

Empfehlungen für die Ermittlung von Lebenszykluskosten für Straßentunnel



Herausgeber:

Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (DAUB)

German Tunnelling Committee (ITA-AITES)

Mathias-Brüggen-Str. 41, 50827 Köln

Tel. +49 - 221 - 5 97 95-0

Fax +49 - 221 - 5 97 95-50

E-Mail: info@daub-ita.de

www.daub-ita.de

Erarbeitet von der DAUB Arbeitsgruppe Lebenszykluskosten:

Hans Adden

Stephan Engelhardt

Wolf-Dieter Friebel

Anne Lehan

Jürgen Schwarz

Ludger Speier

Markus Thewes

Peter Vogt

November 2018

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Motivation	1
1.2	Adressatenkreis	1
1.3	Struktur der Empfehlung	2
2	Lebenszyklus von Tunnelbauwerken	3
2.1	Lebenszyklusphasen eines Tunnelbauwerks	3
2.2	Lebenszyklusphasen der Tunnelausstattung	4
2.3	Lebenszyklusansatz und Lebenszykluskosten	5
3	Nutzungsdauern	8
3.1	Einflussfaktoren	8
3.2	Begriffsdefinitionen	9
3.3	Nutzungsdauer	10
3.3.1	Technische Einflussfaktoren auf die Nutzungsdauer	10
3.3.2	Wirtschaftliche Einflussfaktoren auf die Nutzungsdauer	11
3.3.3	Sozio-ökonomische Einflussfaktoren auf die Nutzungsdauer	11
3.4	Gegenüberstellung von Nutzungsdauern aus der Literatur	12
3.5	Erhaltungs- und Instandhaltungsstrategien	14
4	Kapitalwertverfahren	17
4.1	Grundaussagen und -annahmen	17
4.2	Analytisches Standardmodell	17
4.3	Entscheidungsrelevante Parameter	18
4.4	Erweiterungen des Standardmodells	19
4.5	Beurteilung der Kapitalwertmethode	20
5	Berechnung der Lebenszykluskosten	21
5.1	Schritt I – Ausgangslage	22
5.2	Schritt II – Strukturierung des Bauwerks	22
5.3	Schritt III – Modulbildung	23
5.4	Schritt IV – Verfahren der Kostenermittlung	25
5.5	Schritt V – Überführung in eine Kostenmatrix	27
5.6	Schritt VI – Lebenszykluskosten-Berechnung: Kapitalwertmethode	28
5.7	Schritt VII – Variantenvergleich und Interpretation	29
6	Auswertungen und Analysen	31
6.1	Sensitivitätsanalyse	31
6.2	Pareto Prinzip	32

6.3	Erstellung einer ABC Kategorisierung	33
6.4	Risikoanalyse zur Berücksichtigung von Unsicherheiten	34
6.5	Benchmarking	35
7	Anwendungsbeispiel für einen Mustertunnel.....	36
7.1	Einleitung und Projektbeschreibung Mustertunnel	36
7.2	Vorgehen	36
7.3	Schritt I: Untersuchungsrahmen.....	36
7.4	Schritt II: Strukturierung und Schritt III: Modulbildung	37
7.5	Schritt IV: Kostenermittlung	37
7.5.1	Initialkosten	37
7.5.2	Folgekosten.....	38
7.5.3	Modulblätter	39
7.6	Schritt V: Überführung in eine Kostenmatrix	40
7.7	Schritt VI: LZK-Berechnung mit Anwendung des Kapitalwertverfahrens	40
7.8	Schritt VII: Interpretation	40
8	Zusammenfassung und Fazit.....	43
9	Literaturverzeichnis	44

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Motivation

Die Entwicklung, die Herstellung und das Betreiben von Bauwerken mit dem Ziel der Nachhaltigkeit ist ein allgemeiner Konsens in der Gesellschaft. Nachhaltige Bauwerke sind vorteilhaft in Ökonomie, in Ökologie und in ihrer sozialen Funktion. Trotz dieser allgemein anerkannten Zielsetzung werden Ingenieurbauwerke vorwiegend mit einer Minimierung der Herstellkosten geplant, die Ziele der Nachhaltigkeit spielen keine oder nur eine untergeordnete Rolle. Ein Grund ist, dass es gegenwärtig für die Nachhaltigkeitsbewertung nur Verfahren für den Hochbau gibt, aber nur erste Ansätze für Ingenieurbauwerke.

Eine wesentliche Säule der Nachhaltigkeit ist die Einschätzung von Lebenszykluskosten, bei denen nicht nur die Herstellungskosten, sondern auch die Kosten für Betrieb, Instandhaltung und Instandsetzung erfasst werden. Hierzu gibt es neue Forschungsarbeiten, in denen für den speziellen Anwendungsfall der Tunnelbauwerke Verfahren zur Prognose der Lebenszykluskosten weiterentwickelt wurden.

Die vorliegende Empfehlung des Deutschen Ausschusses für unterirdisches Bauen (DAUB) greift diese Forschungsarbeiten auf. Ziel ist es, den Stand der Forschung aufzubereiten und praxisnahe Werkzeuge, Daten und Quellen zur Verfügung zu stellen, damit die Berechnung der Lebenszykluskosten zum allgemein anerkannten Stand der Technik wird.

Sämtliche Kosten von Tunnelbauwerken im Lebenszyklus fließen in die Berechnung ein. Das sind die Herstellungskosten des Bauwerkes und der Ausstattungen des Tunnels. Bei den Folgekosten über die Lebensdauer (Instandhaltung und Instandsetzung sowie Betriebskosten) ist ein wesentlicher Parameter die Nutzungsdauer jeder Komponente. Für das eigentliche Tunnelbauwerk wird eine Nutzungsdauer von 100 oder mehr Jahren angestrebt. Für die Ausrüstung sind die Nutzungszeiten wesentlich kürzer und erfordern somit einen (mehrfachen) Austausch während der Lebensdauer des Gesamtbauwerks.

Alle erwähnten Arten von Kosten werden in einem Gesamtmodell zur Berechnung der Lebenszykluskosten zusammengefasst. Damit kann die vorteilhafteste Lösung für das gesamte Bauwerk ermittelt werden. Es können in Variantenuntersuchungen auch einzelne Teile und Bauteile verglichen und bewertet werden.

In der vorliegenden Empfehlung wird die Methodik zur Berechnung der Lebenszykluskosten für Straßentunnel vorgestellt. Eine Erweiterung auf Bahntunnel ist für eine Folgeempfehlung vorgesehen. Die Methodik ist auch allgemein für Infrastrukturbauwerke anwendbar. Für eine verbesserte Prognose von Nutzungsdauern, insbesondere von Ausstattungskomponenten, sowie für eine Erweiterung auf eine umfassende Nachhaltigkeitsbewertung besteht noch weiterer Forschungsbedarf.

1.2 Adressatenkreis

Die Empfehlung stellt eine Entscheidungshilfe für Bauherrn und Betreiber von Straßentunneln sowie anderen Infrastrukturobjekten bereit, die ökonomisch vorteilhafteste Variante für Bau, für Betrieb und für Modernisierungen zu finden. Das betrifft in den meisten Fällen die öffentliche Hand und deren Planer. Die Empfehlung kann aber auch für die Entscheidungen für ÖPP-Tunnelprojekte objektivieren, denn hier ist eine verbesserte Einschätzung der Le-

Lebenszykluskosten neben einer möglichst genauen Prognose der Nutzungszahlen bei Mautsystemen von hoher wirtschaftlicher Bedeutung. Auch können damit bei Bieterverfahren im Wettbewerb Nebenangebote beurteilt werden. Schließlich können Anbieter von Ausrüstungen die Vorteilhaftigkeit von Innovationen prüfen und nachweisen.

1.3 Struktur der Empfehlung

In der Empfehlung werden in den ersten vier Kapiteln alle notwendigen Grundlagen für eine Lebenszykluskostenberechnung erläutert, für eine Vertiefung wird die geeignete Literatur angegeben. Die generelle Methodik ist in Kapitel 5 in sieben Schritten erklärt:

Schritt I – Ausgangslage

Schritt II – Strukturierung des Bauwerks

Schritt III – Modulbildung

Schritt IV – Verfahren der Kostenermittlung

Schritt V – Überführung in eine Kostenmatrix

Schritt VI – Lebenszykluskosten-Berechnung: Kapitalwertmethode

Schritt VII – Variantenvergleich und Interpretation

Für die Ergebnisinterpretation werden in Kapitel 6 Hinweise gegeben. Kapitel 7 enthält ein Berechnungsbeispiel zur Erleichterung der Einführung der hier vorgestellten Methoden bei zukünftigen Projekten.

Mit den Erläuterungen und Arbeitshilfen ist es möglich, eine wissenschaftlich und praxisnah begründete Berechnung der Lebenszykluskosten eines Straßentunnels durchzuführen. Mit der ingenieurmäßigen Interpretation der Ergebnisse erhält der Anwender dann Prognosen und Vergleichswerte zur Entscheidungsfindung bei der Wahl der vorteilhaftesten Variante der Bauaufgabe.

2 Lebenszyklus von Tunnelbauwerken

Die Analyse des Lebenszyklus von Tunnelbauwerken erfordert eine Betrachtung in Phasen. Ausgehend von einer mittleren Gesamtlebensdauer eines Tunnels von 90 bis 130 Jahren¹ besteht der Lebenszyklus eines Bauwerkes nach ISO/FDIS 15686-5² aus allen Phasen, die die bauliche Errichtung, den Betrieb und die Instandhaltung bis zum Ende der Gebrauchstauglichkeit umfassen. Hierfür werden übergeordnet die Phasen Planung, Herstellung, Nutzung und Verwertung unterschieden. Diesen Phasen sind wiederum Prozesse zuzuordnen, die konkrete Tätigkeiten abbilden. Die nachfolgend vorgestellten Prozesseinteilungen sind nicht abschließend und beispielhaft zu verstehen. Eine Anlehnung an die in der Praxis zu erfassenden Kostenstellen oder auch andere organisatorische Strukturen können die Anwendung praktikabler gestalten.

Um eine hinreichend genaue Analyse zu ermöglichen, empfiehlt sich eine differenzierte Betrachtung zwischen Tunneltragwerk (Abschnitt 2.1) und der erforderlichen Tunnelausstattung (Abschnitt 2.2).

2.1 Lebenszyklusphasen eines Tunnelbauwerks

Gemäß ASB-ING und RI-WI-BRÜ lassen sich die Phasen für das konstruktiv geprägte Tunnelbauwerk in die Phasen Bau, Erhaltung, Ertüchtigung und Verwertung einteilen. Grundsätzlich sind für eine genaue Kostenermittlung auch die Planungsleistungen hinzuzuziehen. Abbildung 1 stellt eine detaillierte Aufteilung in Anlehnung an die für Infrastrukturbauwerke geltenden Richtlinien dar. Eine Einteilung in die verschiedenen Phasen ermöglicht die bessere Zuordnung der Kosten, die sich in Initial- und Folgekosten aufgliedern. Die Initialkosten umfassen dabei den Aufwand für die Planung und Realisierung des Rohbaus sowie der Ausstattung. Die Folgekosten resultieren maßgeblich aus den in Abbildung 1 genannten Prozessen im Rahmen der Erhaltung, Ertüchtigung und Verwertung.



Abbildung 1: Lebenszyklusphasen des Tunnelbauwerks³

Die Planungsphase umfasst alle Leistungen, die für die Herstellung der ausführungsfähigen Bauwerksplanung benötigt werden. Die Phase der Herstellung beinhaltet alle Aufwände, die zur Herstellung des Tunnelbauwerks anfallen. Die längste und damit prägendste Phase

¹ Vgl. ABBV (2010), S. 865.

² Vgl. ISO (2008).

³ Darstellung der relevanten Prozesse für Tunnelbauwerke in Anlehnung an die ASB-ING (2013).

stellt die Erhaltung dar und umfasst alle baulichen und betrieblichen Aufwendungen, die während der Nutzung entstehen. Darin eingeschlossen sind die Instandsetzung und die Bauwerksunterhaltung, letztere lässt sich in die bauliche und betriebliche Unterhaltung unterteilen. Während dieses, über mehrere Jahrzehnte dauernden Zeitraumes, müssen Erüchtigungen (Modernisierungen), ggf. aufgrund sich ändernder Rahmenbedingungen, vorgenommen werden. Sollte das Bauwerk nicht mehr seine Funktion erfüllen, so steht der Rückbau bzw. die Verwertung als letzter Schritt im Lebenszyklus an. Hierunter sind solche Aufwände zu verstehen, die beim Rückbau oder dem eher unwahrscheinlichen Fall einer Umnutzung entstehen.

2.2 Lebenszyklusphasen der Tunnelausstattung

Damit ein kontinuierlicher und sicherer Tunnelbetrieb möglich ist, weisen das Bauwerk und die Tunnelausstattung vergleichbare Lebenszyklusphasen auf. Jedoch besitzt die Tunnelausstattung grundsätzlich kürzere Nutzungsdauern, sodass eine mehrfache Erneuerung während des Gesamtlebenszyklus des Bauwerks zu berücksichtigen ist. Des Weiteren ist aufgrund des hohen technischen Umfangs bzw. der hohen sicherheitstechnischen Erfordernisse der Tunnelausstattung der betriebstechnische und somit auch kostentechnische Umfang detaillierter zu betrachten. Abbildung 2 veranschaulicht die entsprechenden Phasen und die zugeordneten Prozesse.



Abbildung 2: Lebenszyklusphasen der Tunnelausstattung⁴

Wie beim Tunnelbauwerk, muss auch hier die Planungsphase vorangestellt werden, gefolgt von der baulichen Umsetzung der Ausstattung des Tunnels. Bei der Überführung in den Tunnelbetrieb empfiehlt sich eine Phasenbetrachtung in Anlehnung an die DIN 31051⁵ und die RABT⁶, erweitert um den Betrieb, der alle Aktivitäten umfasst, die mit der Nutzung – dem laufenden Tunnelbetrieb – einhergehen. Die Instandhaltung stellt die für die Tunnelausstattung maßgebliche Phase dar und umfasst Wartung und Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung. Es empfiehlt sich, eine Erweiterung im Block „Verbesserung“ um den Prozess der „Erneuerung“ vorzunehmen (siehe Abbildung 2). Die zumeist zyklisch anfallende Erneuerung deckt den kompletten Austausch nach vorgegebener oder entsprechender Nutzungsdauer ab und wird regelmäßig im Zuge der LZK-Betrachtung erfasst. Die Betriebsphase beinhaltet die Tunnelüberwachung, die energetische Versorgung (Strom, Wasser), aber auch die regelmäßig durchzuführenden Großübungen durch die Einsatzdienste, um die Gefahrenabwehr und Ereignisbewältigung zu trainieren.

⁴ Darstellung der relevanten Phasen und Prozesse für die Tunnelausstattung in Anlehnung an die DIN 31051 (2012) und RABT (2006).

⁵ Vgl. DIN 31051 (2012).

⁶ Vgl. RABT (2006).

Eine Verwertungs- oder Umnutzungsphase analog zum Bauwerk ist nicht zwingend vorzusehen, da üblicherweise nach Ablauf der Nutzungsdauer eine Erneuerung der Ausstattung vorgenommen wird und eine Verwertung nicht sinnvoll ist (vgl. Kap. 3).

2.3 Lebenszyklusansatz und Lebenszykluskosten

Wie aus Abbildung 3 ersichtlich wird, markieren zwei mögliche Fälle den Einstieg in die lebenszyklusorientierte Sichtweise für Tunnelbauwerke: Während der erste Fall mit dem Beginn der Planungen für einen Tunnelneubau startet, bezieht sich der zweite Fall auf ein in Betrieb befindliches Tunnelbauwerk.

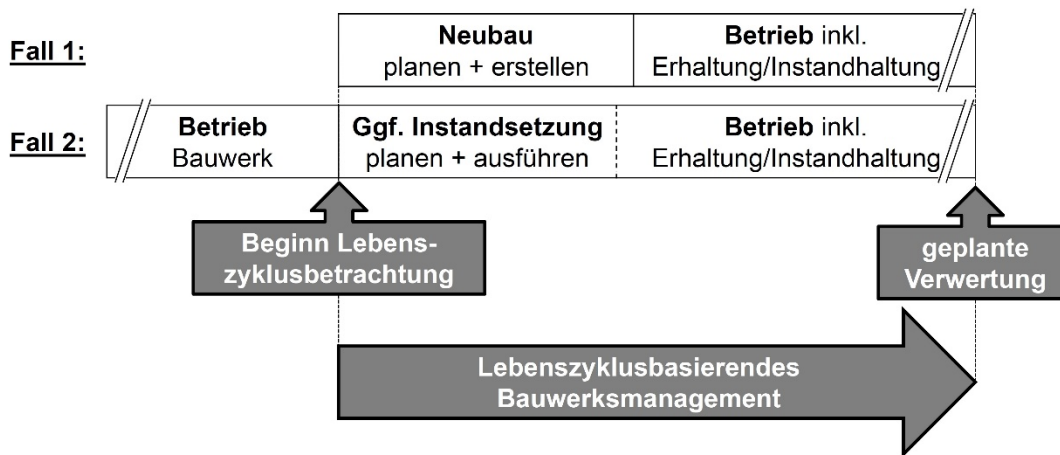


Abbildung 3: Fallbezogener Einstieg in die Lebenszykluskostenbetrachtung⁷

Die beiden Fälle stellen sicher, dass sowohl Tunnelneubauten als auch die im Straßennetz vorhandenen Tunnel in das Konzept einbezogen werden. Ist der Neubau (Fall 1) fertiggestellt oder sind die ggf. erforderlichen Instandsetzungsarbeiten an einem Bestandsbauwerk (Fall 2) abgeschlossen, wird in beiden Fällen der anschließende Tunnelbetrieb durch Erhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen dominiert.

Das Leitkriterium zur Beurteilung des Lebenszyklus sind die Kosten. Die zu bevorzugende Planungsvariante ist – je nach Sichtweise und Zielstellung – diejenige mit der geringsten Summe aus Initial- und Folgekosten, im Folgenden als Lebenszykluskosten bezeichnet. Für das Investitionsgeschehen ist charakteristisch, dass während der Herstellungsphase (vgl. Abb. 1) hohe Auszahlungen erfolgen und in der Erhaltungs- bzw. Instandhaltungs-/Betriebsphase (vgl. Abb. 3) wechselnde Aus- und ggf. auch Einzahlungen zu verzeichnen sind. Die in einer Lebenszykluskostenanalyse zu berücksichtigenden Zahlungen weisen bezüglich ihrer Höhe Schwankungen auf und sind nicht notwendigerweise periodisch wiederkehrend. Es sei angemerkt, dass Einzahlungen in der Regel nur bei Konzessionsprojekten zu berücksichtigen sind und im Rahmen dieser Empfehlung nicht weiter betrachtet werden (vgl. betriebswirtschaftliche Erläuterungen im Kapitel 4).

Jede einzelne Planungsvariante zeichnet sich dadurch aus, dass sie mit anderen Varianten konkurriert. Diese Forderung ist aber nur dann erfüllt, wenn alle Varianten dasselbe Niveau in Bezug auf die übergeordnete Bauwerksfunktion besitzen. Der Fokus einer Lebenszyk-

⁷ Vgl. THEWES, VOGT (2014).

luskostenanalyse ist darauf ausgerichtet, unter verschiedenen technischen Planungsvarianten diejenige mit der größten Vorteilhaftigkeit zu ermitteln. Hierzu werden die zuvor eingeführten Lebenszyklusphasen zu einer Betrachtungseinheit verknüpft sowie die notwendigen Voraussetzungen geschaffen, im Zuge von Variantenstudien Folge- durch Initialkosten bzw. Initial- durch Folgekosten zu substituieren⁸.

