Formeln 4 und 5 berechnet.

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (4)$$

$$CR = CI / RI \quad (5)$$

Tabelle 3-4: RI-Werte; Eigene Darstellung

Anzahl der Kriterien	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI-Wert	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Bewertung der Alternativen

Die Gewichtung der Kriterien erfolgt grundsätzlich auf allen Hierarchiestufen. Aus diesem Grund steigt die Anzahl der durchzuführenden Vergleiche stark an, wenn der Entscheider zu Beginn mehrere Ebenen und eine große Anzahl an Kriterien festgelegt hat. Anschließend wird durch die multiplikative Attributsgewichtung eine Verbindung der Gewichtungen über die Hierarchiestufen hinweg erzeugt.

Aus diesen Berechnungen werden die globalen Gewichte bestimmt. Dazu wird jede untergeordnete Kriterienebene mit dem Gewicht der übergeordneten Kriterienebene multipliziert. Die Formel zur Berechnung des globalen Gewichtes eines Elements i ($w_{\text{rel}}(i)$) für die n -te Hierarchiestufe lautet:

$$w_{\text{rel}}(i) = w_n \cdot w_{n-1} \quad (6)$$

Anschließend werden die lokalen Alternativengewichte je Merkmal mit den globalen Gewichten der darüberliegenden Kriterien multipliziert, so dass man globale Alternativengewichte erhält. Mit einer anschließenden Summenbildung der globalen Alternativengewichte je Alternative ergibt sich der Präferenzindex (w), der die Wichtigkeit jeder Alternative darstellt. Man erhält dann die Gewichtungen der Alternativen im Hinblick auf das Ziel in der obersten Ebene.

3.2.5 Ergebnisphase

Im Zuge der Ergebnisphase werden im Wesentlichen die Ergebnisse der Gesamtbewertung präsentiert. Dies hat den Vorteil, dass Ergebnisse mit Projektbeteiligten diskutiert werden können. Darüber hinaus können in Form von Sensitivitäts- und Performanceanalysen weitere Analysen hinsichtlich einzelner Kriterien und Alternativen erfolgen.

Sinnvoll ist dies vor allem bei Entscheidungen, wenn zwei Alternativen fast identische Gewichtungen vorweisen. Ziel einer Sensitivitätsanalyse ist es, Auswirkungen einer marginalen Gewichtsänderung auf die Alternativenbewertung zu zeigen. Dieses Instrument stellt ein effektives Hilfsmittel dar, um die Stabilität eines Ergebnisses zu analysieren, vor allem dann, wenn zwei Alternativen sehr knapp beieinander liegen.

Innerhalb der Analyse werden die Auswirkungen von Veränderungen von Gewichtungen einzelner Kriterien bei identischer Modellstruktur untersucht. Der Entscheider untersucht einzelne Kriterien, indem die Gewichtung sukzessive verändert wird. Es lassen sich dann Graphen in Abhängigkeit der Veränderung des Gesamtgewichtes darstellen. So wird schnell deutlich, ab welcher Gewichtung es unter Umständen zu einem Rangwechsel der Alternativen kommt. Sind für einen Rangwechsel der Alternativen sehr geringe Verschiebungen der Gewichte notwendig, so ist das Ergebnis instabil. In einem solchen Fall ist die Entscheidung erneut zu bewerten.

Im Rahmen einer solchen Sensitivitätsanalyse lassen sich weitere Untersuchungen anstellen. Insbesondere kann die gezielte Untersuchung einzelner Kriterien hinsichtlich der Auswirkung auf Alternativen vorgenommen werden. Dabei werden beispielsweise Kriterien einer Ebene herausgelöst und der direkte Einfluss eines jeden Kriteriums auf die Alternativen dargestellt.

In der Sensitivitätsanalyse will der Anwender beispielsweise ermitteln, wie sich die Alternativen verhalten, wenn ein Kriterium stärker oder auch schwächer bewertet wird. Dadurch kann der Anwender direkt erkennen, wie sich das Gesamtergebnis verändert. So wird grafisch gezeigt, wie groß der Einfluss eines jeden Kriteriums auf Alternativen sein kann. Nachfolgende Abbildung stellt

eine solche Sensitivitätsanalyse dar. Beispielhaft werden hier drei Funktionsverläufe von Alternativen gezeigt. Der Graph beschreibt, wie sich die Alternativen verhalten würden, wenn das hier zu untersuchende Kriterium stärker (Abszisse nach

