Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 94 (2003)
Heft: 24-25

Artikel: Ein Modell zur Berechnung der Kostenwirksamkeit von Investitionen
Autor: Müller, Pascal / Bader, Jürg / Feld, Hubert
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-857629

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 11.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Ein Modell zur Berechnung der Kostenwirksamkeit von Investitionen

Beispiele für Life-Cycle-Cost-Berechnungen für einen 170-kV-Leistungsschalter und ein Unterwerk

Hinsichtlich der Gewinnoptimierung erfordern Marktliberalisierung und Verknappung der Ressourcen von den Energieversorgern eine detaillierte Kenntnis der zu erwartenden Lebenslaufkosten eines Investitionsgutes. In diesem Beitrag wird ein Berechnungsmodell vorgestellt, das neben den bekannten bzw. kalkulierbaren Kosten wie Instandhaltungs- und Betriebskosten auch durch Ausfälle und Störungen bedingte, stochastisch auftretende Kosten einschliesslich Amortisation und Verzinsung berücksichtigt. Die Methode macht diese nicht planbaren Kosten in Abhängigkeit der Zuverlässigkeit der Netzkomponenten einer Investitionsrechnung zugänglich, was Sensitivitätsbetrachtungen ermöglicht. Das Berechnungsmodell erlaubt es beispielsweise, gleichartige Komponenten zu vergleichen, einzelne spezifische Komponenten oder ganze Systeme zu betrachten und die Auswirkungen der Zuverlässigkeitskennzahlen auf die Gesamtkosten zu untersuchen.

Die Ablehnung des Energiemarktgesetzes im Frühjahr 2003 verhindert vorläufig eine Liberalisierung des Strommarktes in der Schweiz, so wie diese in einigen europäischen Staaten bereits exisitiert. Längerfristig lohnt es sich für heimische Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) trotzdem, sich mit den Konsequenzen einer Liberalisierung auseinander zu setzen, die sich z.B. aus dem Monopolverlust bzw. der Konkurrenzierung durch überregionale Anbieter auf dem Heimmarkt ergeben. Generell wird sich so etwas auf der Einnahmenseite durch eine Verringerung der Gewinnmarge bemerkbar machen und damit das ökonomische Verhalten eines EVU nachhaltig beeinflussen. Es wird für die Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit unterschiedlichste Strategien zur Gewinnmaximierung einsetzen müssen, was sich wiederum auf das wirtschaftliche Umfeld des EVU auswirkt.

Pascal Müller, Jürg Bader, Herbert Feld

Werden beispielsweise die Investitionen in das Stromnetz reduziert, wird damit auch die Konkurrenzsituation unter den Herstellern von Netzkomponenten verstärkt. Damit werden diese Komponenten billiger, möglicherweise muss das EVU aber auch eine Verschlechterung der Komponentenqualität berücksichtigen. Letzteres kann sich mittelfristig wiederum auf die Einnahmensseite des EVU auswirken.

Beim Verfassen dieses Beitrags gingen die Autoren fürs Erste davon aus, dass Investitionsentscheide in erster Linie Vergleiche von Varianten sind, die einen gleichen oder ähnlichen Nutzen haben und sich in erster Näherung vor allem auf der Kostenseite, der Qualität und der Instandhaltbarkeit der Betrachtungseinheit unterscheiden. Ferner wird das wirtschaftliche Umfeld als statisch erachtet. Neben den «klassischen» Kosten, die im Folgenden als vorhersagbare oder deterministische Kosten bezeichnet werden, wird eine weitere wichtige Kostenklasse identifiziert: Die nicht vorhersagbaren bzw. stochastisch auftretenden Kosten, die direkt von der Qualität der Komponente und auch von der Einbettung im übergeordneten System (Stromnetz) abhängig sind.

Der vorliegende Beitrag stellt eine Fortsetzung früherer Publikationen dar [1,2]. Die Methode und deren Anwendung auf das Beispiel eines Hochspannungsleistungsschalters sind dort bereits detailliert dargelegt, werden aber hier nochmals vorgestellt. Anhand des Beispiels eines Unterwerks soll die Anwendbarkeit auch auf grössere und komplexere Netzkomponenten betrachtet werden.