Aus den beschriebenen Rahmenbedingungen lässt sich folgern, dass neben der technischen Durchbildung eines Tunnelbauwerks weiteres Expertenwissen zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit benötigt wird. Beide Prozesse – gemeint sind die technische und die monetäre Planung – müssen parallel erfolgen und als Ergebnis einer Bewertung von Alternativen das ökonomische Optimum hervorbringen. Voraussetzung zur Erreichung dieser Zielstellung ist es, den Untersuchungszeitraum des Bauwerks in einem Gesamtmodell abzubilden. Das schrittweise Vorgehen und die verfolgte Zielstellung fasst Abbildung 4 zusammen.

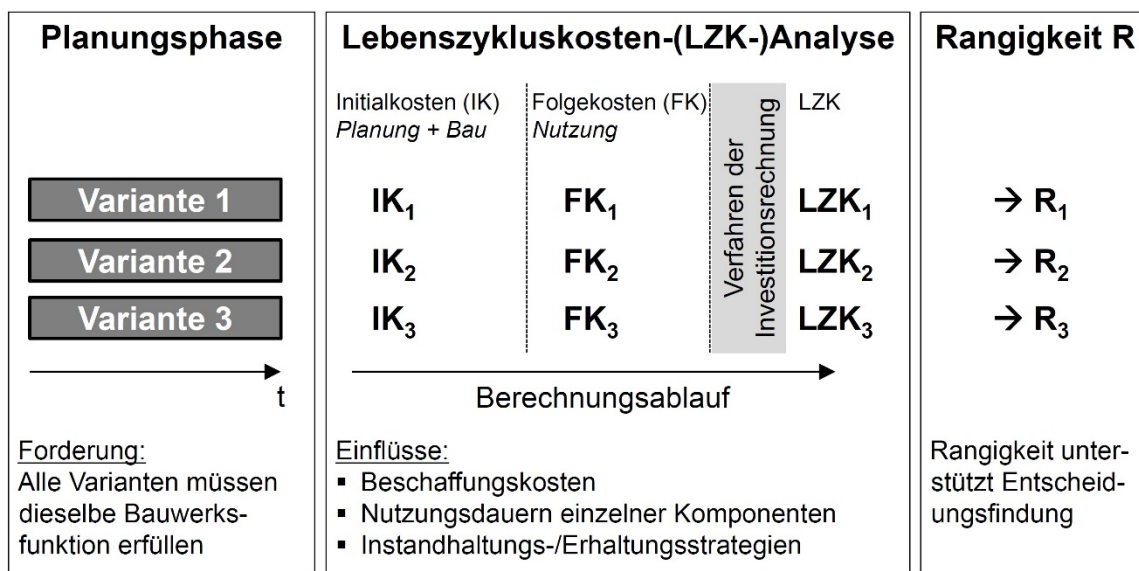


Abbildung 4: Allgemeines Vorgehen und Ziel einer Lebenszykluskostenanalyse

Die Vorgehensweise bei der Analyse und Interpretation der Lebenszykluskosten von Straßentunneln muss somit die folgenden Merkmale sicherstellen:

- Unterstützung bei der Auswahl der erforderlichen Bauteile und Komponenten (sog. „Module“, vgl. Kapitel 5), sowie Vorgabe rechnerischer (angenommener) Nutzungsdauern und sinnvoller Instandhaltungszyklen (vgl. Kapitel 3),
- Systematik für die statistische Interpretation von bereits erfassten bzw. zukünftig zu dokumentierenden Bauteilausfällen; dabei muss ein Rückschluss auf die Nutzungsdauer von Bauteilen und Komponenten (Module) möglich sein,
- Zeitabhängige Zuordnung der resultierenden Kosten nach Höhe, Art und Entstehungszeitpunkt,
- Festlegung der Parameter, die für die Anwendung der Investitionsrechnungsverfahren benötigt werden (vgl. Kapitel 4),
- Bewertung von Unsicherheiten bzw. Risiken (vgl. Kapitel 6).

⁸ Vgl. VOGT (2013).

Vor dem Hintergrund, dass eine Lebenszykluskostenanalyse gewöhnlich mehrere Jahrzehnte umfasst, wird zur Berechnung ein dynamisches Verfahren der Investitionsrechnung – die Kapitalwertmethode – gewählt. Nähere Erläuterungen zur Kapitalwertmethode sind in Kapitel 4 zu finden.

3 Nutzungsdauern

3.1 Einflussfaktoren

Wie in Kapitel 2.3 ausgeführt, setzen sich die Lebenszykluskosten aus den Initial- und Folgekosten für sämtliche Bauteile, aus denen ein Tunnel besteht, zusammen. Die Prognose der Folgekosten ist eng mit der Einschätzung zutreffender Nutzungsdauern für jedes Bauteil verknüpft.

Es sei an dieser Stelle darauf verwiesen, dass das gewählte Berechnungsverfahren – die Kapitalwertmethode – ebenfalls Annahmen beinhaltet, die in die Interpretation des Gesamtergebnisses einzubeziehen sind. Eine entsprechende Diskussion ist in Kapitel 4 zu finden.

Bei der Planung von Tunnelbauwerken und der Betrachtung der Lebenszykluskosten als Entscheidungskriterium werden bisher insbesondere bei der betriebs- und sicherheitstechnischen Ausstattung (Beleuchtung, Lüftung, Sicherheitseinrichtungen, zentrale Anlagen, etc.) Durchschnittswerte angesetzt und von einer theoretischen Nutzungsdauer ausgegangen.

Grundlage bisheriger Ermittlungen von Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken bildet die Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung (ABBV), die als Erfahrungswert eine theoretische Nutzungsdauer von 20 Jahren für die betriebs- und verkehrstechnische Ausstattung vorgibt.⁹

Bei der Ermittlung der Lebenszykluskosten im Zuge der Variantenauswahl – insbesondere für Neubauten – wird aktuell auf die Angaben der ABBV zurückgegriffen, wie auch bei der Gegenüberstellung von zwei oder mehreren möglichen Ausstattungsvarianten (z.B. Kompensationsmaßnahmen im Zuge von Risikoanalysen). Im Zuge tatsächlicher Mittelplanung für die strategische Erhaltungsplanung von z.B. Eigentümern und Betreibern kann solch ein pauschales Verfahren jedoch nur bedingt angewendet werden. Um die Kosten sowie Instandhaltungszyklen annähernd genau zu bestimmen, empfiehlt sich eine differenzierte Betrachtung einzelner Anlagenkomponenten.

Gemäß den Vorgaben der ABBV ist im Zuge der LZK-Betrachtung eine wiederkehrende Zahlungsgröße alle 20 Jahre anzunehmen. Durch die dynamische Investitionsrechnung sind diese Ausgaben abgezinst und unterscheiden sich daher in Ihrer Höhe vom Betrachtungszeitpunkt t_0 aus (siehe Abbildung 5). Wird nun unterstellt, dass die durchschnittliche Nutzungsdauer sich entgegen der ABBV-Angabe vermindert, so verschieben sich die erforderlichen Zahlungsströme hin zu einem früheren Zeitpunkt, was sich in der Höhe der benötigten Mittel und deren Vorhaltung auswirkt. Durch kürzere Nutzungsdauern erhöht sich die Anzahl der theoretischen Austausch- und Erneuerungszyklen im gesamten Lebenszyklus. Ein zusätzlicher Austausch ist in der Grafik der Abbildung 5 als exemplarisch schraffierter Bereich dargestellt.

⁹ Vgl. ABBV (2010), S. 866.

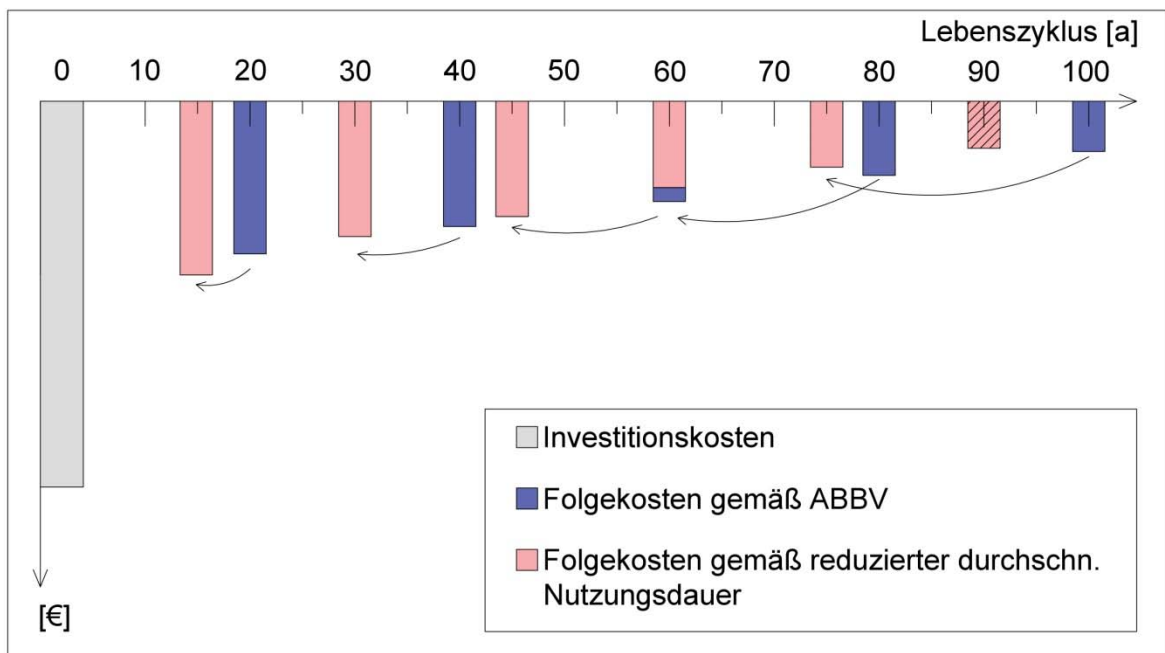


Abbildung 5: Verschiebung von Zahlungsströmen innerhalb des gesamten Lebenszyklus durch verkürzte Nutzungsdauern (exemplarisch)¹⁰

Erst durch eine verbesserte zeitliche Prognose von Kosten und deren Fälligkeit, kann eine strategische Erhaltungsplanung für einzelne Tunnelbauwerke, wie auch für den Gesamtbestand der Tunnelbauwerke abgeleitet werden.

3.2 Begriffsdefinitionen

Unter Nutzungsdauer wird in der Betriebswirtschaft der Zeitraum bezeichnet, in dem eine betriebliche Nutzung eines Anlagenguts unter typischen Eigenschaften möglich ist. Gemäß ABBV beginnt die Nutzungsdauer mit dem Jahr der verkehrsbereiten Fertigstellung der baulichen Anlage. Allerdings wird dort auch explizit darauf hingewiesen, dass es sich bei der Angabe um einen Erfahrungswert für eine mögliche Nutzungsdauer handelt, die unabhängig von der tatsächlichen Nutzungsdauer bei der Ablösungsberechnung anzuwenden ist.¹¹

Auch unter Berücksichtigung der zunehmenden Anzahl von ÖPP-Projekten sowie einem älter werdenden Bauwerksbestand steigt die Relevanz eines wirtschaftlichen und vor allem planbaren Betriebs über einen langen Zeitraum, bei dem insbesondere die technische Ausstattung hohe Betriebs-, Unterhalts- und Erhaltungsaufwendungen aufweist. Die Kenntnis von Instandhaltungsaufwendungen nach Höhe und insbesondere Zeitpunkt hat somit eine besondere Bedeutung für die Mittelplanung und Mittelvorhaltung.

Daher ist es erforderlich, die tatsächliche Nutzungsdauer zu ermitteln. Dies erfordert eine differenziertere Betrachtung der Nutzungsdauern der einzelnen betriebstechnischen Komponenten unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Lebenszyklusaspekte.

¹⁰ Vgl. ADDEN, THEWES, LEHAN (2016), S. 10.

¹¹ Vgl. ABBV (2010), S. 862.

3.3 Nutzungsdauer

Es existieren viele Einflüsse, die die Nutzungsdauer beeinflussen können. Für die betriebs- und sicherheitstechnische Ausstattung von Tunnelbauwerken sind die technischen, die wirtschaftlichen und die sozio-ökonomischen Einflüsse auf die Nutzungsdauer von Relevanz.

3.3.1 Technische Einflussfaktoren auf die Nutzungsdauer

Unter der technischen Nutzungsdauer ist der Zeitraum zu verstehen, in dem das entsprechende Ausstattungsdetail physisch zur Verfügung steht und den geforderten Eigenschaften entspricht. Die DIN 31051 beschreibt diese unvermeidbare Abnutzung als Abbau des Abnutzungsvorrates, hervorgerufen durch chemische und/ oder physikalische Vorgänge.¹² Die betriebs- und sicherheitstechnische Tunnelausstattung hat im Vergleich zum Tunnelbauwerk, welches gemäß der ABBV eine Nutzungsdauer von 90 bis 130 Jahren aufweist, eine kurze theoretische Nutzungsdauer von 20 Jahren. Die Tunnelausstattung muss im Rahmen des gesamten Lebenszyklus des Bauwerkes meist mehrfach ersetzt werden und stellt damit einen wesentlichen Anteil an den Instandhaltungsaufwendungen dar. Die technische Nutzungsdauer ist von vielen Faktoren abhängig. Bei angemessener (und proaktiver) Instandhaltung kann die technische Lebensdauer über die theoretisch nach ABBV angesetzte Nutzungsdauer hinausgehen bzw. von ihr abweichen.

Für den Ansatz der technischen Nutzungsdauer sind zahlreiche Einflüsse zu betrachten, wie z.B.:

- Ausstattungseigenschaften (Materialermüdung, Korrosion),
- Umwelteinflüsse bzw. klimatische Einflüsse (Temperatur/ Wasser/ Chloridbelastung/ Schadstoffeinwirkungen/ Tunnelatmosphäre/ Verkehrseinwirkungen),
- Art und Umfang der Instandhaltung sowie regelmäßige Wartung,
- Planungsfehler/ Einbaufehler (Stand der Technik beachten).

Die wesentlichen Gründe, die zur (vorzeitigen) Erreichung der technischen Nutzungsdauer führen, sind der Verschleiß (Abnutzung), erwarteter und unerwarteter Defekt, (überhöhte oder besonders aufwändige) Reparatur, Ersatzteilproblematik und technische Überholung. Der Aspekt Ersatzteilproblematik rückt zunehmend bei technischen Anlagen in den Vordergrund, da hier aufgrund des schnellen technologischen Fortschritts Ersatzteile für ältere Komponenten nur begrenzt produziert und vorgehalten werden. Dies führt nicht selten dazu, dass ein Ausstattungsgegenstand nicht repariert werden kann und ein Kompletttausch mit allen zusammenhängenden Komponenten erfolgen muss, da die Anlage ohne diese Komponente nicht weiterbetrieben werden kann – weit vor Ablauf der theoretischen technischen Nutzungsdauer.

Für den Ansatz der technischen Nutzungsdauer in der Lebenszykluskostenermittlung der verschiedenen Ausstattungskomponenten empfiehlt sich die Herstellerangabe unter Einbezug von Erfahrungswerten, wie auch die Berücksichtigung der Einflüsse, denen die Ausstattung unterliegt. Eine Empfehlung für differenzierte Ansätze der tatsächlichen Nutzungsdauer der betriebs- und sicherheitstechnischen Ausstattung kann der Tabelle 1 entnommen werden.

¹² Vgl. DIN 31051 (2012), S. 7.

3.3.2 Wirtschaftliche Einflussfaktoren auf die Nutzungsdauer

Die wirtschaftliche Nutzungsdauer gibt an, wie lange es ökonomisch sinnvoll ist, ein Wirtschaftsgut zu nutzen. Dies lässt sich im Bereich von Infrastrukturen schwer vorhersagen, da hier, anders als z.B. im Hochbau, wo die Anforderungen und Änderung der Nutzung sowie Renditeerwartungen einen höheren Stellenwert aufweisen als bei Infrastrukturbauwerken, die Verfügbarkeit ein wesentliches Kriterium darstellt. Die wirtschaftliche Nutzungsdauer ist kürzer als die technische Nutzungsdauer (maximal gleich).

Zur Ermittlung der wirtschaftlichen Nutzungsdauer können folgende Einflüsse für die Tunnelausstattung relevant sein:

- Standort und Systemumgebung bzw. Funktion,
- Verfügbare Mittel,
- Verkehrsentwicklung,
- Schnittstellen, Interdependenzen,
- Synergien und Kosteneinsparungen bei der Bündelung von Maßnahmen.

Typische Gründe für das Ende der wirtschaftlichen Nutzungsdauer sind Technologiewechsel, Kompatibilitätsprobleme sowie technische Zwänge, Anpassungen oder Erweiterungen aufgrund von Kapazitätsengpässen oder die ökonomische bzw. energetische Optimierung.

Während sich die technische Nutzungsdauer auf der Basis von Herstellerangaben und Erfahrungswerten sowie unter Berücksichtigung von Einflussgrößen abschätzen lässt, gestaltet sich dies bei der wirtschaftlichen Nutzungsdauer schwieriger. Eine Berechnung auf Basis eines positiven Kapitalwertes ist bei unter Betrieb befindlichen Infrastruktureinrichtungen nicht zielführend, wie eingangs bereits erwähnt. Auch hier sind Erfahrungswerte bzw. ein Rückblick auf genannte Einflussgrößen in den letzten Jahren ein wesentliches Hilfsmittel und sollten lediglich dazu dienen, den Ansatz der gewählten Nutzungsdauer zu verifizieren und anzupassen.

3.3.3 Sozio-ökonomische Einflussfaktoren auf die Nutzungsdauer

Einen weiteren zu berücksichtigenden Aspekt stellen sozio-ökonomische Einflüsse auf die Nutzungsdauer dar. Sie beziehen sich gesellschaftlich auf das geforderte Sicherheitsniveau, welches zur Anpassung von Regelwerken und Normen führt.

Sofern die betriebs- und sicherheitstechnische Tunnelausstattung nicht mehr den Anforderungen genügt, ist sie an die geforderten Bedingungen anzupassen. Änderungen von Sicherheitsauflagen beenden somit ad hoc die Nutzungsdauer der betroffenen Ausstattung. Ein aktuelles Beispiel stellt das sicherheitstechnische Nachrüstungsprogramm dar, welches 2006 nach den vorangegangenen Brandereignissen in europäischen Straßentunneln durch den Bund mit einem Finanzvolumen von insgesamt ca. 1,2 Mrd. Euro aufgesetzt wurde und immer noch läuft.¹³ Hier waren die Bundesfernstraßentunnel zu klassifizieren und zu priorisieren und an den geänderten Stand der Regelwerke anzupassen. Im Zuge dieser Maßnahme wurden alle Tunnel nachgerüstet, auch relativ neue Tunnel, die vor 2003 erstellt wurden. Solche Einflüsse lassen sich schwer vorhersagen, da sie, wie im genannten Fall, ereignisgetrieben sind.

¹³ Vgl. KOSTRZEWA (2015), S. 7.

3.4 Gegenüberstellung von Nutzungsdauern aus der Literatur

Tabelle 1 fasst anzusetzende Nutzungsdauern für die betriebs- und sicherheitstechnische Ausstattung von Straßentunneln aus verschiedenen Literaturquellen zusammen.^{14,15,16,17,18,19,20} Einige Quellen geben dabei detaillierte Angaben zur Nutzungsdauer einzelner Ausstattungskomponenten und Anlagenteilen, andere wiederum geben eine durchschnittliche anzusetzende Nutzungsdauer für ein gesamtes Modul an. Zu berücksichtigen ist hier allerdings, dass bei einer weltweiten Betrachtung Ausstattungs- und Anforderungsniveaus stark variieren (insb. Angaben aus PIARC). Weiter ist zu beachten, dass mit dem Erreichen der Nutzungsdauer von Einzelkomponenten eines Moduls, wie z.B. bei einem technischen Defekt, der ganze Funktionsblock erneuert werden muss/ kann, da die wirtschaftliche Nutzungsdauer des Gesamtmoduls nicht mehr gegeben ist.