rechts) oder schwächer (Abszisse nach links) bewertet würde

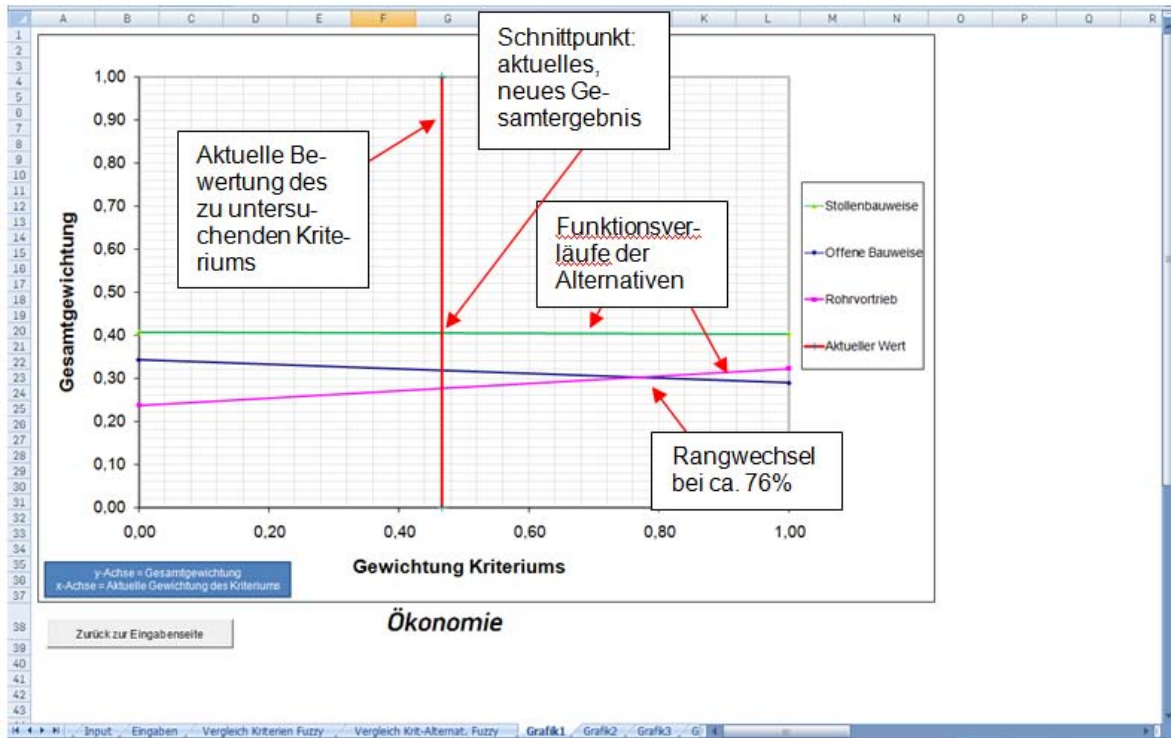


Abbildung 3-3: Beispielhafte Sensitivitätsanalyse

Beispielsweise wäre ab einer Veränderung des Kriteriums auf ca. 76% ein Rangwechsel zwischen zwei Alternativen zu verzeichnen. Ab diesem Wert wäre die zuvor auf dem 2.Rang liegende Alternative (blauer Verlauf) auf den 3.Rang gefallen. Unabhängig davon kann der Anwender hier sehr gut erkennen, dass eine beliebige Veränderung des Kriteriums (von 0% bis 100%) keine Auswirkungen auf die Stabilität des Ergebnisses hat. Die Alternative mit dem grünen Verlauf wäre grundsätzlich die zu präferierende Alternative.

Auf diese Art und Weise können im Vorfeld einflussreiche Kriterien präzise aufgezeigt und die direkte Auswirkung dieser Kriterien auf die Alternativen veranschaulicht werden.

3.3 Umsetzung in SOLIT²

3.3.1 Struktureller Ansatz der Bewertungssituation

Analog zu der bereits vorgestellten Methodik zum Aufbau einer Entscheidungssituation unter Verwendung des AHP-Algorithmus, kann eine

multikriterielle Struktur für die Sicherheitsbewertung bei unterirdischer Infrastruktur erstellt werden. Wichtige Voraussetzung ist hierbei natürlich, dass mehrere Alternativen miteinander konkurrieren, damit die dem AHP unterlegte Mathematik des paarweisen Vergleichs funktionieren kann. Vor dem Hintergrund der in SOLIT² diskutierten Schutzziele ergeben sich folgende beispielhafte Hauptkriterien für den Vergleich verschiedener sicherheitstechnischer Ausstattungsvarianten bei Tunnelbauwerken:

- Schutz des Bauwerks
- Schutz der Bauwerksnutzer
- Reduktion der Kosten

Der „Schutz des Bauwerks“ kann als Subkriterien verschiedene Größen beinhalten, wie beispielsweise die strukturelle Integrität der Konstruktion, die voraussichtlichen Kosten für die Bauwerksinstandsetzung nach einem Brandfall, sowie die Dauer dieser Instandsetzungsarbeiten. Letztere

spielen vor allem dann eine Rolle, wenn die Verfügbarkeit des Bauwerks ein entscheidendes Merkmal im Rahmen der Gesamtbetrachtung darstellen kann. Für vertiefende Lektüre wird an dieser Stelle auf die Erkenntnisse des BMBF-geförderten SKRIBT-Projektes (siehe auch Literaturliste) verwiesen. Da die hierbei zu Grunde lie-

genden „Heißbemessungen“ für Bauwerksteile nicht Bestandteil des SOLIT²-Projektes waren, werden diese Kriterien im Weiteren nur qualitativ bewertet.