Lebenslaufkosten – Life Cycle Cost

Zum Vergleich verschiedener Investitionen mit unterschiedlichen Lösungen und gleichem Nutzen reicht es aus, die von den Investitionen verursachten Kosten zu ermitteln und untereinander zu vergleichen. Die Gesamtheit dieser Kosten wird als Lebenszyklus-Kosten LCC (Life Cycle Cost) bezeichnet und beinhaltet alle im Nutzungszeitraum entstehenden Kosten.

Da sind zunächst die Gestehungskosten: Dies sind alle Kosten, die mit der Tätigung der Investition direkt zusammenhängen. Kosten, die von der Investition im Laufe des weiteren Lebens verursacht werden, wie Kosten für geplante Instandhaltung oder Betriebs- und Entsorgungskosten, sind vorhersehbar und bei Tätigung der Investition bereits bekannt. Kosten wie Reparatur- und Betriebsunterbruchskosten hingegen sind ereignisbedingt dem Zufall unterworfen und müssen abhängig von der Funktion und den möglichen Folgen des Ausfalls der betrachteten Einheit ermittelt werden. Das zeitliche Auftreten der Kosten wird in Bild 1 verdeutlicht.

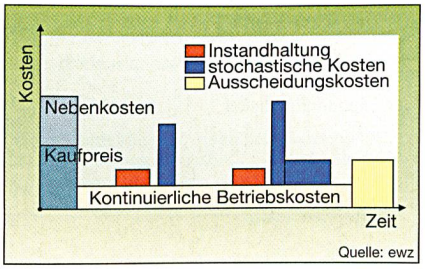

Bild 1 Kosten-Eintritt im zeitlichen Ablauf

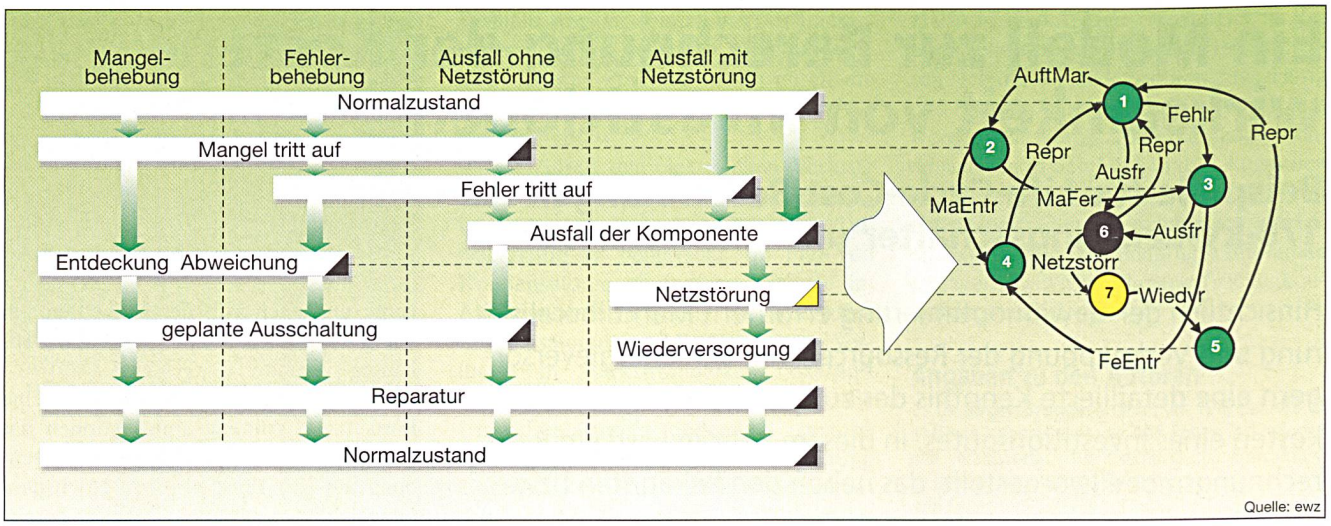

Bild 2 Wesentliche Szenarien stochastischer Ereignisse

AuftMar: Übergang vom Normalzustand in den Mangelzustand; *Ausfr:* Übergang von Normal- oder Fehlerzustand in den Ausfallzustand; *FeEntr:* Übergang vom Fehlerzustand in den Entdeckungszustand; *Fehlr:* Übergang vom Normalzustand in den Fehlerzustand; *MaEntr:* Übergang vom Mangelzustand in den Entdeckungszustand; *MaFer:* Übergang vom Mangelzustand in den Fehlerzustand; *Netzstörr:* Übergang vom Ausfallzustand in den Netzstörungszustand; *Repr:* Übergang von Ausfall-, Reparatur- oder Wiederversorgungszustand in den Normalzustand; *Wiedvr:* Übergang vom Netzstörungszustand in den Wiederversorgungszustand

Vorhersagbare Kosten

Die vorhersagbaren oder deterministischen Kosten C_{Det} ergeben sich im Wesentlichen aus den kapitalisierten Einzelkosten. Sie berechnen sich dabei aus Initial- (C_I), Betriebs- (C_O), Verwaltungs- (C_A), Instandhaltungs- (C_P) und Ausscheidungskosten (C_D)[1]: $C_{Det} = C_I + C_O + C_A + C_P + C_D$.