Schließlich bleibt die Herausforderung, unter all den genannten Einflüssen eine Rechengröße für die anzusetzende durchschnittliche Nutzungsdauer zu ermitteln, die alle Einflüsse berücksichtigt und realitätsnah abbildet.

¹⁴ Vgl. ABBV (2010).

¹⁵ Vgl. VOGT (2013).

¹⁶ Vgl. PIARC (2004).

¹⁷ Vgl. SIA (2004).

¹⁸ Vgl. WELTE (2004).

¹⁹ Vgl. FSV (2014).

²⁰ Vgl. DMRB (1999).

Tabelle 1: Darstellung verschiedener Quellen zu Nutzungsdauern für die betriebs- und sicherheitstechnische Ausstattung von Straßentunneln²¹

Nutzungsdauerangaben für die Ausstattung von Straßentunneln		Quellen						
		DE		PIARC	CH		AT	UK
Modul		ABBV	Vogt			SN	Welte	RVS	DMRB
Tunnelausstattung	Beleuchtung	20		11,2	0-5			
	Einfahrtsbeleuchtung						20	
	Innenstreckenbeleuchtung		20				20	
	Leuchten				25-30			18
	Vorschaltgeräte				15-20			
	Beleuchtung Querschläge/ Fluchtwege		20				20	
	Steuerung/ Regelung/ Messwertfassung		12		10-15		15	
	Leuchtdichtmessung							15
	Lüftung	20		18,2	15-20			
	mechanische Längslüftung							
	Strahlventilatoren		35		20-25		20	18
	mechanische Anlagenteile Strahlventilatoren						20	
	Elektromechanische Anlagenteile Strahlventilatoren							
	Absaugung über steuerbare Klappen und separatem Abluftkanal		35					
	Lüftungsklappen				15-20			
	Axialventilatoren				25-30			30
	mechanische Anlagenteile Axialventilatoren						30	
	Elektromechanische Anlagenteile Axialventilatoren						20	10
	Schalldämpfer				30-40			
	CO-Messung		12		20-25		15	13
	Sichtprübmessgeräte		12		20-25		15	15
	Regelung/ Steuerung				10-15		15	
	Strömungsmessung							20
	Verkehrstechnische Einrichtungen	20						
	statische Verkehrszeichen		20				10	
	Wechsellichtzeichen						10	14
	Wechselverkehrszeichen							
Wechselzeichengebersteuerung						10	14	
Höhenkontrollen				10-15		10	15	
Verkehrsdatenerfassung						10		
Schrankenanlagen (Sperrschranken)		20					15	
Dauerlichtzeichen				20-25		10	14	
Wechselwegweiser				20-25		15	14	
Messeinrichtungen					5-10			
Längsgeschwindigkeitsmessung						15		
Induktionsschleifen							13	
Sicherheitseinrichtungen	20		14,8					
Fluchtwegkennzeichnung		20				10		
Orientierungsbeleuchtung						10		
Leiteinrichtung		15						
Brandmeldeeinrichtung				20-25				
Manuelle Brandmeldeeinrichtungen		15						
Branddetektion				5-10		20	5	
Brandmeldeanlage (Kabel)		20				10		
Brandmeldeanlage Steuerung								
Brandbekämpfungseinrichtungen				10-15		20	7	
Handfeuerlöscher						20		
Löschwasserversorgung								
Druckerhöhungsanlage		20						
Hydrant		50		40-50			28	
Stationäre Brandbekämpfungsanlagen						20	20	
Lösch- und Bindemittelvorrat								
Kommunikationseinrichtungen								
Notrufeinrichtung		20		20-25		15		
Notruftelefon (SOS-Nische)								
Notausgangstür in die Schleuse		30						
Videoüberwachung		15		10-15				
Videoanlagen						10		
Kamera							15	
Monitor							10	
Steuerungsequipment							20	
Kabel							20	
Tunnelfunk		20		15-20		15		
Verkehrsfunk/ Radio					0-5			
Radio Antennenkabel							15	
Lautsprecheranlage		15				20		
Telefon (Festnetz)				15-20		20	15	
Zentrale Anlage	20							
Energieversorgung		20	20,1					
Netzanschluss/ Einspeisung				25-30				
Mittelspannungsanlagen						25		
Niederspannungsschaltanlagen				25-30		25	20	
Niederspannungskabel					0-5		40	
Ersatzstromversorgungsanlage (USV-Anlage)				20-25	10-15	15	15	
Batterien mit Säurefüllung				15			5	
Batterien mit Gelfüllung				10				
Notstromaggregate						25	20	
Kabel und Leitungen			25,7		15-20			
Cu-Kabel				35-40				
LWL-Verkabelung				20-25	5-10			
Transformatoren				30-40	15-20		30	
Erdung/ Blitzschutz/ Potentialausgleich						25		
Steuerungsanlage (Leit-, Automatisierungstechnik und Überwachung)			10,7				18	
Übergeordnetes Leitsystem				10-15				
Verkehrsleitsystem				10-15				
Leitstellen				15-20				
Tunnelsteuerung		8						
Leitrechner						15		
Automatisierung						10		
Prozessvisualisierung						10		
Archivierung/ Datenauswertung								
Raumlufttechnische Komponente					0-5			
Lüftung						15		

21 Vgl. LEHAN (2017).

3.5 Erhaltungs- und Instandhaltungsstrategien

Unter dem Einfluss der Nutzung der Bauwerks- und Ausstattungskomponenten (die in sinnvollen Funktionseinheiten als Module zusammengefasst werden, vgl. Kap. 5) wird nach DIN 31051²² der Abnutzungsvorrat durch die Einwirkung chemischer und/oder physikalischer Vorgänge sukzessive abgebaut. Dem gegenüber stehen regelmäßige Maßnahmen der Instandhaltung und der Bauwerkserhaltung; sie erhöhen durch gezielte Maßnahmen den Abnutzungsvorrat in den unterschiedlichen Phasen der Nutzung eines Moduls. Exemplarisch sind verschiedene Alterungskurven unter Implementierung von Maßnahmen zur Anhebung des Abnutzungsvorrats farblich in Abbildung 6 hervorgehoben.

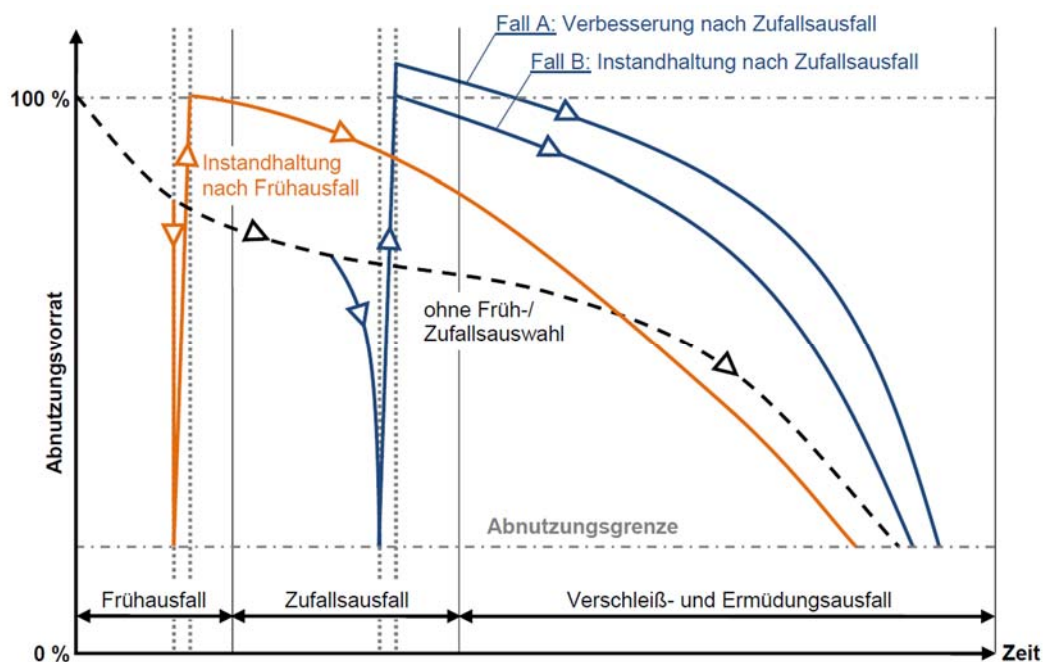


Abbildung 6: Abbau des Abnutzungsvorrats und Instandhaltungsmaßnahmen²³

Instandhaltungs- und Bauwerkserhaltungsmaßnahmen können auf unterschiedlichen Strategien basieren. Detaillierte Ausführungen enthält DIN EN 13306²⁴, die die Instandhaltung in präventive und korrektive Maßnahmen unterteilt (Abbildung 7). Die präventive Instandhaltung kommt in festgelegten Abständen oder nach vorgeschriebenen Kriterien mit dem Ziel zur Anwendung, die Ausfallwahrscheinlichkeit zu verringern. Die korrektive Instandhaltung wird ausgeführt, sobald ein Fehler erkannt wird. Infolgedessen wird das Modul derart instandgesetzt, dass eine zukünftige Funktionserfüllung weiter möglich ist.

²² Vgl. DIN 31051 (2012).

²³ Vgl. VOGT (2013).

²⁴ Vgl. DIN EN 13306 (2018).

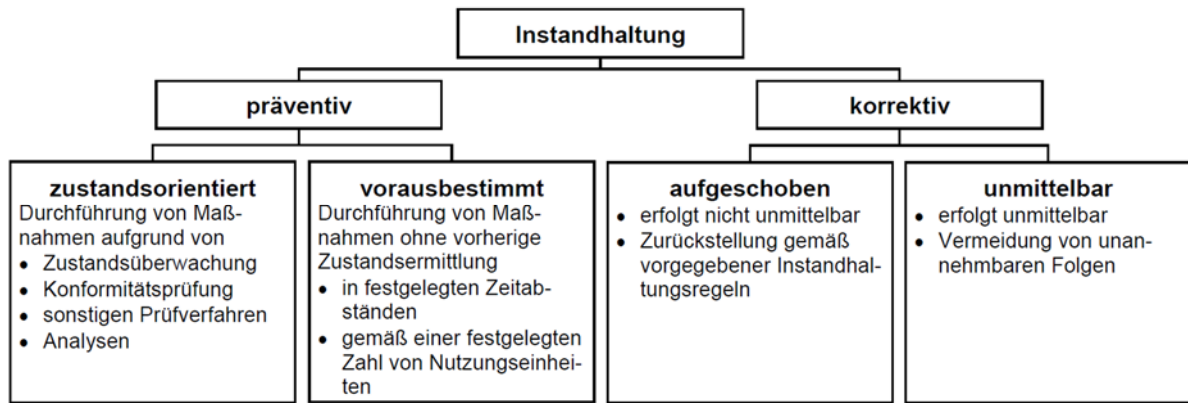


Abbildung 7: Untergliederung der Instandhaltung

Es ist das oberste Ziel der Instandhaltung, den Soll-Zustand eines Moduls beizubehalten und Ist-Zustände des Alterungsprozesses zu dokumentieren.²⁵ Vor Erreichen der Abnutzungsgrenze sind Instandhaltungsmaßnahmen zu ergreifen, die den Soll-Zustand wiederherstellen oder ggf. übertreffen (Abbildung 6). Dies kann dadurch erreicht werden, dass eine zwischenzeitlich erfolgte technische Weiterentwicklung bessere Materialien hervorgebracht hat als jene Materialien, die bis zum (Beinahe-)Ausfall eingesetzt wurden.

Eine angemessene Ausfallwahrscheinlichkeit für jedes Modul spiegelt zum einen die Art des funktionalen Einsatzbereiches wider, zum anderen drückt sich dadurch die sicherheitstechnische Relevanz aus. Aus der sicherheitstechnischen Relevanz eines Moduls lässt sich folgern, ob ein Modul infolge eines irreparablen Ausfalls unverzüglich oder ggf. erst mit einem tolerierbaren Zeitversatz durch ein neues Modul zu ersetzen ist. Dies ist insbesondere davon abhängig, ob technische Redundanzen vorhanden sind und somit der Funktionsausfall innerhalb einer Übergangsfrist durch ein anderes Element übernommen werden kann.

Ein Element von hoher sicherheitstechnischer Relevanz kann bei Funktionsausfall eine Einschränkung des Tunnelbetriebs zur Folge haben. Ist das Modul von hoher sicherheitstechnischer Bedeutung, so ist im Weiteren danach zu differenzieren, ob es in hoher Stückzahl vorhanden ist oder ob es nur einige wenige Male zur Anwendung kommt. In hoher Stückzahl sind beispielsweise Leuchtmittel, Hinweistafeln, Handfeuerlöcher oder Befestigungsmittel zur Fixierung von Einbauteilen vertreten. Für diese Module, die dem Status 1 (Abbildung 8) angehören, ist davon auszugehen, dass sie als Ersatzteil dauerhaft vorgehalten werden. Module gemäß Status 2 in Abbildung 8, die in geringer Stückzahl im Tunnel verbaut sind und ggf. eine spezielle Anfertigung benötigen, sind Tunnelventilatoren, Rauchabzugsklappen, Sichtweitenmessgeräte oder Schranken zur Sperrung der Tunnelzufahrt. Die Wiederbeschaffung geht einerseits mit hohen Folgekosten, andererseits mit Lieferfristen in der Größenordnung mehrerer Wochen einher.

Eine Methodik, die den zuvor genannten Einflüssen Rechnung trägt, muss das Potenzial besitzen, eine theoretische Nutzungsdauer für ein spezifisches Modul valide abzuschätzen. Die Basis derartiger Zuverlässigkeitsuntersuchungen liegt in der Dokumentation der Zeitpunkte, zu denen ein spezifisches Modul seine Funktionsfähigkeit verliert. Wird davon ausgegangen, dass eine Instandhaltung des ausgefallenen Moduls unwirtschaftlich oder technisch unmöglich ist, erfolgt der Austausch. Für das Ersatzmodul muss die Forderung gelten,

²⁵ Vgl. GÄNßMANTEL et al. (2005).

dass die Funktion, die es vor dem Ausfall übernommen hat, auch nach dem erfolgten Austausch sichergestellt wird.

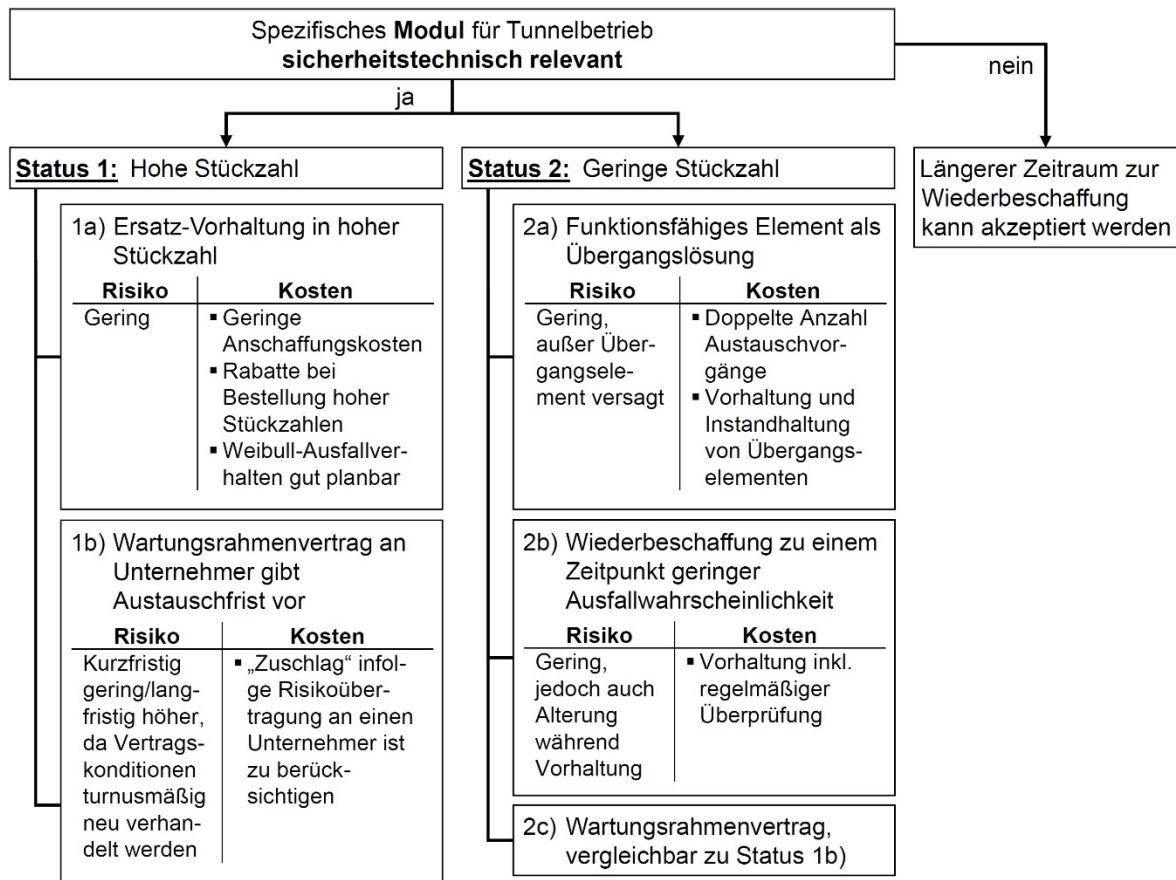


Abbildung 8: Umgang mit sicherheitstechnischer Tunnelausstattung²⁶

Die Kategorisierung von Modulen nach der sicherheitstechnischen Relevanz kann unterschiedliche Strategien im Hinblick auf die Instandhaltung eines Tunnelbauwerks auslösen. In Abhängigkeit von der gewählten Strategie variiert insbesondere die Wahl einer zweckmäßigen Ausfallwahrscheinlichkeit. Dabei besteht eine direkte Abhängigkeit zwischen der gewählten Ausfallwahrscheinlichkeit und den Auswirkungen auf die Folgekosten in der Lebenszykluskostenberechnung.

Aufgrund der zuvor genannten Einflüsse (Nutzungsdauer, Instandhaltungsstrategien, Weiterentwicklung und Sicherheitsanforderungen) ist es erforderlich, regelmäßig einen Soll-Ist-Abgleich durchzuführen und ggf. Anpassungen vorzunehmen um den weiteren Lebenszyklus annähernd genau bestimmen zu können.

²⁶ Vgl. VOGT (2013).

4 Kapitalwertverfahren

4.1 Grundaussagen und -annahmen

In der Planungsphase von Investitionsvorhaben ist das Kapitalwertverfahren eine finanzmathematische Entscheidungsmethode zur Beurteilung der wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit einzelner Investitionen/Investitionsprogramme und wird zur Verfahrensauswahl im Sinne eines Variantenvergleichs eingesetzt.²⁷

Die Kapitalwertmethode kann in folgenden Entscheidungssituationen eingesetzt werden:

- Durchführung/Unterlassung einer Investition ohne Berücksichtigung alternativer Investitionsmöglichkeiten. Der Kapitalwert zeigt, ob das Investitionsvorhaben wirtschaftlich ist.
- Auswahl eines optimalen Investitionsobjektes aus einer definierten Menge autonomer, sich gegenseitig ausschließender Alternativen.
- Ermittlung der optimalen Nutzungsdauer bzw. des optimalen Ersatzzeitpunktes.
- Bestimmung von Umfang und Zusammensetzung eines optimalen Investitionsprogramms, das aus voneinander abhängigen Investitionsobjekten besteht.