Grafisch lässt sich diese Struktur wie folgt umsetzen:

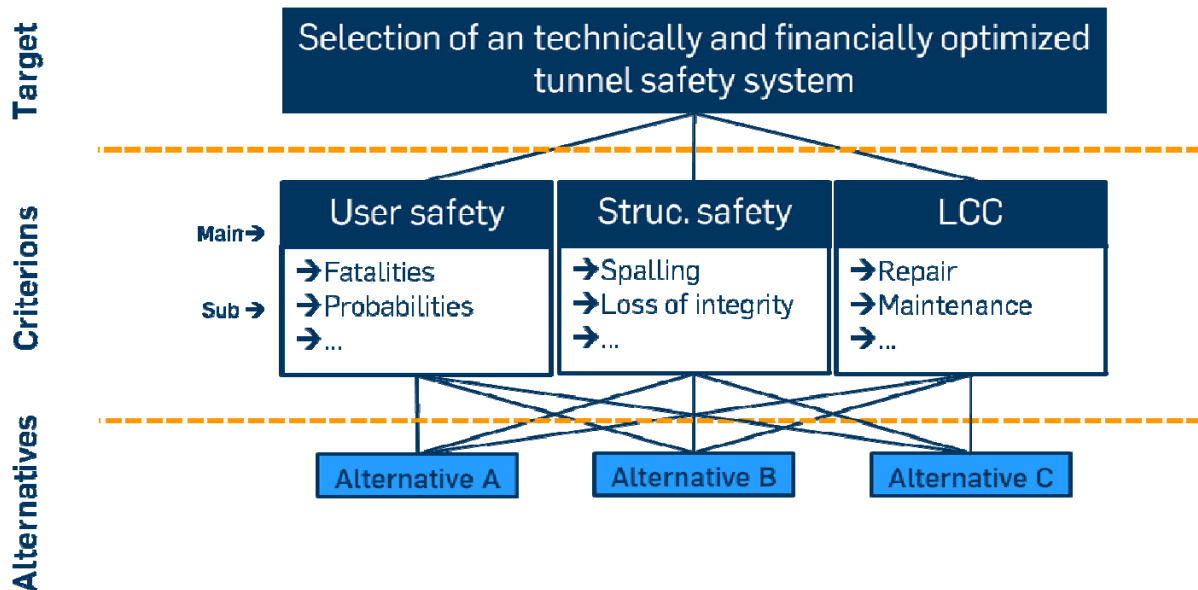


Abbildung 3-4: Beispielhafte AHP-Struktur der Bewertungssituation

3.3.2 Umsetzung der Bewertung für den Bereich Nutzersicherheit (User safety)

Zur Evaluierung der Performance einer Ausstattungskonfiguration von Tunnelbetriebstechnik unter den Randbedingungen eines Tunnelbrandes werden quantitative Risikoanalysen (QRA) herangezogen. Für die Darstellung der Durchführung derartiger Analysen wird hier auf den korrespondierenden Anhang 4 verwiesen.

Wie in verschiedenen Veröffentlichungen dokumentiert (siehe auch Vollmann, Thewes et al.), stellt die vergleichende Bewertung von f/n Diagrammen verschiedener Ausstattungskonfigurationen unter Umständen ein Problem dar. Vor allem im Falle sich überlagernder Kurven fällt oft eine Beurteilung bzw. Bewertung der Kurven im Verhältnis zueinander schwer: In der Regel werden zur Bewertung akkumulierte Risiken herangezogen, welche über die Summation der Einzelrisiken aller theoretischen Zustände des betrachteten Systems gebildet werden. Dies führt zu einer mathematischen Unterrepräsentierung von Ereignissen mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit aber sehr

hohem Schadensausmaß, da aufgrund der i.d.R. extrem kleinen Zahlenwerten für die Probabilität solcher Ereignisse ihr Einfluss auf das akkumulierte Risiko als vergleichbar gering anzusehen ist. In der Vergangenheit wurde diesem Umstand vor allem durch die Bildung von sogenannten Aversionsfaktoren Rechnung getragen.

Für die Umsetzung in SOLIT² wurde nun ein neuer Ansatz entwickelt, bei dem alle Werte der jeweiligen QRA als diskrete Bewertungsgrößen in die Betrachtung einfließen können. Hierzu werden die jeweils vorhandenen Daten der QRA über einen Schnittstelle in die AHP-Methodik eingelesen und dort weiterverarbeitet. Für eine genauere Darstellung dieses Ansatzes und seiner Umsetzung verweisen wir auf die im Anhang beigelieferte Veröffentlichung zur Umsetzung.