Kapitalfolgekosten

Alle zuvor aufgeführten Kostenarten werden kapitalisiert, d.h. es werden sowohl ein technischer Zinssatz als auch die jährlichen Abschreibungen berücksichtigt.

Je nach Betrachtungseinheit ist es sinnvoll, die Kosten über eine bestimmte Zeitdauer – die Abschreibdauer, welche kleiner als die Lebensdauer der Komponente ist – abzuschreiben. Bei grösseren Netzkomponenten wie etwa Anlagen werden z.B. Erneuerungen individuell abgeschrieben. Zur Bewertung werden dabei die resultierenden Jahreskosten herangezogen.

Ereignis	Zustand	Übergang (Übergangsrate)
Normalbetrieb (kein Störereignis)	Normalzustand	
Mangel tritt auf	Mangelzustand	Normalzustand → Mangelzustand *(AuftMar)*
Fehler tritt auf	Fehlerzustand	Normalzustand → Fehlerzustand *(Fehlr)*
Mangel wird zu Fehler	Fehlerzustand	Mangelzustand → Fehlerzustand *(MaFer)*
Mangel wird entdeckt	Entdeckungszustand	Mangelzustand → Entdeckungszustand *(MaEntr)*
Fehler wird entdeckt	Entdeckungszustand	Fehlerzustand → Entdeckungszustand *(FeEntr)*
Fehler verursacht Komponentenausfall	Ausfallzustand	Fehlerzustand → Ausfallzustand *(Ausfr)*
Direkter Komponentenausfall	Ausfallzustand	Normalzustand → Ausfallzustand *(Ausfr)*
Komponentenausfall verursacht Netzstörungszustand	Netzstörungszustand	Ausfallzustand → Netzstörungszustand *(Netzstörr)*
Reparatur beendet	Normalzustand	Reparaturzustand → Normalzustand (*Repr*)
Reparatur beendet nach Komponentenausfall	Normalzustand	Ausfallzustand → Normalzustand (*Repr*)
Wiederversorgung nach Unterbruch	Wiederversorgungszustand	Netzstörungszustand → Wiederversorgungszustand (*Wiedvr*)
Reparatur beendet nach Netzstörung	Normalzustand	Wiederversorgungszustand → Normalzustand (*Repr*)

Tabelle I Beschreibung der Zuordnung *Ereignis* zu *Zustand* in Bild 2

Unvorhersehbare Kosten

Unter den unvorhersehbaren Kosten sind Kosten zu verstehen, deren Höhe bzw. auch deren Auftretenszeitpunkt nicht vorausgesagt werden kann. Deshalb werden diese im Folgenden auch als stochastische Kosten bezeichnet.