Die wirtschaftliche Beurteilung alternativer Investitionsvorhaben kann nur dann methodisch korrekt umgesetzt werden, wenn diese hinsichtlich ihres Ziels, des Planungszeitraums, des Kapitaleinsatzes und der Umweltlagen vergleichbar sind.

Die Investition ist somit ein Vorhaben, das mit einer oder mehreren Anschaffungsauszahlungen beginnt und dessen Nutzung zu künftigen Einzahlungen und Auszahlungen führt.

Das Investitionskalkül enthält als Eingangsdaten

- alle mit dem Objekt verbundenen Ein- und Auszahlungen (Zahlungsreihen),
- die Zahlungszeitpunkte,
- den Ungewissheitsgrad der Zahlungen.

Als weitere Eingangsdaten sind mit Bezug auf den Investor natürlich auch sein(e)

- Zielsystem,
- Entscheidungsfeld (Alternativen, Nebenbedingungen),
- Risikoneigung als auch die
- Rechtsform (im Hinblick auf Haftungs- und Besteuerungsfolgen)

zu beachten.

4.2 Analytisches Standardmodell

Die wirtschaftliche Bewertung von Tunnelbauten befasst sich in der Regel nur mit der Ermittlung, Analyse und Optimierung der pagatorischen Initial- und Folgekosten; damit entspricht

²⁷ Vgl. im Folgenden ADDEN, THEWES, LEHAN (2016).

das Kapitalwertkalkül in diesem Anwendungsfall der Barwertberechnung einer Auszahlungsreihe. Der Kapitalwert ist somit die Summe aller auf den Referenzzeitpunkt diskontierten Auszahlungen, die mit der Investition, dem Tunnel, verbunden sind:

$$(1) \quad NPV = a_0 + \sum_{t=1}^n c_t \cdot q^{-t}$$

mit:

NPV **Net Present Value**, Kapitalwert der Auszahlungen zum Zeitpunkt 0 (Ende der Lebenszyklusphase 1 = Planung und Herstellung)

a_0 Planungs- und Herstellungsauszahlungen im Zeitpunkt 0, zugleich Diskontierungszeitpunkt t

c_t Auszahlungen (c_t) in der Periode t

q : Diskontierungsfaktor ($1 + i$) mit i = Kalkulationszinsfuß

n : Nutzungsdauer des Investitionsobjekts mit $t = 1, 2, \dots, n$ (in Jahren)

Bei uniformen Auszahlungen vereinfacht sich Formel (1) zu

$$(2) \quad NPV = a_0 + c \cdot RBF_i^n$$

mit:

$$RBF_i^n = \frac{q^n - 1}{i \cdot q^n}$$

RBF Rentenbarwertfaktor

Ein Tunnelbauvorhaben ist umso wirtschaftlicher, je kleiner der negative Kapitalwert dem Betrage nach ist, da nur Auszahlungen betrachtet werden.

4.3 Entscheidungsrelevante Parameter

Auswahl des Kalkulationszinssatzes

Ist die mit dem Tunnelprojekt verbundene Auszahlungsreihe gegeben, dann ist der Kapitalwert lediglich eine vom Kalkulationszinsfuß abhängige Größe. Der Kalkulationszinssatz, der über den Nutzungszeitraum des Tunnelprojekts konstant gehalten wird, hat somit einen entscheidenden Einfluss auf die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit. Ein hoher Zinssatz begünstigt Alternativen mit ausgeprägten Folge- und geringen Investitionskosten.

Bei Infrastrukturbauten mit langer Lebensdauer wird empfohlen, für den Kalkulationszinsfuß mit einem Wert zu rechnen, der sich an zumindest einer der ministeriellen Berechnungsbeispiele²⁸ orientiert.

Basisbewertung 0%

Um im Rahmen der praktischen Anwendung einen Referenzmaßstab für die Ergebnisqualität und -sensitivität zu haben, ist es erforderlich, für die Berechnungen des Kapitalwerts stets auch eine 0%-Variante der Kapitalwertfunktion aufzunehmen. Bei einem Kalkulationszinsfuß von 0% ist der Kapitalwert gleich der Summe der künftigen, nicht diskontierten Auszahlungen.

²⁸ Vgl. insbes. BMVBS (2010), Kriterium Nr. 211; BVWP (2030), Kapitel 12.1; ABBV (2010), Kapitel 2.4.

Preisniveauänderungen und relative Preisänderungen

In den üblichen Anwendungsfällen unterscheiden sich die Preisänderungsraten der jeweiligen Auszahlungsgrößen. Außerdem können sie wie die allgemeine jährliche Inflationsrate/Deflationsrate im Zeitablauf variieren oder zu unterschiedlichen Zeitpunkten einsetzen. Diese relativen Preisänderungen sind wie folgt zu berücksichtigen:

$$(3) \quad NPV = a_0 + \sum_{t=1}^n \frac{\prod_{t=1}^n c_t(1+p_{ct})}{\prod_{t=1}^n (1+p_t)(1+i_r)^t}$$

mit:

p_{ct} : Preisänderungen der jährlichen Auszahlungen

p_t : Änderungen der Inflationsrate/Deflationsrate im Zeitablauf

i_r : realer Kalkulationszinsfuß

Der Sonderfall einheitlicher Preisniveauänderungen, d.h. Inflation oder Deflation, führt zu gleichmäßigen Änderungen aller Preise im Kapitalwertkalkül und muss daher nicht berücksichtigt werden. Formel 4 zeigt, dass die Auszahlungsgrößen und der Kalkulationszinsfuß der Höhe und Richtung nach gleich beeinflusst werden.

$$(4) \quad NPV = a_0 + \sum_{t=1}^n \frac{c_t(1+p)^t}{(1+i)^t \cdot (1+p)^t} \quad \Rightarrow \quad NPV = a_0 + \sum_{t=1}^n \frac{c_t}{(1+i)^t}$$

mit:

p : einheitliche Inflations-/Deflationsrate

Risiko und Unsicherheit

Die erwarteten künftigen Auszahlungsgrößen des Investitionsprojekts sind Planungswerte und können daher nicht mit Sicherheit vorausberechnet werden, der zu bestimmende Kapitalwert wird zu einer mehrwertigen Zielgröße. Der Ungewissheitsgrad der Eingangsparameter kann beim Kapitalwertverfahren grundsätzlich durch deterministische Korrekturverfahren, Sensitivitätsanalysen oder stochastische Verfahren der Risikoanalyse berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 6).

4.4 Erweiterungen des Standardmodells

Ergänzungsinvestitionen

Durch Berücksichtigung von Ergänzungsinvestitionen kann die Vergleichbarkeit von alternativen Investitionsvorhaben hergestellt werden, die sich

- in der Höhe und zeitlichen Verteilung der Auszahlungen (c_t),
- der Anschaffungsauszahlungen (a_0),
- in der Länge der Nutzungsdauern (n) und
- im Ungewissheitsgrad

unterscheiden.

Soweit zum Referenzzeitpunkt keine Pläne über die Verwendung der nicht benötigten Investitionsmittel sowie über den Ersatz der Anlagen nach Ablauf der Nutzungsdauer bestehen, wird im Rahmen der partialanalytischen Betrachtung mit einer „Neutralitätsannahme“ gearbeitet: Die Kapitalwertmethode unterstellt, dass der Kapitalwert eventuell zu berücksichtigender Ergänzungsinvestitionen Null ist, da die fiktive Wiederanlage möglicher Einzahlungsüberschüsse (im Falle von Konzessionsmodellen) zum Kalkulationszinsfuß erfolgt.

Finanzierung der Investition

Die Finanzierungsseite des Investitionsvorhabens wird im Standardmodell nicht betrachtet. Das Kapitalwertverfahren geht davon aus, dass dem Investor der benötigte Investitionsbetrag vollumfänglich zur Verfügung steht. Die Finanzierungsseite kann aber in das Investitionskalkül einbezogen werden, indem eine separate Zahlungsreihe aufgestellt wird, die eine Kapitalaufnahme mit anschließenden periodenbezogenen Tilgungsraten abbildet. Finanzierung und Investition unterscheiden sich letztlich nur durch das Vorzeichen ihrer periodenbezogenen Zahlungsgrößen.

4.5 Beurteilung der Kapitalwertmethode

Das Kapitalwertverfahren zur rechnerischen Umsetzung des Lebenszykluskostenkonzepts ist derzeit methodisch ohne praktikable Alternative. Die Ergebnisqualität der Berechnungen ist im konkreten Anwendungsfall davon abhängig, inwieweit Modifikationen des Standardmodells zu einer realitätsnahen Abbildung der konkreten Gegebenheiten eines Tunnelbauvorhabens führen.

Der Standardansatz ist als Partialmodell einfach und schnell zu handhaben. Die Beurteilung der Vorteilhaftigkeit autonomer Investitionsvorhaben orientiert sich nur an der Zielgröße „Kapitalwertoptimierung“. Weitere Zieldimensionen - Liquidität, Beschaffungs- und/oder Finanzrestriktionen - werden nicht explizit berücksichtigt. Die Charakterisierung eines Investitionsobjektes durch die Zahlungsreihe vernachlässigt zunächst nicht monetäre Größen. Technologische, organisatorische und rechtliche sowie externe Effekte (Luftverschmutzung, Lärmbelästigung) können im Untersuchungsrahmen durch Monetarisierung berücksichtigt werden.

Die den Zahlungsgrößen zugrundeliegende Datenbasis für die Kapitalwertrechnung ist das pagatorische, auf Zahlungsgrößen basierende externe Rechnungswesen. Die Lebenszykluskostenrechnung ist systematisch der kalkulatorischen, internen Kosten- und Leistungsrechnung zuzuordnen. Die Verwendung der Kapitalwertberechnung ist dann umsetzbar, wenn auf pagatorische Kosten abgestellt wird.

5 Berechnung der Lebenszykluskosten

Zur Bestimmung der Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken ist in Abbildung 9 der strukturierte Verfahrensablauf dargestellt. Die einzelnen Teilschritte I bis VII werden in den nachfolgenden Absätzen 5.1 bis 5.7 erläutert.

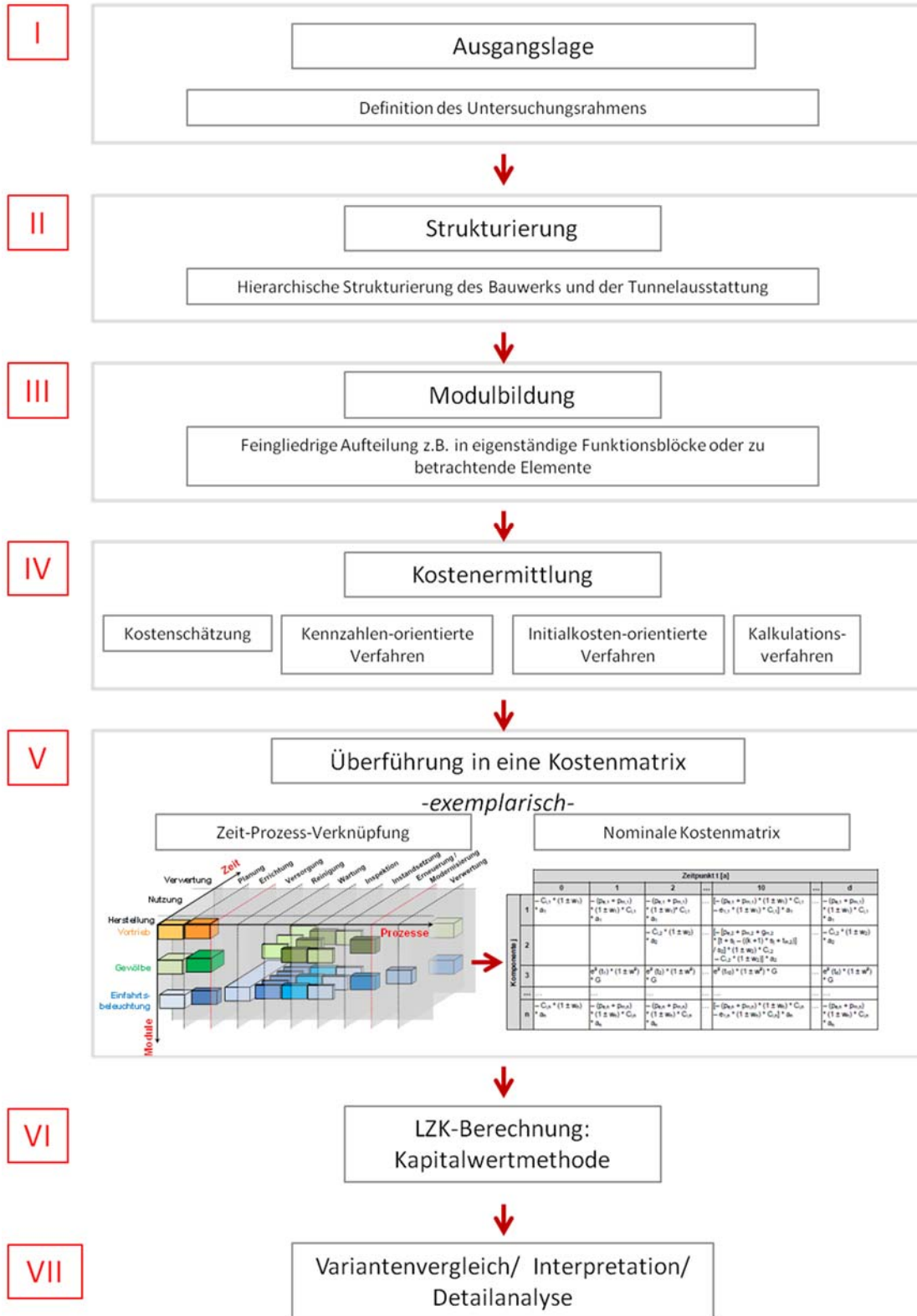


Abbildung 9: Verfahrensablauf zur Bestimmung der Lebenszykluskosten

Kern der Vorgehensweise ist die Strukturierung des Bauwerks in eigenständige Module sowie die Untergliederung des Lebenszyklus in die anfallenden Prozesse. Die Bestimmung der einzelnen Kostengrößen kann dabei, entsprechend der Zielstellung bzw. dem vorliegenden Kenntnisstand, auf Basis unterschiedlicher Verfahrensansätze vorgenommen werden.

5.1 Schritt I – Ausgangslage

Im Vorfeld einer Lebenszyklusanalyse ist eine Definition des Untersuchungsrahmens vorzunehmen (Abbildung 10). Dabei erfolgt ausgehend vom Untersuchungsgegenstand (Neubau oder Bestandsbauwerk) die Bestimmung der Ausprägung des Untersuchungsrahmens. Dazu ist auf Basis der vorliegenden Planungs- bzw. Informationstiefe sowie der verfolgten Zielstellung, die Betrachtungstiefe im Einzelnen festzulegen. Entsprechend des modularen Aufbaus kann der Umfang vom einzelnen Modul bis zum vollständigen Tunnelbauwerk sämtliche Ausprägungen umfassen. Dabei sind vertiefte Untersuchungen singulärer Bereiche, bei einer gleichzeitigen übergeordneten Betrachtung weiterer Einheiten realisierbar.

Die Festlegung des mit der Untersuchung verfolgten Ziels, beispielsweise einer Lebenszykluskostenrechnung zur Gesamtkostenoptimierung oder zur Budgetplanung, prägt wesentlich das weitere Vorgehen. Insbesondere die Bestimmung des relevanten Zeithorizonts für den Untersuchungsrahmen wird dadurch entscheidend beeinflusst.

Untersuchungsgegenstand	Ausprägung	Zielstellung	Zeitraumen
<ul style="list-style-type: none"> • Neubau • Bestand • Umbau • Instandsetzung • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Bauwerk • System • Baugruppe • Modul • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Kostenoptimierung • Kostenvergleich • Budgetplanung • Benchmarking • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • 100 Jahre • 25 Jahre • 10 Jahre • 2 Jahre • ...
Untersuchungsrahmen			

Abbildung 10: Definition des Untersuchungsrahmens

Für eine Gegenüberstellung von Bauwerksvarianten ist bei der Bestimmung des Untersuchungsrahmens grundsätzlich auf eine Vergleichbarkeit zu achten. Diese ist beispielsweise über ein äquivalentes Sicherheitsniveau, identische Leistungsklassen, vergleichbare Eingangsgrößen (z. B. Verkehrsaufkommen, zul. Höchstgeschwindigkeit usw.) oder eine vollumfängliche Aufgabenerfüllung zu gewährleisten.

5.2 Schritt II – Strukturierung des Bauwerks

Zur nachvollziehbaren Abbildung der Kosten von Tunnelbauwerken in einem Lebenszykluskostenmodell ist eine gezielte Strukturierung vorzunehmen. Für eine aktive Gestaltung der Gesamtkosten wird auf ein hierarchisch strukturiertes und modular aufgebautes Modell abgestellt. Modular bedeutet in diesem Zusammenhang, das System in weitestgehend unabhängige Einheiten zu zerlegen.

Durch diese Strukturierung wird erreicht, dass einzelne Elemente (Module) aufgrund der Unabhängigkeit und unter Berücksichtigung vorhandener Beziehungen isoliert einer Analyse unterzogen werden können. Daneben besteht die Möglichkeit, bereits entwickelte Lösungsansätze (Struktur, Module, Kosten etc.) auf andere Projekte zu übertragen. Zusätzlich erlaubt die hierarchische Strukturierung, die Betrachtungen auf die vorliegende Planungs- und Informationstiefe individuell anzupassen.

Ausgehend vom Gesamtbauwerk können Tunnelbauwerke z.B. in die Teilsysteme Bauhilfsmaßnahmen, Baukonstruktion und Ausstattung unterteilt werden. Hierdurch wird eine verursachergerechte Zuweisung von Initial- und Folgekosten gewährleistet. Die Bauhilfsmaßnahmen bedingen aufgrund ihrer Einmaligkeit in aller Regel keine Folgekosten, können allerdings – insbesondere in urbaner Umgebung – einen großen Anteil der Gesamtherstellungskosten beanspruchen. Die Differenzierung zwischen Baukonstruktion und Tunnelausstattung trägt der sehr unterschiedlichen Ausprägung von Initial- und Folgekosten sowie der fachlich und zeitlich getrennten Planung und Umsetzung Rechnung.

Übergeordnet werden die Module in Baugruppen hinsichtlich gleicher Funktion, Aufgabe bzw. Struktur zusammengefasst. (Abbildung 11)

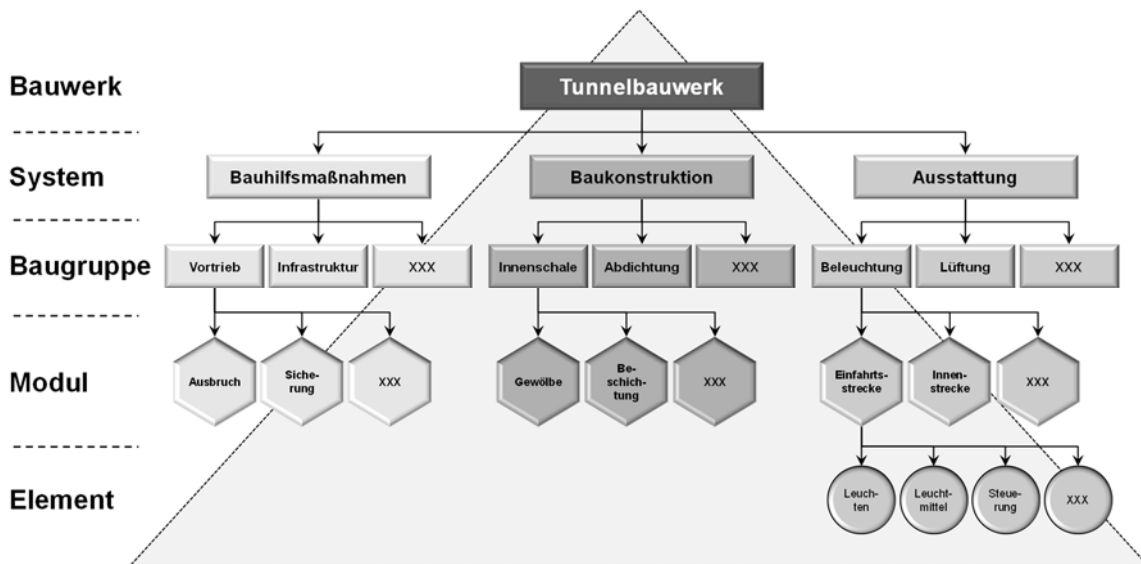


Abbildung 11: Hierarchisch-modulare Strukturierung von Tunnelbauwerken²⁹

5.3 Schritt III – Modulbildung

Entsprechend der vorgenommenen Strukturierung, setzt sich ein Tunnelbauwerk aus Modulen zusammen. Ein Modul selbst definiert sich über die zu erfüllende, technisch-funktionale Aufgabe und stellt eine weitgehend unabhängige Einheit dar.³⁰

Zur Gewährleistung einer Übertragbarkeit bzw. Vergleichbarkeit empfiehlt es sich, Module mit einem allgemeingültigen Aufbau (Abbildung 12) zu verwenden. Die dazu erforderlichen Attribute der einzelnen Module sind für die Bestimmung der Lebenszykluskosten möglichst vollständig zu erfassen.