Methodisch beruht dieser Ansatz auf der Idee, dass die durch die jeweiligen Häufigkeitssummenlinien gebildeten Flächen des f/n-Diagramms in sogenannte „Risikoflächen“ (Abbildung 3-5) unterteilt werden, die dann über die Methodik des AHP miteinander verglichen werden können. So bedarf

es keiner mathematischen Aufwertung bestimmter Einzelergebnisse durch die Berücksichtigung der Aversion, sondern die Bewertung kann über die

direkte Betrachtung spezieller Flächenanteile durchgeführt werden.

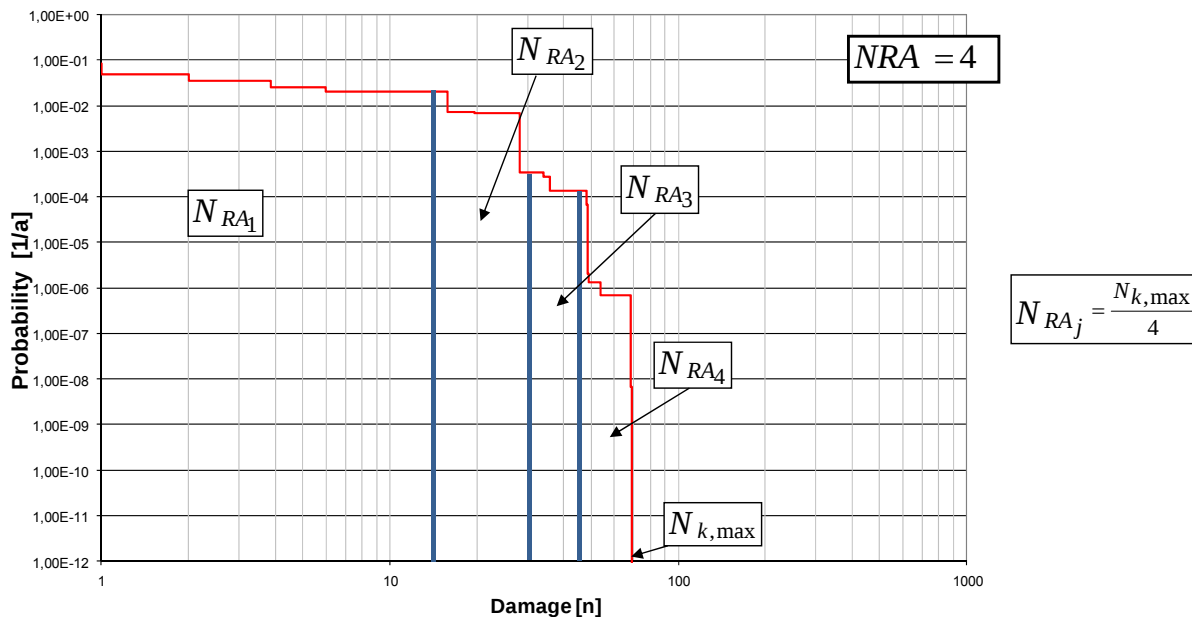


Abbildung 3-5: Aufteilung der Häufigkeitssummenlinien in Risikoflächen

Die AHP-spezifische Wichtung ergibt sich dann aus dem jeweiligen Anteil der Fläche am Gesamtergebnis des akkumulierten Risikos und der scharfe quantitative Wert, der beim Alternativenvergleich verwendet wird, aus dem effektiven Risiko der jeweiligen Risikofläche.

Durch die Umsetzung in der AHP-Umgebung und die Automatisierung der Einteilung in Risikoflächen, bietet sich die Möglichkeit, zum Einen über die Sensitivitätsanalyse den Einfluss spezifischer Risikoflächen am Gesamtergebnis abzubilden, und zum Anderen durch eine Änderung der Priorisierung der Risikoflächen quasi eine Anhebung des Gewichts einzelner Flächen und damit einzelner Ereignisse zu realisieren. Für die ganzheitliche Bewertung beider Varianten wurde im Weiteren auf der sicheren Seite liegend auf eine Betrachtung der einzelnen Risikoflächen verzichtet und nur das akkumulierte Risiko betrachtet.