Ereignisse und Szenarien

Ursache stochastischer Kosten sind somit Ereignisse, deren Eintrittszeitpunkt nicht vorhersagbar ist. So sind alle Ereignisse, die die Funktionsfähigkeit der betrachteten Komponente real oder potenziell beeinträchtigen, in der Regel stochastischer Natur. Zu dieser Sorte gehören alle Ausfallereignisse, aber auch Reparaturen kleinerer Schäden und Mängel, die beispielsweise bei den regelmässigen Inspektionen und Wartungen entdeckt werden.

Da es einerseits bis zum Ausfall einer Komponente manchmal mehr als ein zufälliges Ereignis braucht (Redundanz), andererseits es im System aber zu unterschiedlichsten Serien von Folgeereignissen kommen kann, sind nicht nur Einzelereignisse zu betrachten, sondern ganze Szenarien (Ereignisfolgen) zu analysieren.

In diesem Beitrag interessieren nur Szenarien, die Ereignisse enthalten, deren Ursache in der Komponentenqualität zu suchen ist. Die für eine beliebige Netzkomponente identifizierten allgemeine Szenarien sind in Bild 2 dargestellt, wobei der Szenarienbaum natürlich je nach Komponente erweitert werden kann; prinzipiell enthält er die wichtigsten Ereignisfolgen.

Generisches Zustandsmodell

Wie bei zuverlässigkeitstheoretischen Betrachtungen von Systemen üblich, werden zuerst die Zustände der betrachteten Komponente bzw. des Systems definiert. Jedem Ereignis entspricht ein Komponentenzustand (und damit auch Systemzustand), wobei nicht jedes Ereignis zwingend eine Zustandsänderung der Komponente oder des Systems bewirken muss (Bild 2). Der Ereignisbaum wird dadurch in ein Zustandsdiagramm des Systems übertragen.

Bild 2 und Tabelle I zeigen, welche Ereignisse einem Zustand zugeordnet wurden. Die Zuordnung erfolgt dabei so, dass das Ereignis den Zustandsbeginn markiert und damit auch den Zustandsübergang.

Dabei ist zu beachten, dass beispielsweise nach Mangel- bzw. Fehlerentdeckung eine geplante Ausschaltung erfolgt, damit die Reparatur durchgeführt werden kann. Den Ereignissen «geplante Ausschaltung» und «Reparatur» (Bild 2) werden hier keine weiteren Zustände zugeordnet, vielmehr verändern diese Ereignisse den Zustand nicht, der mit der Entdeckung der Abweichung beginnt (Entdeckungszustand).

Mit Hilfe der Theorie diskreter stochastischer Prozesse lassen sich nun für den i-ten Zustand die Zustandsaufenthaltswahrscheinlichkeit P_i bzw. die mittlere Besuchshäufigkeit eines Zustands H_i sowie die mittlere Aufenthaltsdauer T_i bestimmen. Die weiteren Betrachtungen beschränken sich hier auf die besonders

		*)	Fehlerbeseitigung			Indirekte Kosten		
	Zustände	Störungsbewältigung	Reparaturkosten 1. Ordnung	Reparaturkosten 2. Ordnung	Unterbruch	Verzögerung, Betriebsbehinderung	Haftung	Komplexe Folgekosten
	Normalzustand							
	Mangelzustand							
	Fehlerzustand							
	Entdeckung bei periodischer Wartung							
	Versorgungszustand mit Fehler (Ausfall der Komponente)							
	Verhinderung geplanter Schaltungen ohne Versorgungseinschränkung							
	Verhinderung geplanter Schaltungen mit Versorgungseinschränkung							
Netzstörung	Spannungseinbruch							
Netzstörung	Kurzunterbruch							
Netzstörung	Langunterbruch							

*) unmittelbare Massnahmen

Tabelle II Kostenangaben pro Kostenart und Zustand für das Beispiel Hochspannungsschalter
Grau unterlegte Felder (siehe auch Beispiel in Bild 5)