²⁹ Vgl. ENGELHARDT (2015).

³⁰ Zur theoretischen Herleitung von Modulen sowie deren Abgrenzung über die Kriterien Unabhängigkeit und Integrität wird auf ENGELHARDT (2015), S. 95 ff. verwiesen.

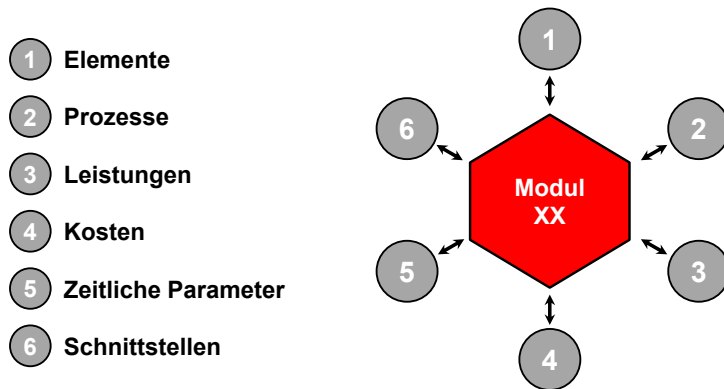


Abbildung 12: Interne Struktur eines Moduls³¹

Elemente

Die wesentlichen Bestandteile (Elemente) des Moduls sind zu erfassen und gegenüber anderen Modulen abzugrenzen. Dabei sind alle Komponenten mit einer gemeinsamen technisch-funktionalen Aufgabe zusammenzufassen. Sollte ein Element für mehrere Aufgaben vorgesehen sein, ist die überwiegende Aufgabe entscheidend für die Modulzuordnung.

Zur Gewährleistung einer Vergleichbarkeit bzw. Übertragbarkeit hat eine exakte Erfassung und Spezifizierung der einzelnen Elemente zu erfolgen. Beispielsweise ist für die Beleuchtung zwischen den verwendeten Leuchtmitteln (Leuchtstoffröhren, Natriumdampf-Hochdrucklampen oder LED-Leuchtmittel) zu differenzieren. Um den Aufwand zur Datenerhebung zu beschränken, kann die Differenzierung auf die die Kosten maßgeblich beeinflussenden Elemente eingegrenzt werden.

Prozesse

Die einzelnen Module durchlaufen, wie in Kapitel 2 ausgeführt, über die gesamte Lebensdauer eine Vielzahl an unterschiedlichen Prozessen. Für jedes Modul sind die relevanten Prozesse zu bestimmen und nach Umfang und Häufigkeit der jeweiligen Lebensphase zuzuordnen. Dabei können die Prozesse – je nach angestrebtem Zielhorizont – zu übergeordneten Prozessen zusammengefasst werden. Beispielsweise kann es sinnvoll sein, die Einzelprozesse Reinigung, Inspektion und Wartung zu einem Gesamtprozess zu aggregieren.

Leistungen

Zur Schaffung von Transparenz sowie dem notwendigen Verständnis für die Kostenauslöser sind die Leistungen und deren Umfang für die einzelnen Prozesse zu bestimmen. Hierfür kann auf unterschiedliche Quellen zurückgegriffen werden, beispielsweise

- Standardleistungsbuch (STLB-Bau),
- Merkblatt für die Kontrolle, Wartung und Pflege von Straßentunneln (M KWPT),
- Leistungsheft für den Straßenbetriebsdienst auf Bundesfernstraßen,
- Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT),
- Richtlinie für die Erhaltung von Ingenieurbauwerken (RI-ERH-ING),
- ZTV-ING, ABBV, RWVZ, RWVA, DIN 1076 usw.

³¹ Vgl. ENGELHARDT (2015).

Kosten

Für die in den Prozessen zu erbringenden Leistungen sind die Kosten zu erfassen. Diese sind aus Gründen der Einheitlichkeit als Nettobeträge zu bestimmen. Abhängig vom Planungs- und Informationsstand zur Kostenerhebung kann auf verschiedene Möglichkeiten der Kostenplanung zurückgegriffen werden (vgl. Kapitel 5.4).

Können Kosten einem Prozess bzw. einem Modul nicht direkt zugeordnet werden, beispielsweise für Wartung und/oder Reinigung, so hat eine Bestimmung des maßgebenden Prozesses bzw. Moduls und eine entsprechende Kostenzuweisung zu erfolgen. Alternativ sind die Prozesse zusammenzufassen bzw. sind Module in der übergeordneten Strukturebene (Baugruppe bzw. System) zu berücksichtigen.

Zeitliche Parameter

Der Wert einer monetären Größe ist vom Anfallszeitpunkt geprägt. Hierdurch ist es erforderlich – neben der Häufigkeit – auch die jeweiligen Zeitpunkte zu berücksichtigen, an denen die Leistungen, respektive die Kosten, für die einzelnen Prozesse anfallen. Dies wird durch die Implementierung der Kapitalwertmethode – vgl. Kapitel 4 – sichergestellt.

Für zyklische Prozesse, bspw. Reinigung oder Inspektion, sind die zeitlichen Parameter in vielen Fällen durch rechtliche oder betriebstechnische Vorgaben gesichert prognostizierbar.³² Komplexer ist die Bestimmung der Zeitpunkte von azyklischen Prozessen, z. B. für die Erneuerung einzelner Bauteile. Hierauf wird in Kapitel 3 näher eingegangen.

Schnittstellen

Die Module sind zwar unabhängig voneinander auszubilden, allerdings sind die gegenseitigen Wechselwirkungen der Module bzw. Prozesse als Attribute zu berücksichtigen. Zusätzlich gilt es, die wesentlichen Einflussparameter, wie z. B. den Reflexionsgrad der Innenschale, die Leuchtdichte im bzw. vor dem Tunnel, die Tunnellänge usw. zu bestimmen.

5.4 Schritt IV – Verfahren der Kostenermittlung

Zur Bestimmung der Kosten für die einzelnen Module bzw. für die übergeordneten Systemebenen kann, abhängig vom Planungs- und Informationsstand oder der verfolgten Zielstellung, auf unterschiedliche Ansätze zurückgegriffen werden.

Kostenschätzung

Bei der Bestimmung der Kosten für die einzelnen Module ist auf Erfahrungswerte zurückzugreifen. Hier besteht die Möglichkeit, von bestehenden Bauwerken Ansätze – unter Einbeziehung der Randbedingungen – zu adaptieren bzw. fortzuschreiben. Das Verfahren bietet sich insbesondere für sehr frühe Projektphasen an, in denen nur unscharfe, übergeordnete Kenntnis über die spätere Ausprägung des Bauwerkes und die Nutzung vorliegt. Mit steigendem Wissensstand sollte jedoch auf andere, detailliertere Verfahren zurückgegriffen werden.

Kennzahlen-orientierte Verfahren

Kennzahlen-orientierte Verfahren greifen zur Kostenermittlung auf abgeleitete Kenngrößen von real existierenden Bauwerken bzw. Prozessen und deren Datensammlung zurück. Dabei

³² Beispielsweise durch das Merkblatt für die Kontrolle, Wartung und Pflege von Straßentunneln (M KWPT), die Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT), DIN 1076 (1999) usw.

ist zwischen absoluten und relativen Kennzahlen zu differenzieren. Wesentlich bei der Anwendung dieses Verfahrens ist die Kenntnis über die maßgeblichen Einflussgrößen für die Kennzahl und daraus abgeleitet deren Übertragbarkeit auf die vorliegenden Randbedingungen. Beispielsweise ist bei der Anwendung der Kenngröße für den jährlichen Energiebedarf der Durchfahrtsbeleuchtung (z. B. kWh/m) u.a. entscheidend, auf Basis welcher Leuchtdichte oder Leuchtmittel die Kennzahl im Verhältnis zum Anwendungsfall ermittelt wurde.

Initialkosten-orientierte Verfahren

Bei initialkostenorientierten Verfahren werden die Folgekosten auf Basis von prozentualen Anteilen der Initialkosten abgeleitet. Dabei kann sowohl auf Literaturgrößen (z. B. ABBV³³) als auch auf abgeleitete Kenngrößen von bestehenden Tunnelbauwerken (z. B. FGSV³⁴ bzw. eigene Dokumentation von Bauwerksbetreibern) zurückgegriffen werden. Eine detaillierte Sammlung von Tunnelrohbau- und -ausstattungskosten sowie den zugehörigen jährlichen Betriebskosten wurde von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen³⁴ zusammengetragen. Aus dieser Datensammlung können – unter Beachtung des jeweiligen Preisstandes – für verschiedene Module Abschätzungen zu den jährlich zu erwartenden Folgekosten als Faktor zu den Initialkosten abgeleitet werden. Dieses Vorgehen knüpft unmittelbar an das in Kapitel 2.3 erläuterte Substitutionsprinzip an und macht die Abhängigkeit der Folgekosten von den Initialkosten auf Modulebene deutlich.

Kalkulationsverfahren

Die kalkulatorischen Verfahren sind angelehnt an die im Bauwesen übliche Kalkulationsmethodik. Die Kosten ergeben sich aus den Einzelkosten der Teilleistungen und können dabei nach Möglichkeit entsprechend den Kostenarten (Lohn, Gerät, Material, Nachunternehmer usw.) untergliedert werden (siehe Beispiel in Kapitel 7). Da die Kosten ausgehend von der zu erbringenden Leistung bestimmt werden, lassen sich diese dem Kostenträger (Modul bzw. Prozess) direkt zuordnen.

Zur Bestimmung der Kalkulationsansätze empfiehlt es sich, auf bekannte Kostengrößen (z. B. aus Ausschreibungsunterlagen, Rechnungen von Nachunternehmern usw.) vergleichbarer Projekte zurückzugreifen. Die erhobenen Kosten sind dabei auf den Bezugszeitpunkt umzurechnen und zu einer mittleren Größe zusammenzuführen.

Für Leistungen, die nicht direkt abgebildet werden können, ist eine Recherche vorzunehmen, um veröffentlichte Größen (Kosten, Kalkulationsansätze, Mengensätze, Aufwandswerte usw.) zur Bestimmung der Kosten herauszuarbeiten. Für Leistungen ohne validierte Datenbasis empfiehlt sich zur Bestimmung der Kosten eine Abschätzung des Leistungsumfanges und der Kosten.

Unter Berücksichtigung, dass nicht immer alle erforderlichen Eingangsgrößen vorliegen, kann durchaus auch annäherungsweise eine Mischung der verschiedenen Verfahren angewendet werden. Dies erfordert jedoch eine spätere Detailbetrachtung oder fortlaufende Konkretisierung sobald genauere Werte vorliegen.

33 Vgl. ABBV (2010).

34 Vgl. FGSV (1996).

5.5 Schritt V – Überführung in eine Kostenmatrix

Die Anzahl aller Module, die das Tunnelbauwerk vollumfänglich oder gemäß Zielstellung in Teilen abbildet, wird durch die Variable x ausgedrückt. Für jedes Modul ist die Anzahl n_j baugleich errichteter Module sowie der Wert für die theoretische Nutzungsdauer d_j vorzugeben. Aus der theoretischen Nutzungsdauer d_j sowie dem Gesamtzeitraum der Lebenszykluskostenberechnung z lässt sich die Anzahl der erforderlichen Austauschvorgänge für jedes Modul ermitteln. Die Modul-Initialkosten $a_{t,j}$ umfassen die Auszahlungen, die für die betriebsbereite Herstellung oder Beschaffung des Moduls j zum gewählten Zeitpunkt t aufzuwenden sind. Insbesondere werden durch die Größe $a_{0,j}$ die Initialkosten für das Modul j zum Zeitpunkt $t=0$, dem Referenzzeitpunkt für die Diskontierung (vgl. Kapitel 4.2) ausgedrückt. Während der anschließenden Phase entstehen die Folgekosten $c_{t,j}$, in Abhängigkeit von der Funktions- und Betriebsweise eines Moduls beinhalten die Folgekosten alle erforderlichen Maßnahmen für den Betrieb, die Erhaltung, die Instandsetzung sowie für den (Teil-)Austausch des Moduls, sobald die theoretische Nutzungsdauer erreicht wird.

Abbildung 13 ordnet zusammenfassend die zuvor genannten Größen und Kosten in den Kontext der Lebenszykluskostenanalyse ein.

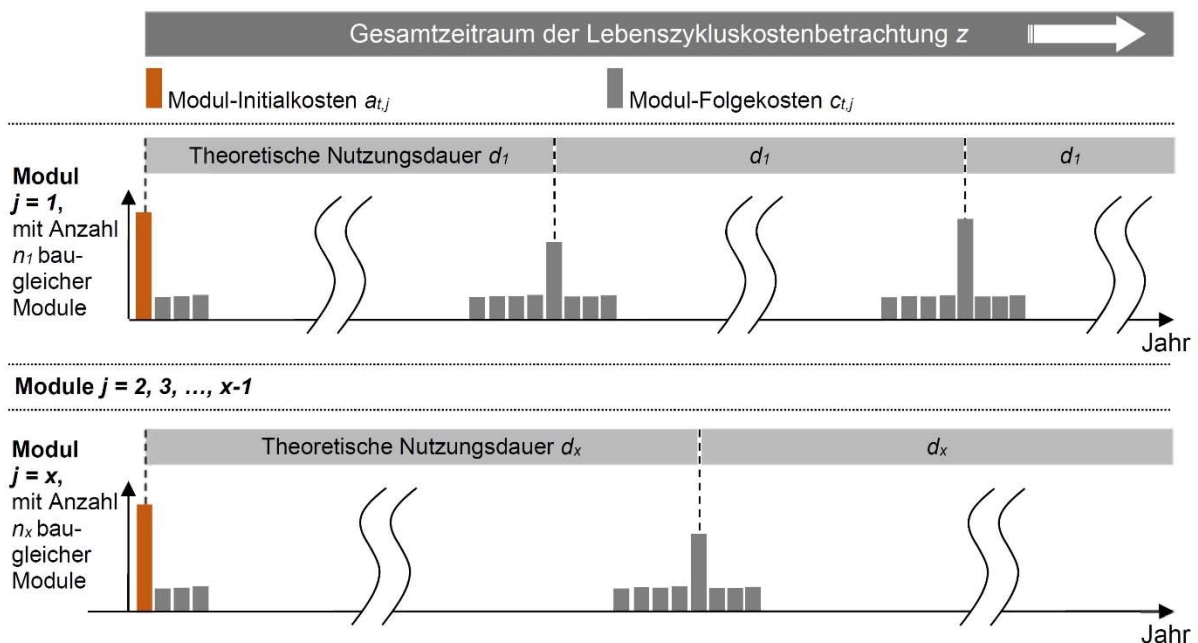


Abbildung 13: Variablen zur Erfassung der Module

Im nächsten Schritt ergibt sich unter Zuordnung der jeweiligen Kostengröße zum Anfallszeitpunkt und der Ausgestaltung des Untersuchungsrahmens eine dreidimensionale Zeit-Kosten-Prozess-Verknüpfung (Abbildung 14). Bei den einzelnen Größen handelt es sich um eine Aufsummierung der einzelnen Kostenbestandteile für den entsprechenden Prozess.

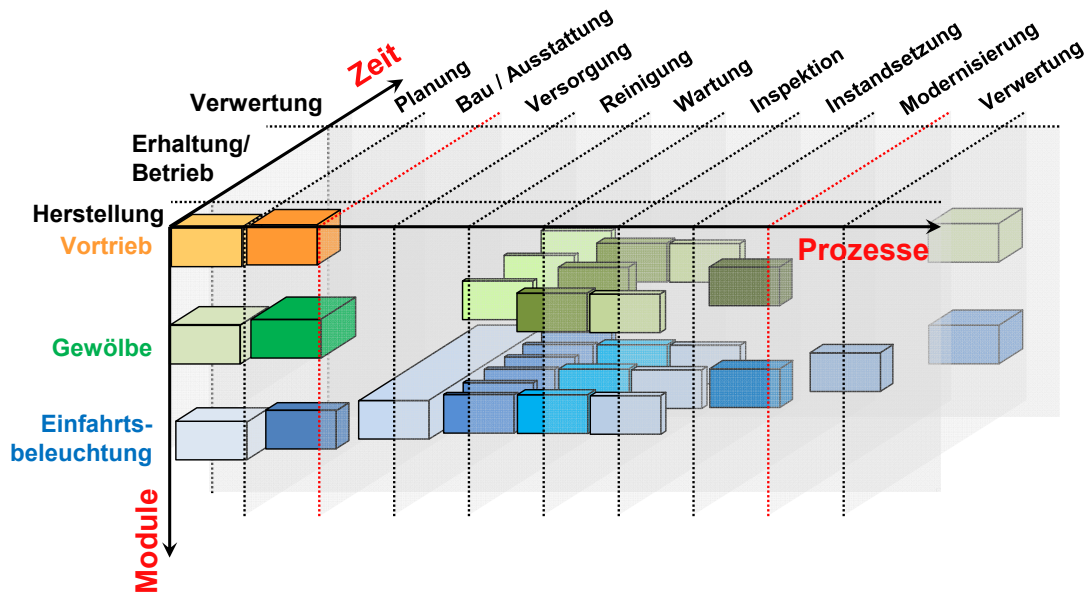


Abbildung 14: Zeit-Kosten-Prozess-Verknüpfung (beispielhafte Ausgestaltung)³⁵

Bei der Ausgestaltung werden die Kosten ausgehend vom Betrachtungszeitpunkt geplant. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit hat eine Berücksichtigung der Preissteigerung bzw. Geldentwertung zu erfolgen. Die Initialkosten $a_{t,j}$ und die Folgekosten $c_{t,j}$ repräsentieren nominale Kosten, die z. B. auf Basis einer endfälligen Berechnung zum 31.12. des jeweiligen Jahres gewonnen werden. Tabelle 2 zeigt exemplarisch eine nominale Zeit-/Kostenmatrix.