3.3.3 Umsetzung der Gesamtstruktur

Für die Umsetzung der Gesamtstruktur der Entscheidungssituation wurde eine Softwarelösung

entwickelt, welche die Möglichkeit zu einer adaptierten Anwendung der vorgestellten AHP-Methodik auf die ganzheitliche Bewertung unterirdischer Infrastruktur bietet. Hierin wurde neben der Möglichkeit zur unscharfen Bewertung einzelner Größen, das Programm „f/n-DEMUS2“ als Subroutine integriert und ebenfalls die Schnittstelle zum vorgestellten LZK-Bewertungstool hergestellt. Innerhalb einer Oberfläche können nun so LZK-Berechnungen, vergleichende Bewertungen von verschiedenen Ausstattungsvarianten hinsichtlich der Kriterien LZK ,Risiko und strukturelle Integrität des Bauwerk durchgeführt werden. Dabei obliegt es dem Anwender, ob er für die Bewertung auf die scharfen Größen aus LZK-Tool und Risikoanalyse zurückgreifen will oder sie rein qualitativ durchführt. Für die beispielhafte Berechnung wurden im Einzelnen die folgenden Haupt- und Subkriterien implementiert

Tabelle 3-5: Gesamtdatenstruktur in SOLIT²

Hauptkriterium	Subkriterium	Datenstruktur
Lebenszykluskosten	- Initialkosten - Folgekosten	Quantitativ
Nutzersicherheit	- Risikoerwartungswert Fläche FN1 - Risikoerwartungswert Fläche FN2 - Risikoerwartungswert Fläche FN3 - Risikoerwartungswert Fläche FN4	Quantitativ
Bauwerksverfügbarkeit	- Instandsetzungsdauer - Instandsetzungskosten	Qualitativ (quantitativ möglich)

Die aus der Risikoanalyse für den kompensierten Fall ergebenden Kurven (siehe auch Anhang 4) wurden in das entwickelte Tool eingelesen. Nachfolgende Abbildung 3-6 zeigt einen Screenshot bei dem die bereits aus Anhang 4 bekannten Risikokurven für die kompensierte Lösung und die Basis-

lösung am Modelltunnel erkennbar sind. Unterschiede in der grafischen Darstellung zu Anhang 4 ergeben sich aus der nicht logarithmierten Darstellung der Abszisse.

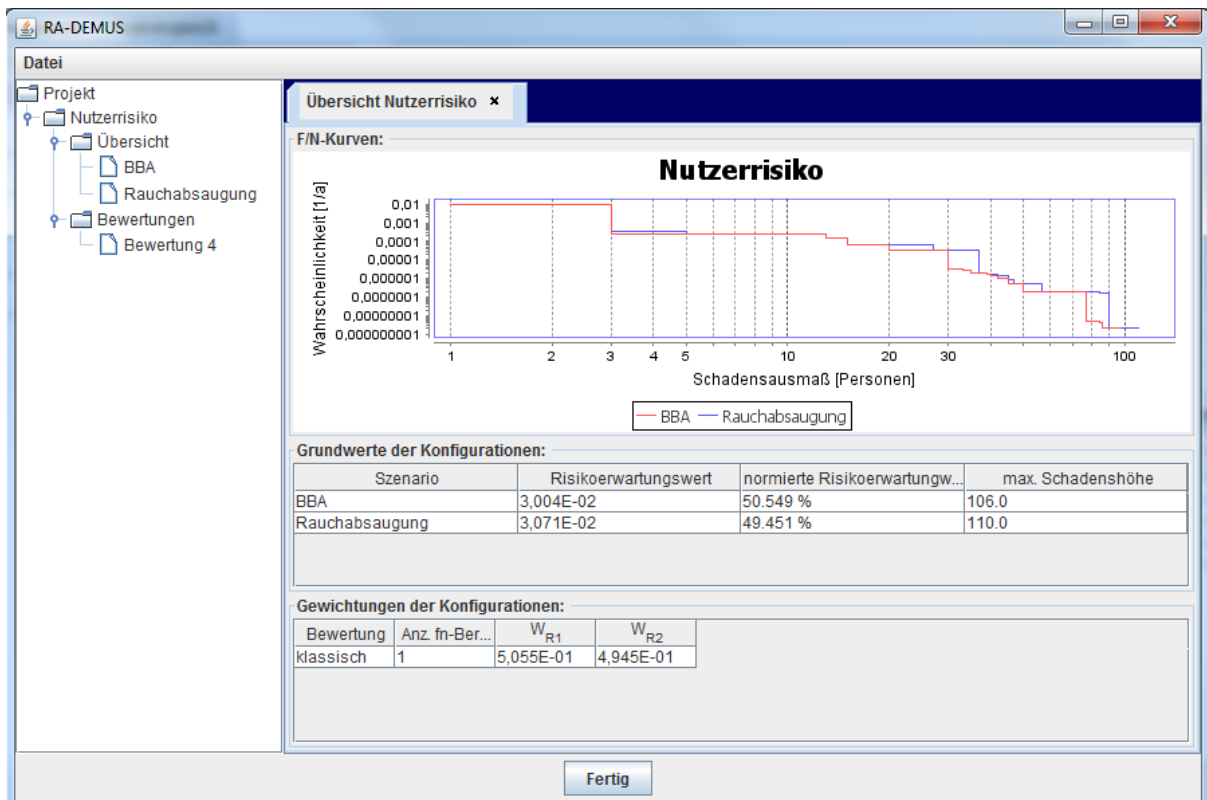


Abbildung 3-6: Screenshot der in f/n-DEMUS² eingelesenen Risikokurven

3.3.4 Beispielrechnung

Für die im Folgenden dargestellte Beispielrechnung werden die drei Hauptkriterien paritätisch priorisiert, sodass jedes Hauptkriterium einen Wert

von 0,33 als Gewicht zugewiesen bekommt (Abbildung 3-7). Dies ist hier eine Default-Annahme um keines der Schutzziele gegenüber den anderen ab- bzw. aufzuwerten.