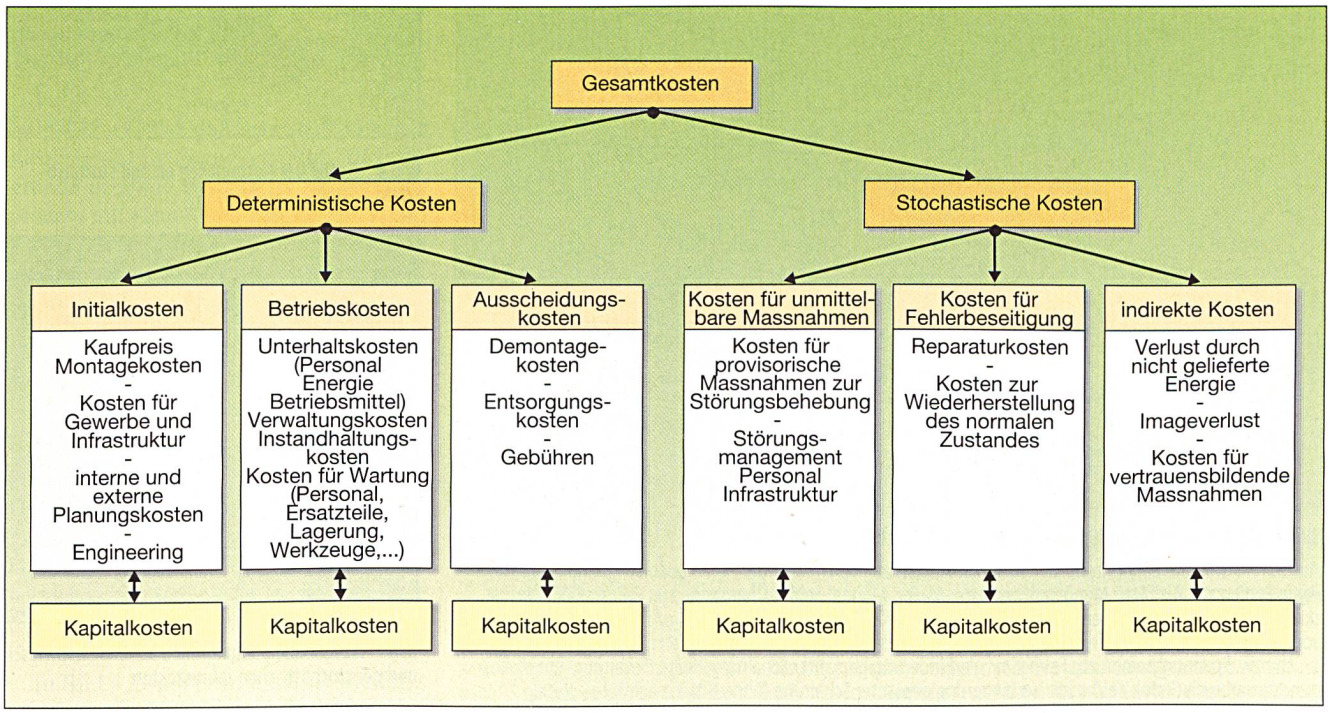

Bild 3 Einteilung der deterministischen und stochastischen Kosten in die wichtigsten Kostenarten

Kosten [€]	Wahrscheinlichkeitsgewichte [–]
2000	0,6
5000	0,2
20000	0,15
100000	0,05

Tabelle III Kostenangaben für einen Zustand und eine bestimmte Kostenart

einfach zu behandelnde Klasse der Markovprozesse (exponentielle Übergangsverteilungen). Jeder Zustandsübergang kann dann durch eine Übergangsrate charakterisiert werden. Damit sind die Grössen P_i, T_i und H_i ohne grossen Aufwand aus den Übergangsraten des Zustandsdiagramms zu bestimmen (Kolmogoroff-Chapman-Gleichungen, [3])

Kostenmodell

Den zufälligen Ereignissen und damit den entsprechenden Zuständen können nun Kosten zugeordnet werden. Die Kosten sind wieder nach Kostenarten strukturiert, wobei folgende Kostenarten grob identifiziert werden können:

- Kosten für unmittelbare Massnahmen: Betriebsaufwendungen wie Wiederversorgungskosten usw.
- Indirekte Kosten: Unterbruchskosten, komplexe Folgekosten usw.
- Kosten für die Fehlerbeseitigung: Reparaturkosten.