Tabelle 2: Nominale Zeit-/Kostenmatrix

		Zeitpunkt t [Jahre]						
		0	1	2	...	10	...	z
Modul j	1	Initialkosten $- a_{0,1} * n_1$	Folgekosten $- c_{1,1} * n_1$	Folgekosten $- c_{2,1} * n_1$	...	Folgekosten inkl. Austausch $- c_{10,1} * n_1 - a_{10,1} * n_1$	...	Folgekosten $- c_{z,1} * n_1$
	2			Initialkosten $- a_{2,2} * n_2$	...	Folgekosten $- c_{10,2} * n_2$	...	Folgekosten $- c_{z,2} * n_2$

	x	Initialkosten $- a_{0,x} * n_x$	Folgekosten $- c_{1,x} * n_x$	Folgekosten $- c_{2,x} * n_x$	...	Folgekosten inkl. Austausch $- c_{10,x} * n_x - a_{10,x} * n_x$	...	Folgekosten $- c_{z,x} * n_x$

5.6 Schritt VI – Lebenszykluskosten-Berechnung: Kapitalwertmethode

Ausgehend von den in den vorangegangenen Abschnitten erhobenen Attributen der einzelnen Module, werden die Lebenszykluskosten unter Anwendung der Kapitalwertmethode (vgl. Kap. 4) berechnet. Zielgröße ist der Kapitalwert. Der zur Bestimmung des Kapitalwertes erforderliche Referenzzeitpunkt wird per Definition dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme gleichgestellt. Für die Initialkosten ist somit keine Ab- bzw. Aufzinsung vorzunehmen. Die Folgekosten hingegen sind in Bezug auf den Referenzzeitpunkt abzuzinsen.

³⁵ ENGELHARDT (2015).

5.7 Schritt VII – Variantenvergleich und Interpretation

Das Ergebnis einer Lebenszykluskostenrechnung liefert als Ergebnisgröße den Kapitalwert. Ohne weitere Untersuchungen bzw. Interpretationen lassen sich hieraus – außer bei einem reinen Variantenvergleich – nur im begrenzten Umfang Erkenntnisse ableiten.

Durch die Aggregation der jährlichen abgezinsten Kostengrößen kann der Verlauf der Lebenszykluskosten dargestellt werden (Abbildung 16). Aus diesem Kostenverlauf lassen sich wesentliche Ereignisse und Zeitpunkte für den Untersuchungszeitraum herauslesen. In den Jahren mit einem signifikanten, sprunghaften Anstieg der Kosten sind verstärkte Investitionen zu tätigen und somit einzuplanen. Vor allem Verbesserungs- und Erneuerungsarbeiten sind aus dem Verlauf ablesbar.

Zusätzlich ermöglicht die gewählte Strukturierung neben einer Aggregation der Kosten für das Gesamtbauwerk auch eine system-, baugruppen- und modulweise Auswertung. Erweiternd kann durch Zusammenführung gleichartiger Prozesse oder übereinstimmender Lebensphasen eine prozess- bzw. phasenbezogene Auswertung erfolgen. Hierdurch wird beispielsweise eine Bewertung der Initial- und Folgekosten ausgehend vom gesamten Untersuchungsrahmen bis hin zum einzelnen Modul ermöglicht (Abbildung 15).

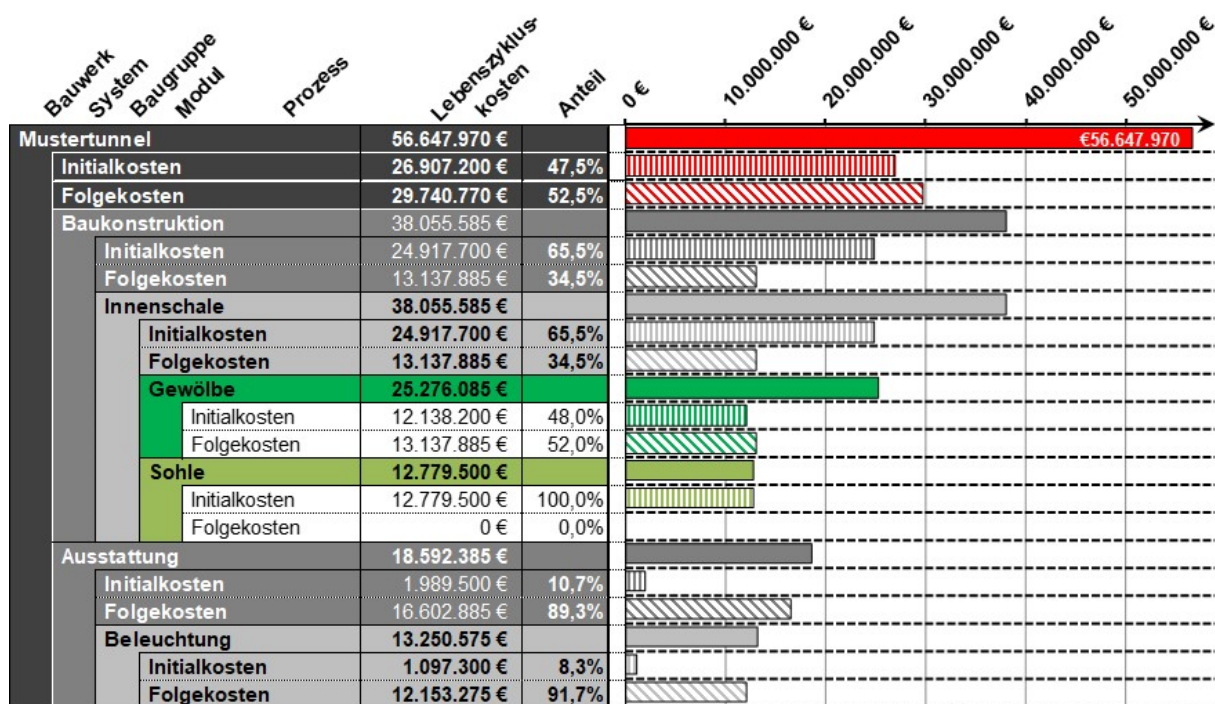


Abbildung 15: Bewertung der Initial- und Folgekosten (Ausschnitt)

Eine Gegenüberstellung von untersuchten Varianten sowohl in einer Auswertung der Einzelgrößen (modulweise/prozessweise) als auch des Kostenverlaufes (gesamt oder in Einzelgrößen) erlaubt eine weiterführende Identifikation von Kostentreibern bzw. Optimierungsmöglichkeiten.

Der Einfluss des Zinssatzes wird durch den Verlauf der Lebenszykluskosten deutlich sichtbar. In Abbildung 16 ist beispielhaft der Verlauf der Lebenszykluskosten unter Einbeziehung eines Kalkulationszinssatzes von 3,0 % und eines Zinssatzes von 0,0 % gegenübergestellt.

Es empfiehlt sich daher grundsätzlich, einen sog. 0-Abgleich durchzuführen. Die Prognose der LZK kann über diesen langen Zeitraum nicht genau vorherbestimmt werden, die Bildung einer Bandbreite ist hier angemessen und zeigt eingrenzend auf, in welcher Größenordnung sich die Kosten bewegen.

In Kapitel 7 wird für einen Mustertunnel eine entsprechende Beispielberechnung vorgestellt.

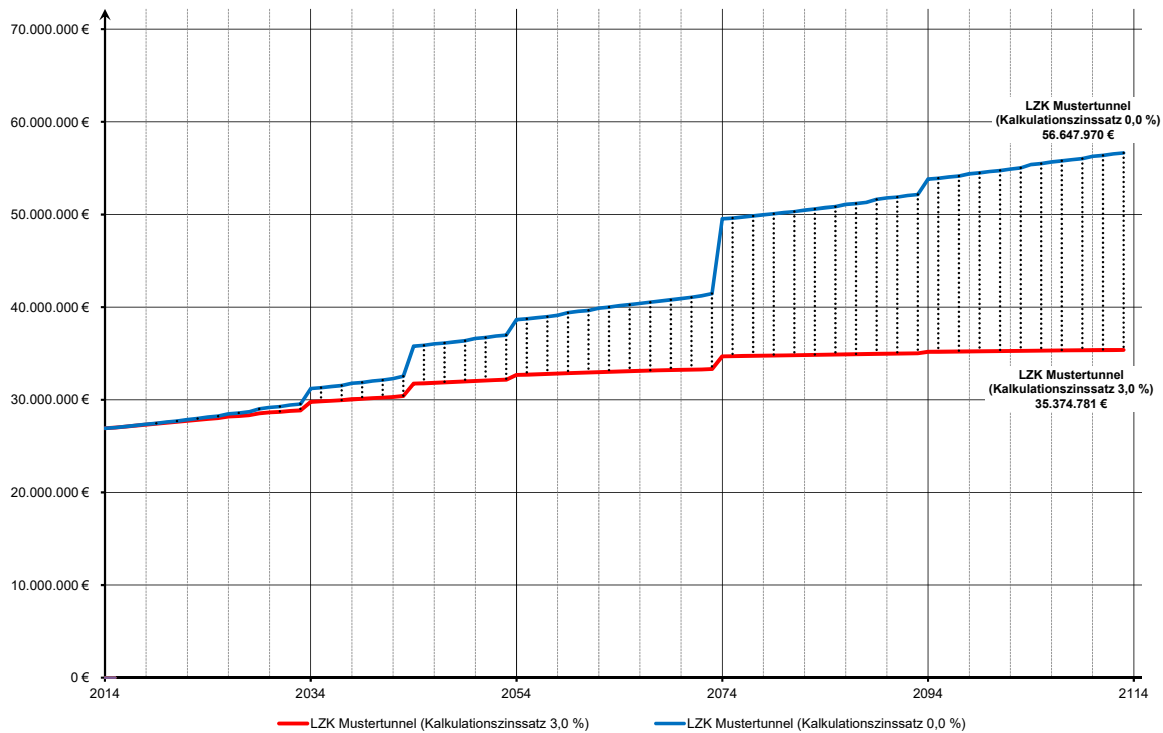


Abbildung 16: Beispielhafter Verlauf der Lebenszykluskosten unter Berücksichtigung der Kalkulationszinssätze von 3% und 0%

6 Auswertungen und Analysen

Für eine detaillierte LZK-Analyse bieten sich verschiedene weiterführende Verfahren an. Dadurch wird es möglich, Unsicherheiten, Risiken aber auch Bandbreiten abzubilden oder deutlich hervorzuheben. Auch lassen sich Hauptkostenverursacher identifizieren, die anschließend einer detaillierteren Betrachtung zur Risikoabgrenzung oder zur weiterführenden Optimierung unterzogen werden sollten.

6.1 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse dient dazu, die Beziehungen zwischen den in die Lebenszykluskostenrechnung eingehenden Daten sowie den Zielwerten zu untersuchen, Faktoren mit hoher Hebelwirkung zu identifizieren und die Transparenz der zumeist komplexen Abhängigkeiten zu erhöhen. Gleichzeitig ermöglicht die Sensitivitätsanalyse eine Abschätzung des Risikos, das aus den überwiegend unscharfen Eingangsgrößen resultiert.

Ausgehend vom ermittelten Kapitalwert (Lebenszykluskosten) wird untersucht, wie sensibel das Rechenergebnis auf Variation der eigentlich unsicheren Eingangsgrößen reagiert. Um Veränderungen im Ergebnis der entsprechenden Eingangsgröße zuordnen zu können, wird ausschließlich eine Inputgröße bzw. -gruppe verändert. Die Variation der Eingangsgrößen hat möglichst mit nachvollziehbaren, realistischen Merkmalsausprägungen zu erfolgen. Alle weiteren Rechengrößen bleiben gegenüber der Ausgangsrechnung unverändert. Dieses Vorgehen (*ceteris paribus*) ermöglicht eine Identifizierung der Eingangsgrößen, durch die der Zielwert besonders stark beeinflusst werden kann. Eine gezielte Informationsbeschaffung bezüglich dieser Daten führt letztlich zu einer Schärfung des mit Unsicherheiten belegten Zielwertes.³⁶

Das Ergebnis einer Sensitivitätsanalyse lässt sich übersichtlich in Diagrammen visualisieren. Bei der in Abbildung 17 dargestellten Diagrammform ermöglichen die Steigungen der einzelnen Zielwertverläufe einen Rückschluss auf den Einfluss der jeweiligen Eingangsgröße. Je steiler der Verlauf des Graphen, desto größer ist die Sensitivität des Zielwertes. Die Elastizität der Variablen lässt sich nicht immer über eine lineare Funktion abbilden. Daher wird empfohlen, die einzelnen Berechnungen im Rahmen einer Parametervariation zu wiederholen.

Erweiternd können zur Bestimmung der Sensitivität Szenarienanalysen, beispielsweise in Form von Bestcase- bzw. Worstcase-Szenarien, durchgeführt werden. Hierbei werden mehrere Parameter gleichzeitig in ihrer Ausprägung verändert und deren Auswirkungen untersucht.³⁷ Hierunter leiden jedoch die Transparenz und die Zuordenbarkeit von Actio und Reactio.

Die Kenntnis über die Stabilität der Berechnungsergebnisse und der Eingrenzung der für die Lebenszykluskosten relevanten Eingangsgrößen führt dazu, dass die Qualität der Ent-

³⁶ Vgl. GÖTZE, BLOECH (1993), BLOHM, LÜDER, SCHAEFER (2012).

³⁷ Vgl. FECK (2007).

scheidungsgrundlage zunimmt. Hieraus entsteht für den Anwender die Möglichkeit, Optimierungsansätze gezielt anzugehen.³⁸ Das weitere Vorgehen kann sich dabei auf die aussichtsreichsten Ansätze beschränken, um so den Aufwand für die Optimierungen in einem vertretbaren Rahmen zu halten.

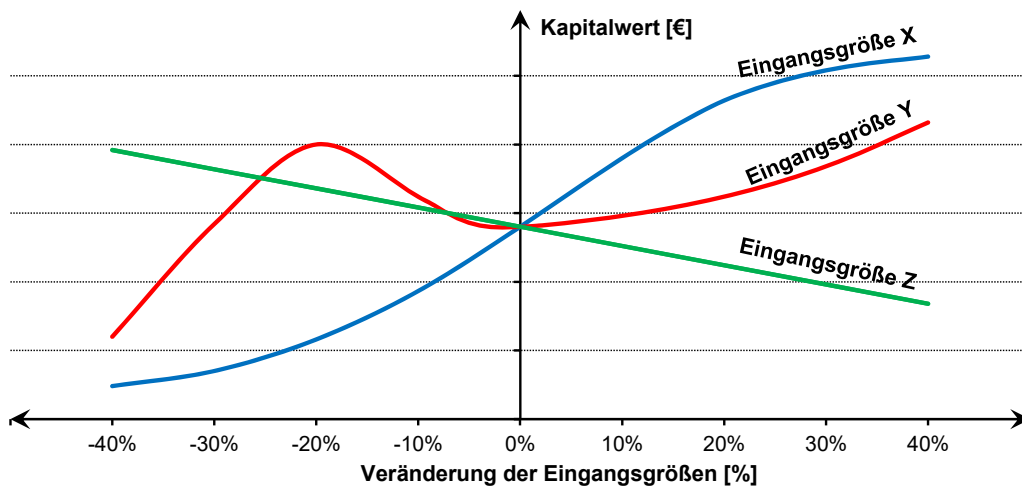


Abbildung 17: Darstellung der Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse

6.2 Pareto Prinzip

Ausgehend von der Überlegung, dass aus Zeit- und Kostengründen nicht für alle Indikatoren Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden können, ist zu empfehlen, sich auf jene Indikatoren zu beschränken, welche

- einen großen quantitativen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben und
- über deren tatsächlichen Werte Unsicherheit besteht.

Hierfür wird auf das Pareto-Prinzip abgestellt. Dieses beschreibt das statistische Phänomen, dass ein wesentlicher Teil des Gesamtergebnisses (z. B. 80 %) durch einen kleinen Anteil aller Aufwendungen (z. B. 20 %) bestimmt wird.

Für die Lebenszykluskostenrechnung bedeutet dies, dass sich für eine effektive Risikobewertung sowie eine gezielte Optimierung der Lebenszykluskosten, die detaillierte Informationsbeschaffung auf die wesentlichen Kostenfaktoren beschränken kann.

Für eine Bewertung der Kosten wird aus diesem Grund eine Rangfolgenbildung der einzelnen Bestandteile hinsichtlich ihrer Größe vorgenommen. Durch eine modulare Struktur der Lebenszykluskosten wird eine ungehinderte Identifizierung der wesentlichen Kostentreiber ermöglicht (Abbildung 18). Die hieraus als Leitgrößen identifizierten Prozesse werden anschließend auf ihre Risiko- oder auch Optimierungspotentiale untersucht. Für geeignete Größen erfolgt darauf aufbauend eine Sensitivitätsanalyse zur weiteren Eingrenzung der vorhandenen Risiken bzw. von Optimierungsmöglichkeiten.

³⁸ Die Generierung von Optimierungspotentialen hinsichtlich der Lebenszykluskosten ist nur möglich, sofern vorab die relevanten Einflussgrößen und die wesentlichen Zusammenhänge identifiziert und berücksichtigt wurden. Vgl. BECKER (1986).

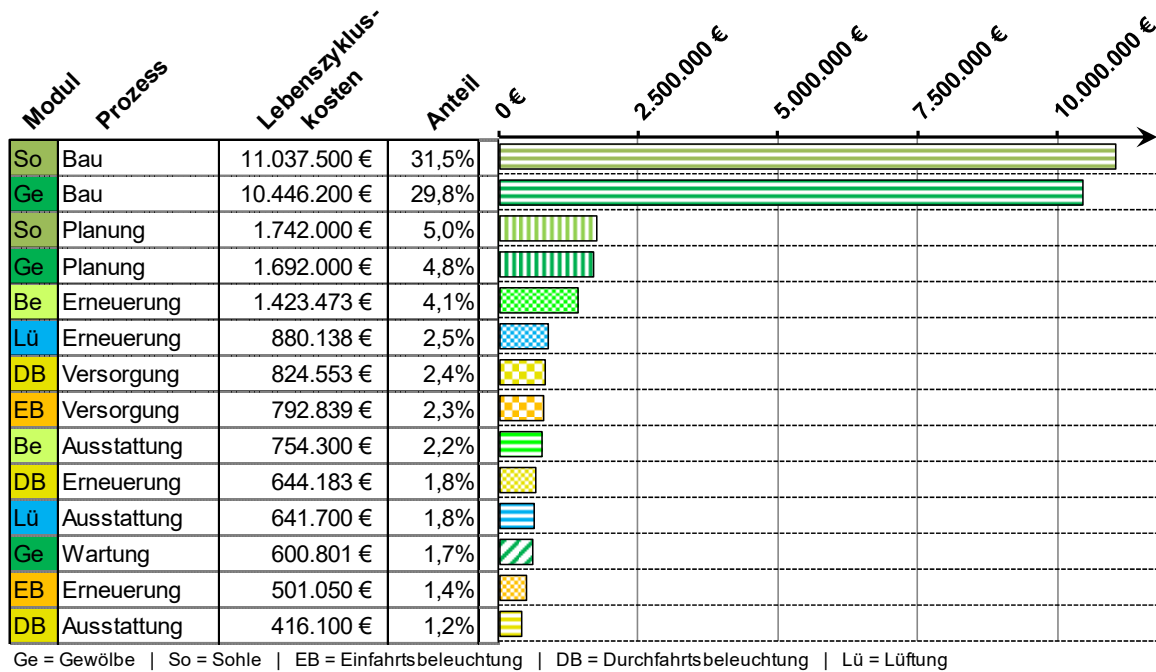


Abbildung 18: Rangfolgenbildung zur Identifikation signifikanter Prozesse (auszugsweise)

6.3 Erstellung einer ABC Kategorisierung

Bei der ABC-Analyse der Gesamtkosten werden in Kategorie A die Schwerpunkt-Positionen mit dem größten Anteil an den Lebenszykluskosten zusammengefasst. Für eine aussagekräftige Lebenszykluskostenrechnung sind diese Module unbedingt in den Untersuchungsrahmen einzubinden. Elemente der Kategorie B weisen eine deutlich verringerte Relevanz für die Gesamtkosten eines Tunnelbauwerkes auf. Module der Kategorie C besitzen nur einen untergeordneten Einfluss, so dass es sich aufgrund des Aufwandes zur Datenerhebung empfiehlt, diese Bestandteile nicht bzw. nur als pauschale Größen in Ansatz zu bringen, sofern sich keine genaueren Ansätze erheben bzw. ableiten lassen. Dies ermöglicht bei der Analyse der Kalkulation die Betrachtung nur derjenigen Positionen, die wesentlichen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben. Für eine Einschätzung der Relevanz von Modulen wird aus der Bewertung eines realen Bestandsprojekts eine Kategorisierung hinsichtlich des Einflusses auf die Gesamtkosten vorgenommen (Abbildung 19).