DEMUS² - Decision Management for Underground Infrastructure					
Datei Ergebnisauswertung Hilfe					
Kriterien	Alternativen				
	Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Gewichtung	Sensitivitätsanalyse
☐	LZK			0.33	☐
☐		Initialkosten		0.5	☐
☐		Folgekosten		0.5	☐
☐	Nutzerrisiko			0.33	☐
☐		FN1		0.99	☐
☐		FN2		0.01	☐
☐		FN3		0.0	☐
☐		FN4		0.0	☐
☐	Bauwerksverfügbarkeit			0.33	☐
☐		Instandsetzungsdauer		0.5	☐
☐		Instandsetzungskosten		0.5	☐

Abbildung 3-7: Priorisierung der Hauptkriterien

Auf der sicheren Seite liegend, werden alle Kriterien und Subkriterien bei der Bauwerkssicherheit und den Lebenszykluskosten ebenfalls paritätisch bewertet. Dies ist zu diskutieren:

Reell ist davon auszugehen, dass eine frühzeitig zugeschaltete BBA im Vergleich zur reinen Rauchabsaugung auch bei der Bewertung der Bauwerkssicherheit Vorteile bringt: Die in den Brandversuchen beobachtete Reduktion der Maximaltemperaturen liefert erhebliche Vorteile bei Schadensreduzierung. Es ist davon auszugehen, dass bei einer Heißbemessung des betrachteten Modellquerschnitts sowohl im Hinblick auf die Instandsetzungskosten wie auch die Instandset-

zungsdauer eine erhebliche Verbesserung durch die frühzeitige Zuschaltung einer funktionierenden BBA im Brandfall zu beobachten ist. Da dieser Vorteil im Rahmen des Forschungsprojektes nicht näher quantifiziert werden konnte, wird an dieser Stelle ingenieurmäßig auf der sicheren Seite liegend von einer identischen Performance beider konkurrierender Systeme im Hinblick auf die Bauwerkssicherheit im Brandfall ausgegangen. Hier sind jedoch Potentiale für eine Änderung des Gesamtergebnisses gegeben.

Unter den geschilderten Randbedingungen ergibt sich eine Verteilung 53% zu 47% pro der kompensierten Lösung (Abbildung 3-8).

Alternative	Gewichtung
BBA	0.527
Rauchabsaugung	0.473

Abbildung 3-8: Ergebnis der vergleichenden Bewertung

3.3.5 Ergebnisdiskussion und Bewertung

Durch die Möglichkeit zur Sensitivitätsanalyse, welche die AHP-Methodik bietet, kann in der Folge

eine Analyse des Einfluss der drei Hauptkriterien erfolgen. Dies sei exemplarisch am Beispiel der Lebenszykluskosten dargestellt. (Abbildung 3-9)