Es ist nahe liegend, diese grobe Kostenartenunterteilung im konkreten Fall zu verfeinern, wie es in Tabelle II bereits für das Beispiel Hochspannungsschalter durchgeführt wurde. Bild 3 zeigt die Einteilung der verschiedenen Kosten in die wichtigsten Kostenarten.

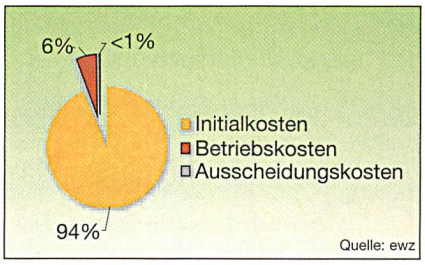

Bild 4 Aufteilung der deterministischen Kosten

Die Kostenangaben sind umso präziser, je genauer und detaillierter die Szenarien das tatsächliche Geschehen wiedergeben. Das bedeutet automatisch eine grössere Anzahl von Ereignissen und von zugehörigen Komponenten- bzw. Systemzuständen. Damit steigt aber die Komplexität des Zustandsmodells, was dessen Handhabung erschwert. Insbesondere erhöht sich der zusätzliche Kostenevaluationsaufwand, da ein solches Vorgehen vor allem dann Sinn macht, wenn die entsprechenden Kosten möglichst genau eruiert werden. Analoges gilt für die Quantifizierung der Übergangsraten, wie dies bereits im vorangehenden Kapitel dargelegt wurde.

Um das Zustandsmodell möglichst einfach und den Evaluationsaufwand für Kostenangaben möglichst gering zu halten, werden Kosten in Form von Verteilungen vorgegeben. Der übliche und – wenn genügend Daten vorhanden sind – auch sinnvolle Weg ist der, dass Parameter zu bekannten Verteilungsfunktionen aus vorhandenen Kostenstatistiken geschätzt werden.

Die hier vorgestellte Methode arbeitet mit diskreten Verteilungen, was die Kostenschätzungen auf Grund von Erfahrungswerten vereinfacht (z.B. in 90% der Fälle kostet ein Ereignis 10000 Euro, in 10% der Fälle 50000 Euro), was dann