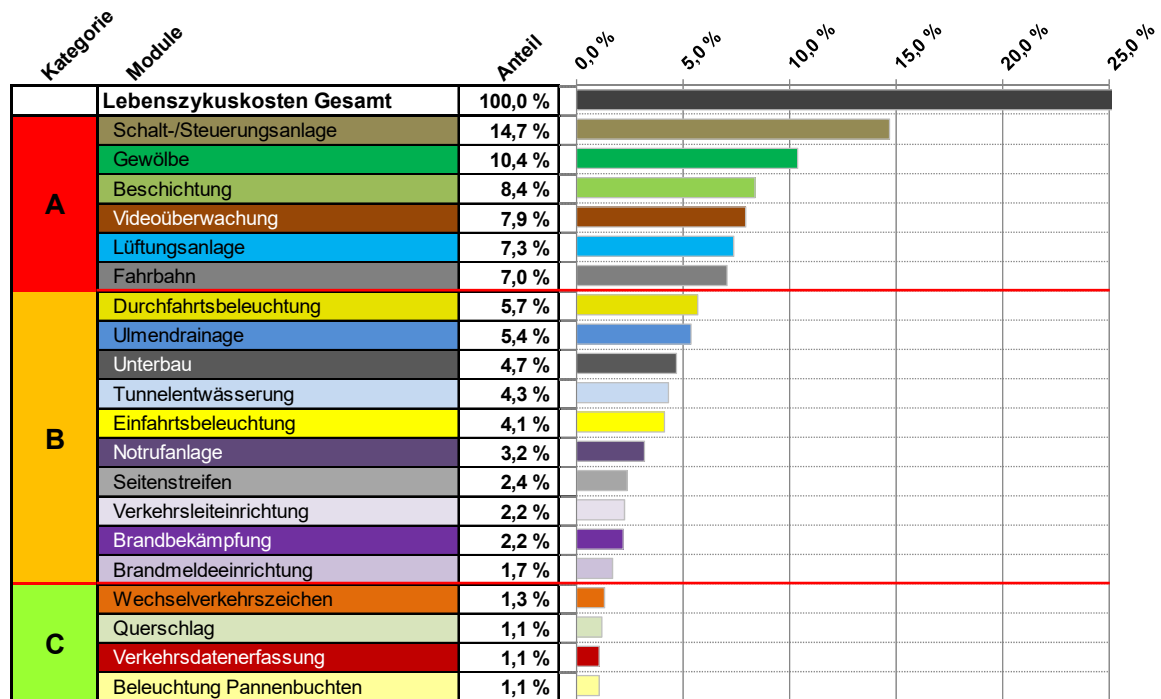


Abbildung 19: Auswertung zur Bestimmung der Relevanz von Modulen (auszugsweise)

6.4 Risikoanalyse zur Berücksichtigung von Unsicherheiten

Bei den bisherigen Untersuchungen wurden sämtliche Rechengrößen (Zahlungen, Anfallszeitpunkt und Zinssatz) als deterministische Größen eingesetzt. In Wirklichkeit handelt es sich bei einer Lebenszykluskostenrechnung um eine modellhafte Abbildung zukünftiger Ereignisse. Die verwendeten Daten und der sich daraus ergebende Eintritt der angenommenen Umweltzustände kann also nicht mit Sicherheit vorausgesagt werden.

Die Auswirkungen möglicher Veränderungen lassen sich allerdings durch Einbindung einer Risikoanalyse sichtbar machen. Hieraus können Wahrscheinlichkeiten bestimmt werden, in welchen Grenzen sich der Zielwert einstellen wird.

Die Einbindung der Risikoanalyse in die aufgezeigte Methodik zur Bestimmung der Lebenszykluskosten erfolgt unter Rückgriff auf die Monte-Carlo-Simulation.³⁹ Der Vorteil dabei ist, dass auf das deterministische Rechenmodell – ohne weitere Anpassung – zurückgegriffen werden kann. Es sind lediglich die bislang deterministischen Eingangsgrößen durch probabilistische Rechengrößen zu ersetzen (Abbildung 20).

Die Bestimmung der probabilistischen Eingangsgrößen ist der wesentliche Schritt zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Lebenszykluskostenrechnung. Dazu sind die unsicheren Eingangsgrößen im Vorfeld mit Hilfe von diskreten bzw. stetigen Verteilungsfunktionen zu beschreiben. Um an dieser Stelle den Aufwand ebenfalls zu beschränken, ist auf die ergebnisrelevanten Einflussgrößen, entsprechend dem Ergebnis einer Sensitivitätsanalyse bzw. der ABC-Kategorisierung (Kapitel 6.1 und 6.3), abzustellen.

39 Unter dem Begriff „Monte-Carlo-Simulation“ werden verschiedene Simulationsverfahren zusammengefasst, bei denen zur Zielgrößenbestimmung Zufallszahlen zum Einsatz kommen. Eine eingehende Erläuterung der Monte-Carlo-Simulation ist beispielsweise BOUSSABAIN, KIRKHAM (2006); COTTIN, DÖHLER (2013), FISHMAN (1996) oder ENGELHARDT (2015) zu entnehmen.

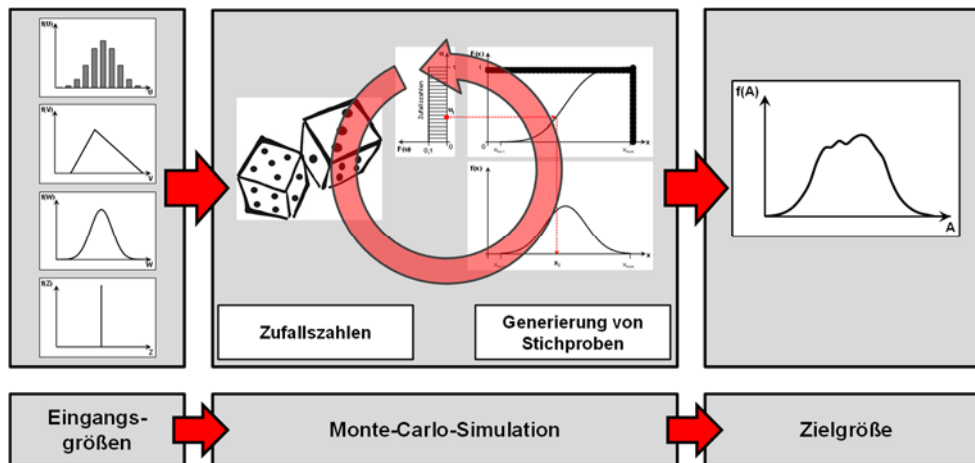


Abbildung 20: Einbindung einer Monte-Carlo-Simulation zur Lebenszykluskostenrechnung⁴⁰

Das Ergebnis der Monte-Carlo-Simulation umfasst eine Bandbreite aller möglichen Ergebnisausprägungen entsprechend der Anzahl der Simulationsdurchläufe. Hieraus lassen sich Rückschlüsse über die eigentliche Wahrscheinlichkeitsverteilung der Lebenszykluskosten und die sich daraus ergebenden Risikomaßzahlen ableiten. Anders als bei der deterministischen Ermittlung erfordert das nicht eindeutige, wahrscheinlichkeitsbasierende Ergebnis der Gesamtkosten eine eigenständige Analyse und Bewertung. Dabei ist zur Auffindung der aus ökonomischer Sicht vorteilhaftesten Ausgestaltung zusätzlich die Risikobereitschaft (avers, neutral, affin) der Entscheidungsträger einzubeziehen.

6.5 Benchmarking

Das bisherige Vorgehen zur Optimierung der Kosten von Tunnelbauwerken konzentriert sich im Wesentlichen auf die Planungsphase im Zuge eines Neubaus bzw. einer grundlegenden Sanierung von Bestandsbauwerken. Anstelle dieser Singularität ist es zielführender, diese Option zur Kostenreduzierung dauerhaft in allen Lebensphasen in Form einer kontinuierlichen Optimierung zu implementieren. Das in anderen Bereichen bereits weitverbreitete Konzept des Benchmarkings erlaubt diese fortwährende Generierung von Optimierung- und Verbesserungspotentialen.

Vorteil des Benchmarkings ist neben dem Gewinn von Kennzahlen auch die Auseinandersetzung mit den für die Kennzahlen verantwortlichen Leistungen und Prozessen. Dadurch bildet sich ein Bewusstsein für die interne Struktur und die realen Arbeitsabläufe. Durch die fortwährende Datenerhebung erhält der Tunnelbetreiber einen Überblick über die laufenden Kosten sowie den Gesamtzustand des Bauwerkes. Hieraus ist die Relevanz der einzelnen Kostengrößen ableitbar und vorhandene Leistungslücken oder Abweichungen werden veranschaulicht. Dies erleichtert die Strategieausrichtung für die Erhaltung (bzw. Bauwerksmanagement) und unterstützt die Entscheidungsfindung für zukünftige Investitionen.

Dabei zielt das Benchmarking nicht nur auf die Gesamtlebenszykluskosten ab, sondern ermöglicht nach Identifikation der relevanten einzelnen Parameter oder Prozesse einen Abgleich mit vorhandenen bzw. zu generierenden Kennzahlen.

⁴⁰ ENGELHARDT (2015).

7 Anwendungsbeispiel für einen Mustertunnel

7.1 Einleitung und Projektbeschreibung Mustertunnel

Die in der Empfehlung erläuterte Vorgehensweise zur Ermittlung der Lebenszykluskosten für Straßentunnel wird im Folgenden am Beispiel eines Mustertunnels vorgestellt.

Es wird darauf hingewiesen, dass die verwendeten Daten nicht auf einem bestehenden Tunnelbauwerk basieren und daher nur modifiziert auf andere Tunnel übertragbar sind. Es wurden umfassende Vereinfachungen und Abschätzungen vorgenommen, welche sich an tatsächlichen Kosten, Literatur- oder Erfahrungswerten orientieren. Bei dem betrachteten Mustertunnel handelt es sich um einen innerstädtischen Straßentunnel mit den Daten nach Tabelle 3:

Parameter	Mustertunnel	
Tunnellänge	550 m	
Fertigstellung	2007	
Anzahl Tunnelröhren	1 Tunnelröhre	
Anzahl der Fahrstreifen	1 Fahrstreifen je Fahrtrichtung	
Betriebsart	Gegenverkehr	
Bauart	150 + 100 m 300 m	offene Bauweise bergmännische Bauweise
Regelquerschnitt	RQ 11 t	
Ausstattung	u.a. 2 Notausgänge, Strahlventilatoren, Brandmeldeanlage, Videoüberwachungsanlage	

Tabelle 3: Merkmale Mustertunnel

7.2 Vorgehen

Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Lebenszykluskosten eines Tunnelbauwerks wird anhand eines strukturierten Verfahrensablaufs vorgestellt (siehe Abbildung 9) und bei der Bearbeitung dieses Anwendungsbeispiels entsprechend umgesetzt:

1. Ausgangslage: Festlegung der Daten des Untersuchungsrahmens (Betrachtungszeitraum, relevante Bauwerksdaten, Fokus der Betrachtung etc.)
2. Strukturierung: Erstellung des Grundgerüsts der Module
3. Modulbildung
4. Kostenermittlung
 - 4.1 Überprüfung, welche Daten vorliegen bzw. erfragt oder ermittelt werden müssen
 - 4.2 Ableiten von Regelmäßigkeiten (Kosten und zeitliche Intervalle)
 - 4.3 Ausfüllen der Modulblätter
5. Überführung in die Kostenmatrix
6. LZK-Berechnung
7. Interpretation

7.3 Schritt I: Untersuchungsrahmen

Für die Analyse der Lebenszykluskosten werden die übergeordneten Phasen Planung, Herstellung und Nutzung bis hin zum Ende der Gebrauchstauglichkeit betrachtet. Es handelt

sich um einen Neubau, für den der Untersuchungszeitraum in Anlehnung an die mittlere Gesamtlebensdauer gemäß ABBV mit 100 Jahren angesetzt wurde.

Die nachfolgende Darstellung umfasst die Lebenszykluskostenbestimmung für das beschriebene Tunnelbauwerk. Zur Veranschaulichung der Methodik wird das gesamte Tunnelbauwerk einer Betrachtung unterzogen, wobei die Anzahl der genauer betrachteten Module eingeschränkt wird.

Im vorliegenden Beispiel wird das Verfahren exemplarisch an einer Ausstattungsvariante dargestellt. Auf den Vergleich mit anderen Varianten wird verzichtet. Die Ermittlung des Kapitalwerts für jede Vergleichsvariante würde analog erfolgen und kann auch gezielt für einzelne Module erfolgen.

7.4 Schritt II: Strukturierung und Schritt III: Modulbildung

Je nach gewünschtem Detaillierungsgrad bzw. vorhandener Datenstruktur werden die Module festgelegt. Im vorliegenden Fall wurden für die Systeme Tunnelkonstruktion und Tunnelausstattung jeweils sieben eigenständige Module gewählt, die im Fokus der weiteren Betrachtung stehen sollen. Zudem wurde jeweils eine Restposition geschaffen, in welcher die nicht detailliert betrachteten Kosten zusammengefasst sind.

Tunnelkonstruktion

- Gewölbe geschlossene Bauweise
- Sohle geschlossene Bauweise
- Sohle offene Bauweise
- Wände offene Bauweise
- Decke offene Bauweise
- Entwässerung (Bauwerk)
- Fahrbahn
- "REST" Tunnelbauwerk

Tunnelausstattung

- Tunnelautomation
- Videoüberwachung
- Lüftungsanlage
- Beleuchtung
- Brandmeldeanlage
- Tunnelsperranlage
- Entwässerung (Ausstattung)
- "REST" Tunnelausstattung

7.5 Schritt IV: Kostenermittlung

7.5.1 Initialkosten

Die Herstellungskosten sind, wie im hier untersuchten Fall, nachvollziehbar dokumentiert oder lassen sich für zukünftige Bauvorhaben aufgrund von Erfahrungswerten gut abschätzen. Die übliche Einteilung in Positionen eines Leistungsverzeichnisses ermöglicht es, die Kosten den entsprechenden Modulen zuzuordnen.

Die Herstellungskosten, welche nicht eindeutig einem der genannten Module zugeordnet werden konnten, wurden entweder auf mehrere in thematischem Zusammenhang stehende Module verteilt oder den allgemeinen Modulen "Rest Tunnelbauwerk" bzw. "Rest Tunnelausstattung" zugeordnet.

Die Planungskosten liegen im Unterschied dazu zumeist nicht modulbezogen vor. Eine Aufteilung gemäß Verteilung der Herstellungskosten würde sich an den Grundlagen der HOAI

orientieren; es kann jedoch auch sinnvoll sein, eine inhaltlich basierte prozentuale Verteilung vorzunehmen.

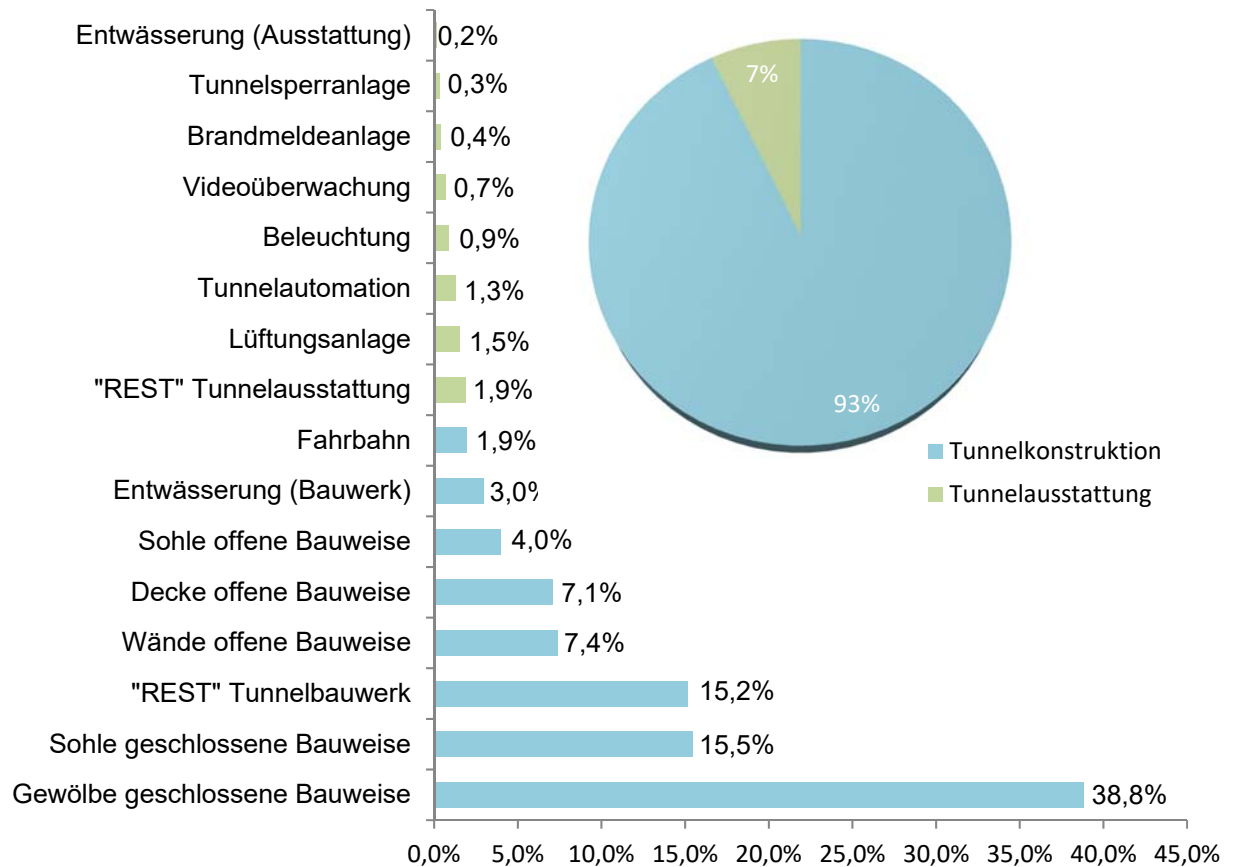


Abbildung 21: Verteilung der Initialkosten (Planung + Bau/Ausstattung)

7.5.2 Folgekosten

Die Ermittlung der Folgekosten stellt die größere Herausforderung dar. Konkrete Erfahrungswerte zu den benötigten Daten, wie Nutzungsdauern und Wartungszyklen mit den dazugehörigen Kosten, liegen nur begrenzt vor bzw. variieren stark. Hier empfiehlt es sich, auf Erfahrungswerte der Nutzungsdauern zurückzugreifen; als Kostenansatz der Wartung können Wartungsverträge die Basis bilden.

Gleichzeitig können die prognostizierten Kosten und ihr künftiger Eintritt, welche vorwiegend weit in der Zukunft liegen, ohnehin nur unter Unsicherheit vorausgesagt werden (siehe Kapitel 6.4).

Wird, wie in diesem Beispiel, auf bestehende Daten von Tunnelbetreibern zurückgegriffen, sind diese überwiegend nach Kostenarten differenziert dokumentiert, aber nicht immer auf einzelne Bauteile und Ausstattungskomponenten bezogen. So können die Energiekosten für das gesamte Bauwerk als Summe erfasst sein, aber nicht auf die verschiedenen Verbraucher aufgeteilt vorliegen. In diesen Fällen müssen abermals Annahmen für die prozentuale Verteilung auf die einzelnen Module getroffen werden. Im vorliegenden Fall konnte diese Aufteilung durch die Zuhilfenahme der Leistungsbilanz der Stromverbraucher im Tunnel erfolgen.