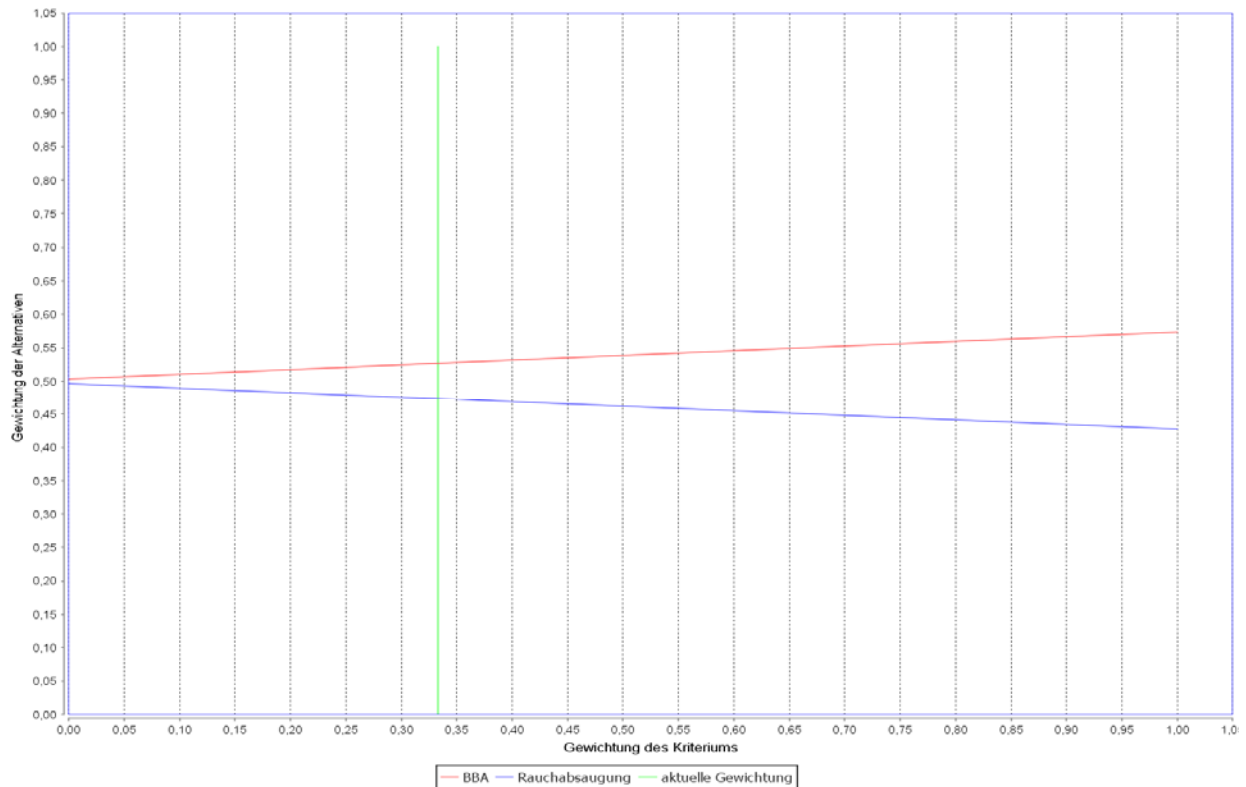


Abbildung 3-9: Sensitivitätsanalyse des Hauptkriteriums „Nutzersicherheit“

Die senkrechte grüne Linie symbolisiert die Priorisierung des Kriteriums „LZK“ bei der vorliegenden Berechnung. Würde die Linie nach rechts verschoben, also die Bedeutung des Kriteriums im Vergleich zu den beiden anderen Hauptkriterien

erhöht, so würde das Ergebnis umso deutlicher pro BBA ausfallen.

Interessant ist auch der Blick auf das Subkriterium „Folgekosten“:

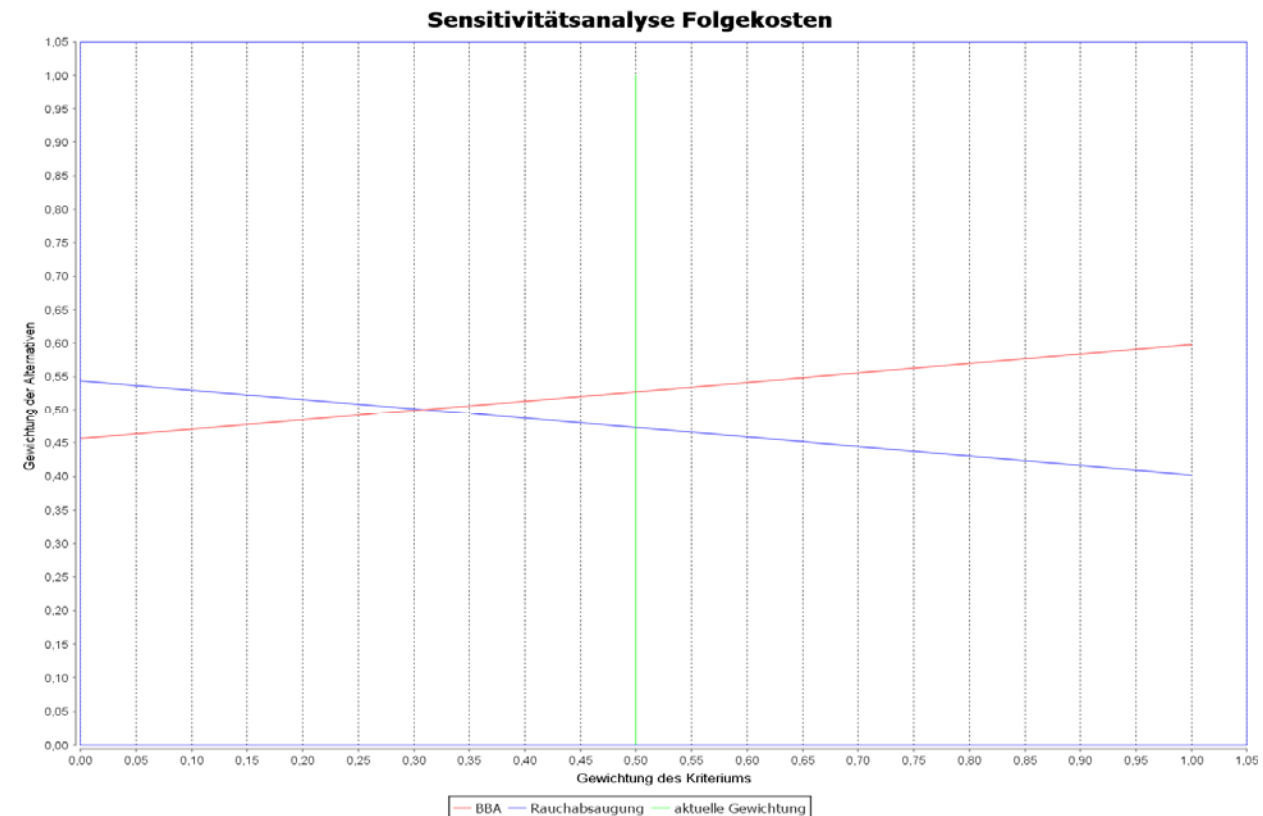


Abbildung 3-10: Sensitivitätsanalyse des Subkriteriums „Folgekosten“

Die LZK-Analyse hat gezeigt, dass der große Vorteil der BBA in den Folgekosten für den Betrieb zu finden ist, da hier vergleichsweise deutlich weniger Kosten verursacht werden als für den aufwendigen Unterhalt von Axialventilation, Lüfterklappen und Zwischendecke. Bei Durchführung der Berechnung ist die Priorisierung zu 50% im Verhältnis zum initialen Invest gesetzt. Verschiebt man die grüne Linie nach links, gleichbedeutend mit einer Reduzierung der Bedeutung der Folgekosten, so findet bei einer rund 30%igen Wichtung der Folgekosten (entspricht 70% Anteil des initialen Invests am Gesamtergebnis) ein Rangwechsel der Alternativen statt. In anderen Worten: Eine Nichtberücksichtigung der Folgekosten würde fälschlicher Weise zu einer besseren Bewertung der Basislösung führen

4. Literatur

- Vollmann, G.; Thewes, M.; Heimbecher, F.: „Ganzheitlicher Ansatz zur Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln: Methoden und Beispiele für Bauwerks- und Nutzersicherheit“, Tagungsband STUVA-Tagung 2011-Berlin; S. 106-110
- Vollmann, G.; Thewes, M.; Kamarianakis, S.: Evaluation and interpretation of n/n-curves: Development of a new tool for traceable and transparent decision making. Proceedings of

the 6th International Conference “Tunnel safety and ventilation, 23rd-25th April 2012, Graz, Austria, P. 49 - 57.

Thewes, M.; Vogt, P.: Die Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken – Ausgangsbasis zur Bewertung der Vorteilhaftigkeit von Bauplanungs- und Betriebskonzepten. In: Tagungsband zum 2. Forschungssymposium der Baubetriebs- und Immobilienwissenschaften, München, 2010, S. 317-337

Thewes, M.; Vogt, P.: The Life-Cycle Philosophy of Underground Traffic Infrastructure – Approaches for a Sustainable Accounting and the Visualization of Costs. In: Proceedings of International Conference and Exhibition on Tunnelling and Trenchless Technology, Kuala Lumpur, 2011, S. 129-138

Vogt, P.; Thewes, M.: The calculation of life-cycle costs for road tunnels under the influence of uncertainties. Proceedings of the third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2012), Vienna, 3-6 October 2012, Life-cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems, Taylor & Francis Group, pp. 1036-1043 (reviewed conference paper)

Thewes, M.; Vogt, P.: The life-cycle cost analysis for road tunnels taking uncertainties into account. Proceedings of the First Eastern European Tunnelling Conference "The tunnel connects", 18.-21. September 2012, Budapest

- Thewes, M.; Kamarianakis, S.: Multi-criteria decision making of construction methods using the Analytical Hierarchy Process based on fuzzy scales. Proceedings of the 13th World Conference of the Associated research Centers for the Urban Underground Space (ACUUS), Singapore, 7-9 November 2012, Advances in Underground Space Development, Research Publishing, Singapore, p. 279.
- PIARC – Committee Road Tunnel Operation: Good practice for the operation and maintenance of road tunnels. La Défense cedex: World Road Association, 2005
- PIARC – Technical Committee C3.3 Road Tunnel Operation: Urban Road Tunnels recommendations to managers and operating bodies for design, management, operation and maintenance. La Défense cedex: World Road Association, 2008
- PIARC – Technical Committee C.4 Road Tunnel Operations: Life cycle aspects of electrical road tunnel equipment. La Défense cedex: World Road Association, 2012
- Ritter, E.: „Methode und Instrumente räumlicher Planung“; Akademie für Raumforschung und Landesplanung; Verlag: ARL, Hannover, 1998
- Saaty, T. L.: The Analytic Hierarchy Process, New York, 1980
- Saaty, T. L.: Axiomatic Foundation of the Analytical Hierarchy Process. In: Management Science 32 (1986), S.841-855, 1986]
- Saaty, T. L.: Decision Making for Leaders, 3. Aufl., Pittsburgh, 2001.