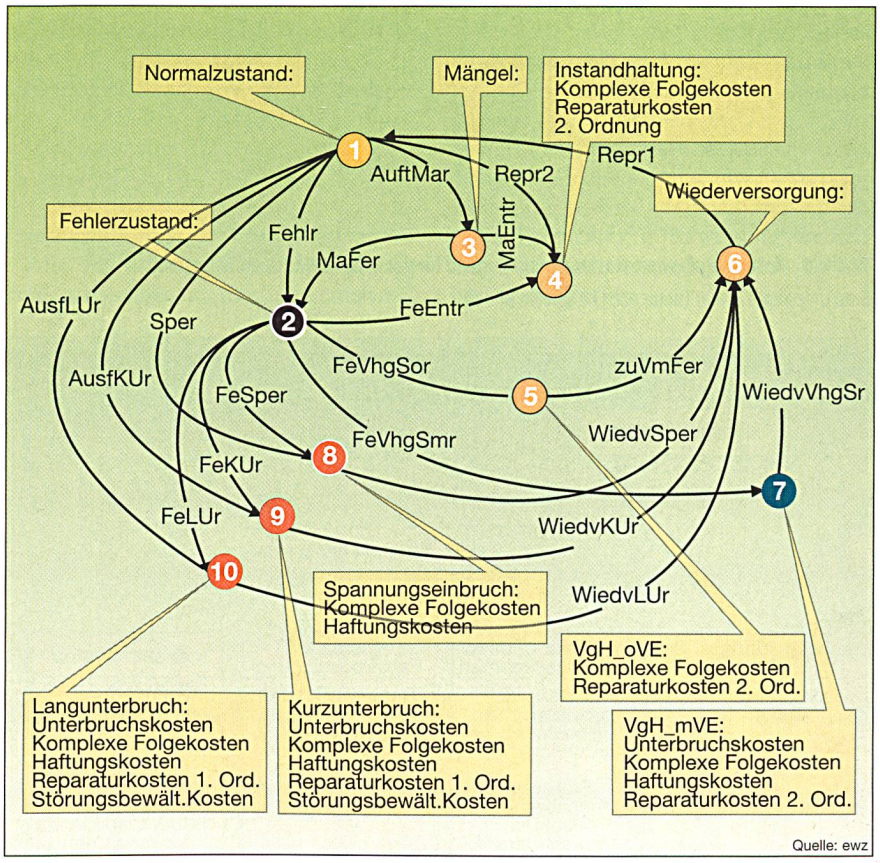

Bild 5 Zustandsdiagramm für die LCC-Berechnung der Beispielkomponente

AusfLUr: Ausfallrate Langunterbruch; *AusfKUr:* Ausfallrate Kurzunterbruch; *Sper:* Spannungseinbruchsrate; *Fehlr:* Fehlerrate; *AuftMar:* Mangelauftrittsrate; *MaFer:* Mangel-Fehler-Übergangsrate; *FeEntr:* Fehlerentdeckungsrate; *MaEntr:* Mangelentdeckungsrate; *FeLUr, FeKUr, FeSper:* wie *AusfLUr, AusfKUr, Sper,* aber als Folge von Komponentenfehler; *WiedvLUr, WiedvKUr, WiedvSper:* Wiederversorgungsraten nach Lang-/Kurzunterbruch bzw. Spannungseinbruch; *FeVhgSmr:* Verhinderung geplanter Schaltung, *Folge:* Schaltung mit Versorgungsunterbruch (Rate); *FeVhgSor:* Verhinderung geplanter Schaltung (ohne Unterbruchsfolge, Rate); *zuVmFer:* Übergangsrate in Wiederversorgungszustand (Schalter muss repariert werden); *WiedvVhgSr:* Rate Wiederversorgung nach FeVhgSmr; *Repr1, Repr2:* Reparaturraten (zu entsprechenden Reparaturzeiten)

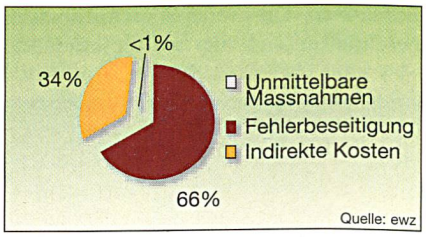

Bild 6 Anteil der Kostenarten an den stochastischen Kosten

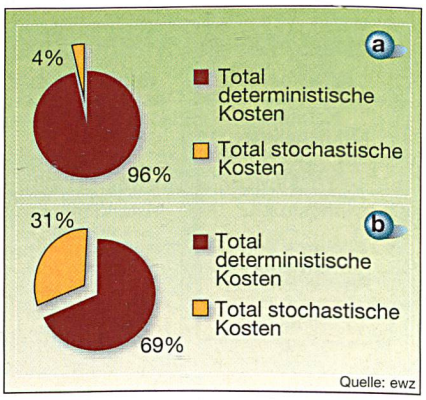

Bild 7 Gegenüberstellung der deterministischen und der stochastischen Jahreskosten

Bild 7a: für den Referenzfall; Bild 7b: für den Extremfall

Ausfälle nach IEC 60694	Entspricht Raten in Bild 5	Wert [# / Jahr]
Minor Failure λ_{min}	Auftmar	0,0075
Major Failure λ_{maj}	Fehlr	0,001·0,5
	Sper	0,001·0,5·0,79
	AusfKUr	0,001·0,5·0,2
	AusfLUr	0,001·0,5·0,01

Tabelle IV Angaben zu den wichtigsten Übergangsraten in Bild 5

nützlich ist, wenn wenige oder gar keine Daten vorhanden sind. Grundsätzlich kann aber die Methode auch bei vorhandenem Zahlenmaterial angewendet werden, vor allem auch dann, wenn man nachträglich Korrekturen auf Grund neuer Unterlagen durchführt (eine Verfeinerung der diskreten Angaben führt zu einer Treppenfunktion).