Die Kosten für die Erneuerung beinhalten den Rückbau, die Neuplanung und den Einbau der neuen Bauteile und Ausstattungselemente. Da sich künftige Preisänderungen unter Berücksichtigung des technischen Fortschritts nur unter Unsicherheit vorhersagen lassen, wurden die Kosten auf Basis der Initialkosten abgeschätzt.

7.5.3 Modulblätter

Für die übersichtliche Zusammenstellung der ermittelten Datenansätze wurden Modulblätter erstellt, welche alle Initial- und Folgekostenkosten für ein Modul erfassen.

Modulblatt Tunnelausstattung

Bereich:	Ausstattung	
Modul:	Lüftungsanlage	Kürzel: LUF

Prozess	Leistungen	Kosten [€]	Zeitl. Faktor [in Jahren]
Initialkosten			
	Planung	45.000,00 €	-
	Ausstattung (Bau)	450.000,00 €	-
Folgekosten			
Energie- und Wasserversorgung/ Überwachung/ Übungen/ Sonstiges	Strom Rest	30.000,00 €	1
	Versicherungen	115,00 €	1
Wartung/ Inspektion/ Instandsetzung	Bau - Fremdleistungen	4.500,00 €	3
	Wartung/Instandhaltung	10.000,00 €	1
	Wartung/Instandhaltung zusätzl.	7.000,00 €	2
	Wartung Intern	500,00 €	1
Verbesserung/ Erneuerung	Austausch komplett	500.000,00 €	15
	Teilaustausch (Sensorik)	35.000,00 €	8

Abbildung 22: Auszug Modulblatt Tunnelausstattung

7.6 Schritt V: Überführung in eine Kostenmatrix

Die ausgefüllten Modulblätter wurden im Anschluss in eine Kostenmatrix überführt. Die Kostengrößen für jedes Modul werden darin den Anfallszeitpunkten zugeordnet und für jedes Jahr über den gesamten Untersuchungszeitraum zusammengestellt. Je nach Auswertungsziel hätten alle Leistungen eines Moduls auch zusammengefasst betrachtet werden können.

Zeit-/Kostenmatrix

Kürzel	Modul j	Zeitpunkt t [Jahre]						
		Summe	0	1	2	3	4	5
...
LUF	Planung	45.000,00 €	45.000,00 €					
LUF	Ausstattung (Bau)	450.000,00 €	450.000,00 €					
LUF	Strom	300.000,00 €		30.000,00 €	30.000,00 €	30.000,00 €	30.000,00 €	...
LUF	Versicherungen	1.150,00 €		115,00 €	115,00 €	115,00 €	115,00 €	...
LUF	Bau - Fremdleistungen	148.500,00 €		0,00 €	0,00 €	4.500,00 €	0,00 €	...
...

Abbildung 23: Auszug Zeit-Kostenmatrix exemplarisch für ein Modul (hier LUF)

7.7 Schritt VI: LZK-Berechnung mit Anwendung des Kapitalwertverfahrens

Der Kapitalwert dient in der Planungsphase als Methode, die Wirtschaftlichkeit einer Investition zu beurteilen bzw. verschiedene Konstruktions- und Ausstattungsvarianten gegenüberzustellen.

Einzahlungen sind für das betrachtete Beispiel nicht vorhanden. Ungewissheitsgrade von Zahlungen und Preissteigerungen werden der Einfachheit halber ebenfalls nicht berücksichtigt.

Als Beginn der Lebenszyklusberechnung und gleichzeitig als Referenzzeitpunkt $t=0$ wird der Zeitpunkt der Inbetriebnahme angesetzt. Bis auf die zum Zeitpunkt $t=0$ vorhandenen Initialkosten (Planungs-, Bau- und Ausstattungskosten) sind daher alle Folgekosten zu diskontieren.

Der Kalkulationszinssatz wurde entsprechend dem im Bundesverkehrswegeplan 2030 vorgegebenen Realzins von 1,75% angenommen.

Der Verlauf der Lebenszykluskosten kann als Zusammenfassung der jährlichen abgezinsten Kosten angegeben werden.

7.8 Schritt VII: Interpretation

Die Initialkosten des Tunnelbauwerks sowie die Folgekosten der Tunnelausstattung bestimmen die Lebenszykluskosten. In den folgenden Darstellungen ist zu erkennen, dass der gewählte Kalkulationszinssatz große Auswirkungen auf das Verhältnis der Folgekosten zu den Initialkosten hat. Um die Bedeutung der Folgekosten abschätzen zu können, wurde daher eine vergleichende Auswertung mit einem Kalkulationszinssatz von 0% durchgeführt. Bei entsprechend differenziert vorliegenden Kosten können die Anteile der jeweiligen Module dezidiert untersucht werden und Strategien und Optimierungen abgeleitet werden (z.B. Umrüstung auf LED).

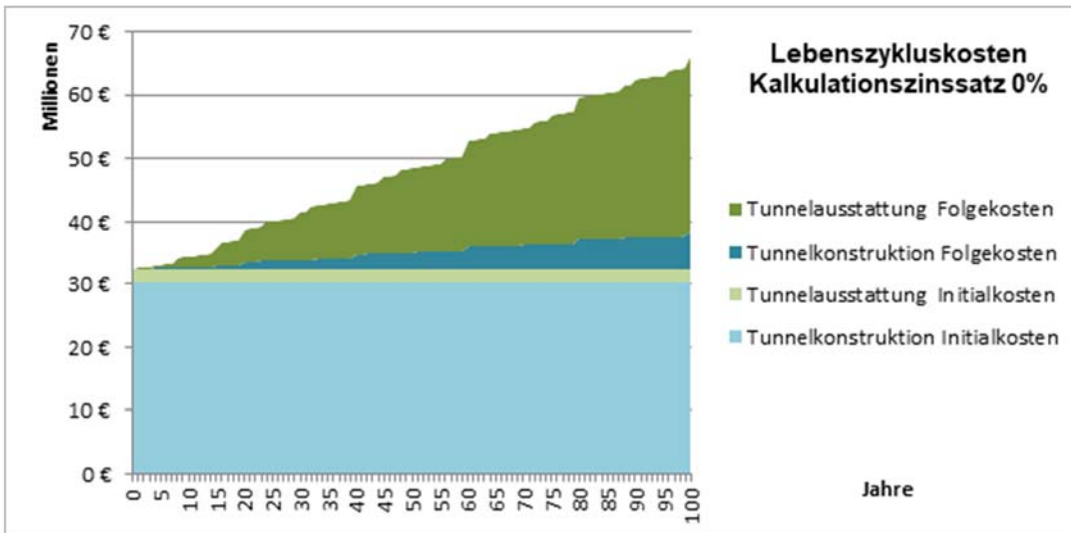


Abbildung 24: Verlauf der Lebenszykluskosten (Kalkulationszinssatz 0%)

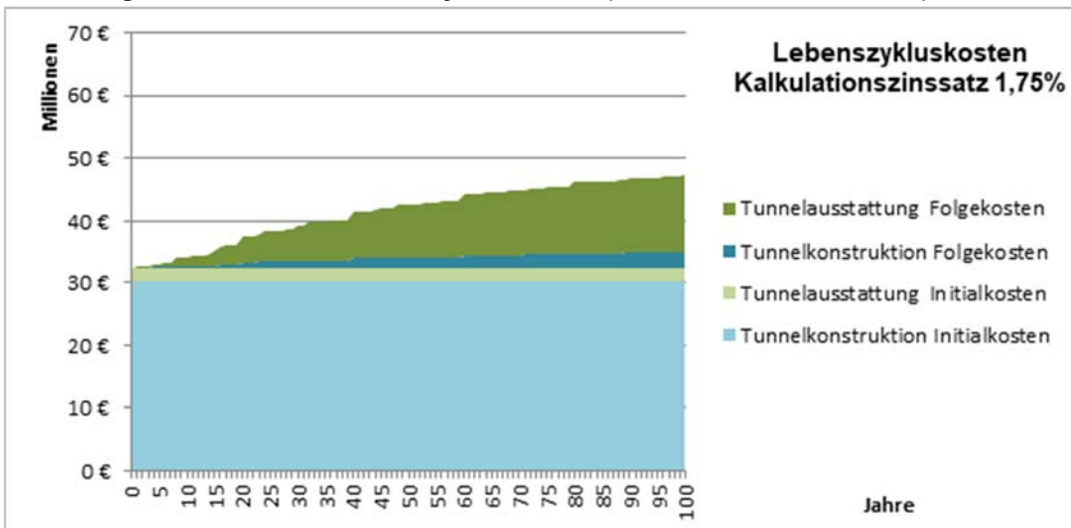


Abbildung 25: Verlauf der Lebenszykluskosten (Kalkulationszinssatz 1,75%)

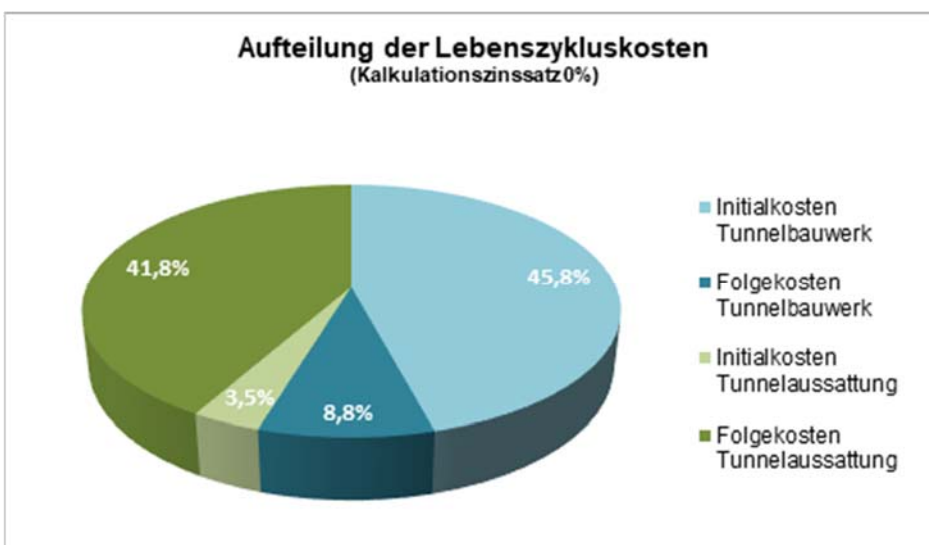


Abbildung 26: Aufteilung der Lebenszykluskosten (Kalkulationszinssatz 0%)

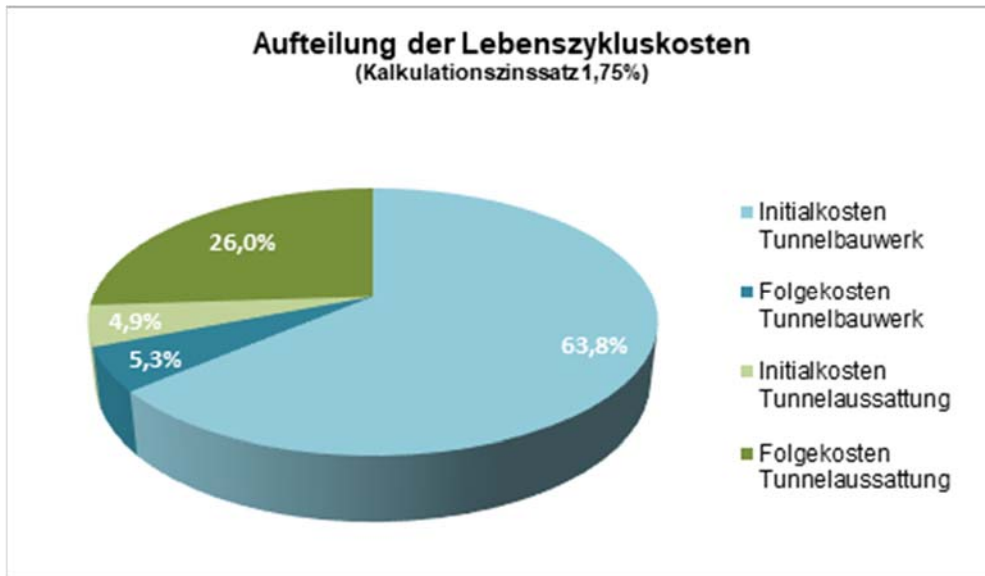


Abbildung 27: Aufteilung der Lebenszykluskosten (Kalkulationszinssatz 1,75%)

8 Zusammenfassung und Fazit

Mit der vorliegenden Empfehlung wird ein Verfahren vorgestellt, um die Wirtschaftlichkeit zukünftiger Investitionen bei Tunnelbauprojekten im Hinblick auf den gesamten Lebenszyklus bewerten und vergleichen zu können.

Die Grundlage bilden neben der Kenntnis der im Tunnel vorhandenen Bauteile und Ausstattungselemente umfassende Datenansätze für Kosten und Nutzungszeiträume.

Sind die Herstellungskosten bereits in der frühen Planungsphase bekannt, ist die Ermittlung der Folgekosten mit einer Aufwandsabschätzung oder der Recherche nach vorhandenen Erfahrungswerten verbunden. Diese liegen zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht umfangreich vor und liegen damit im Fokus der Betrachtung.

Die zukünftige Datenerfassung ist daher gezielt auf die Idee der Lebenszykluskosten auszurichten, einen Datenpool mit den entsprechenden Kosten und Nutzungsdauern als entscheidende Grundlage aufzubauen.

9 Literaturverzeichnis

ABBV (2010)

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): *Verordnung zur Berechnung von Ablösungsbeträgen nach dem Eisenbahnkreuzungsgesetz, dem Bundesfernstraßengesetz und dem Bundeswasserstraßengesetz (Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung – ABBV)*. Bonn, 2010.

ADDEN, THEWES, LEHAN (2016)

Adden, H.; Thewes, M.; Lehan, A.: *Life-Cycle Costing. An Economic Approach to Evaluate the Operational Equipment of Tunnels*. Proceedings of the ITA World Tunnel Congress 2016, San Francisco, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME).

ASB-ING (2013)

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): *Anweisung Straßeninformationsbank, Teilsystem Bauwerksdaten (ASB-ING)*. Bonn, 2013.

BECKER (1986)

Becker, C.: *Lebenszykluskosten. Grundlagen und Anwendung bei „Serienprodukten“*. In: Symposium Life Cycle Cost (1985), Hrsg. Schelle, H., Gesellschaft für Projektmanagement INTERNET Deutschland e. V. München, 1986, S. 23-50.

BLOHM; LÜDER; SCHAEFER (2012)

Blohm, H.; Lüder, K.; Schaefer, C.: *Investition: Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und Investitionsrechnung*. Vahlen Verlag, München, 2012.

BMVBS (2010)

Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)*. Bonn, 2010.

BOUSSABAIN; KIRKHAM (2006)

Boussabaine, A.; Kirkham, R.: *Whole Life-cycle Costing – Risk and risk responses*. Blackwell Publishing, Oxford (UK), 2004, reprinted 2006.

BVWP (2030)

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): *Bundesverkehrswegeplan 2030*. Bonn, 2016.

COTTIN, DÖHLER (2013)

Cottin, C.; Döhler, S.: *Risikoanalyse*. 2. Auflage, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2013.

DIN 31051 (2012)

DIN 31051: *Grundlagen der Instandhaltung*. Beuth Verlag, Berlin, 2012.

- DIN 1076 (1999)
DIN 1076: *Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung*. Beuth Verlag, Berlin, 1999.
- DIN EN 13306 (2018)
DIN EN 13306: *Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung*. Beuth Verlag, Berlin, 2018.
- DMRB (1999)
Design Manual for Roads and Bridges (DMRB), Volume 2, Section 2, Part 9, BD 78/99: *Design of Road Tunnels*. London: Department for Transport, August 1999.
- ENGELHARDT (2015)
Engelhardt, S.: *Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken – Modulares Prozessmodell zur ökonomischen Optimierung von Straßentunneln*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Institut für Baubetrieb, Dr. Hut Verlag, München, 2015.
https://athene-forschung.unibw.de/92541?query=Engelhardt&show_id=101423
- FECK (2007)
Feck, N.: *Monte-Carlo-Simulation bei der Lebenszyklusanalyse eines Hot-Dry-Rock-Heizwerkes*. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Energiesysteme und Energiewirtschaft, Ausgabe 20, Bochum, 2007.
- FISHMAN (1996)
Fishman, G. S.: *Monte Carlo – Concepts, Algorithms and Applications*. Springer Verlag, New York (USA), 1996.
- FGSV (1996)
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): *Dokumentation von Straßentunneln*. Eigenverlag, Köln, 1996.
- FGSV (2011)
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): *Merkblatt für die Kontrolle, Wartung und Pflege von Straßentunneln (M KWPT)*. Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement. Eigenverlag, Köln, 2011.
- FSV (2014)
Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene Verkehr (FSV): *Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS); RVS 13.03.41 – Qualitätssicherung bauliche Erhaltung – Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten – Straßentunnel – Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen*. Eigenverlag, Wien (AUT), 2014.
- GÄNßMANTEL et al. (2005)
Gänßmantel, J.; Geburtig, G.; Schau, A.: *Sanierung und Facility Management. Nachhaltiges Bauinstandhalten und Bauinstandsetzen*. Springer Verlag, 2005.
- GÖTZE, BLOECH (1993)
Götze, U.; Bloech, J.: *Investitionsrechnung – Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*. Springer Verlag, Berlin, 1993.

ISO (2008)

ISO/FDIS 15686-5: *Buildings and constructed assets – Service-life planning – Part 5: Life-cycle costing/Gebäude und konstruierte Anlagen – Lebensdauerplanung – Teil 5: Lebenszykluskosten*. International Organization for Standardization, ISO Copyright Office, Genf (CH), 2008.

KOSTRZEWA (2015)

Kostrzewa, M.: *Tunnelbetrieb in Deutschland*. In: Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach (Hrsg.), *BAST Tunnelsymposium 2015*, S. 5-9.

LEHAN (2017)

Lehan, A.: *Bewertung des bisherigen Ansatzes der theoretischen Nutzungsdauer der betriebs- und sicherheitstechnischen Ausstattung von Straßentunneln im Rahmen der Lebenszykluskostenanalyse*. Bundesanstalt für Straßenwesen, vorläufige Erhebung zum Bericht zum Projekt F1100.2315006, Bergisch Gladbach, 2017.

PIARC (2004)

PIARC – Technical Committee C.4 Road Tunnel Operations: *Life cycle aspects of electrical road tunnel equipment*, La Défense cedex: World Road Association, 2012.

RABT (2006)

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): *Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT)*. Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit. Eigenverlag, Köln, 2006.

SIA (2004)

Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, „*Projektierung Tunnel - Straßentunnel*“, SN 505 197/2, Zürich (CH), 2004.

THEWES; VOGT (2014)

Thewes, M.; Vogt, P.: *Modellentwicklung für die Lebenszykluskostenanalyse von Straßentunneln* (The development of a model for the life-cycle cost analysis of road tunnels). *Bauingenieur* 10, 2014, S. 421-430.

VOGT (2013)

Vogt, P.: *Modell für die Lebenszykluskostenanalyse von Straßentunneln unter Beachtung technischer und finanzieller Unsicherheiten*. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften. Shaker Verlag, 2013.
<http://www-brs.ub.ruhr-uni-bochum.de/netahtml/HSS/Diss/VogtPeter/diss.pdf>

WELTE (2004)

Welte, U.: *Knowing the useful life period of technical equipment – a prerequisite for safe tunnel operations*. In: *Proceedings of 2nd International Conference Tunnel Safety and Ventilation*. Graz, 2004.