Solange keine Streumasse (z.B. Standardabweichung) für die (stochastischen) Kostenangaben gebraucht und nur Mittelwerte (Erwartungswerte) berechnet werden, reduziert sich prinzipiell die Angabe der diskreten Verteilung auf die Angabe eines Wertes, eben des Erwartungswertes (im vorher erwähnten Beispiel: 0,9 · 10000 + 0,1 · 50000 = 14000 Euro).

Kostenangaben für einen Zustand und eine bestimmte Kostenart, also Einträge in eine Zelle der Tabelle II, haben somit die in Tabelle III dargestellte Form.

Berechnung der Kapitalfolgekosten

Da stochastische Kosten nicht nur in zufälliger Höhe, sondern auch zu zufälligen Zeitpunkten anfallen, verlangt die Berechnung der kapitalisierten Kosten wahrscheinlichkeitstheoretische Methoden.

Folgende Formel ist für den Erwartungswert E der Jahreskosten K_j unter idealisierten Bedingungen gültig (der zugrunde liegende Prozess ist ein Poissonprozess mit Rate λ und den Kosten K pro Ereignis, q = 1 + Zinsfuss). Zu beachten ist dabei die Unabhängigkeit von K_j von der Abschreibdauer (keine zeitliche Abhängigkeit)

$$E(K_j) = \lambda / [\ln(q) \cdot (q - 1) \cdot K]$$

Beispiel 170-kV-Leistungsschalter

Deterministische Kosten

Zur Evaluation dieser Kosten wurden konkrete Projekte beim beteiligten EVU herangezogen und – wie im Kapitel über die Kapitalfolgekosten bereits beschrieben – den Kostenarten zugewiesen.

In Bild 4 ist die prozentuale Aufteilung der deterministischen Kosten auf die einzelnen Kostenarten dargestellt, wobei zu beachten ist, dass hier unter Betriebskosten auch die Verwaltungs- und Instandhaltungskosten subsumiert wurden, wie dies auch aus Bild 3 ersichtlich ist. Im dargestellten Beispiel dominieren die Initialkosten mit 94% Anteil an den deterministischen Kosten.

Die stochastischen Kosten

Für die Ermittlung der stochastischen Kosten werden neben der Kenntnis des Zuverlässigkeitsverhaltens des Schalters realistische Szenarien der Komponente und daraus resultierend Szenarien im Versorgungsnetz abgeleitet und mittels einer Kostenbewertung in die Kostenmatrix (Tabelle II) eingebracht.

Es zeigt sich, dass die Szenariendarstellung in Bild 3 problemlos auf das Beispiel Leistungsschalter übertragen und ein entsprechendes Zustandsdiagramm abgeleitet werden kann (Bild 5).

Gegenüber dem allgemeinen in Bild 2 dargestellten Diagramm wird der Netzausfallzustand noch verfeinert dargestellt, indem zwischen Spannungseinbruch (Dauer: 10 ms bis 1 min), Kurzunterbruch (bis 3 min) und Langunterbruch (mehr als 3 min) unterschieden wird [4]. Der Fehlerzustand wird mit dem Komponentenausfallzustand gleichgesetzt.

Die Werte, welche für die Übergangsraten im Zustandsdiagramm gewählt wurden, basieren einerseits auf Daten des Lieferanten, andererseits auf internen Angaben des Netzbetreibers, wobei diese unwesentlich von den gängigen Störungsstatistiken abweichen. Die Evaluation der für die Kostenrechnung einflussreichsten Übergangsraten, die Mangel- und die Fehlerauftrittsrate, wird

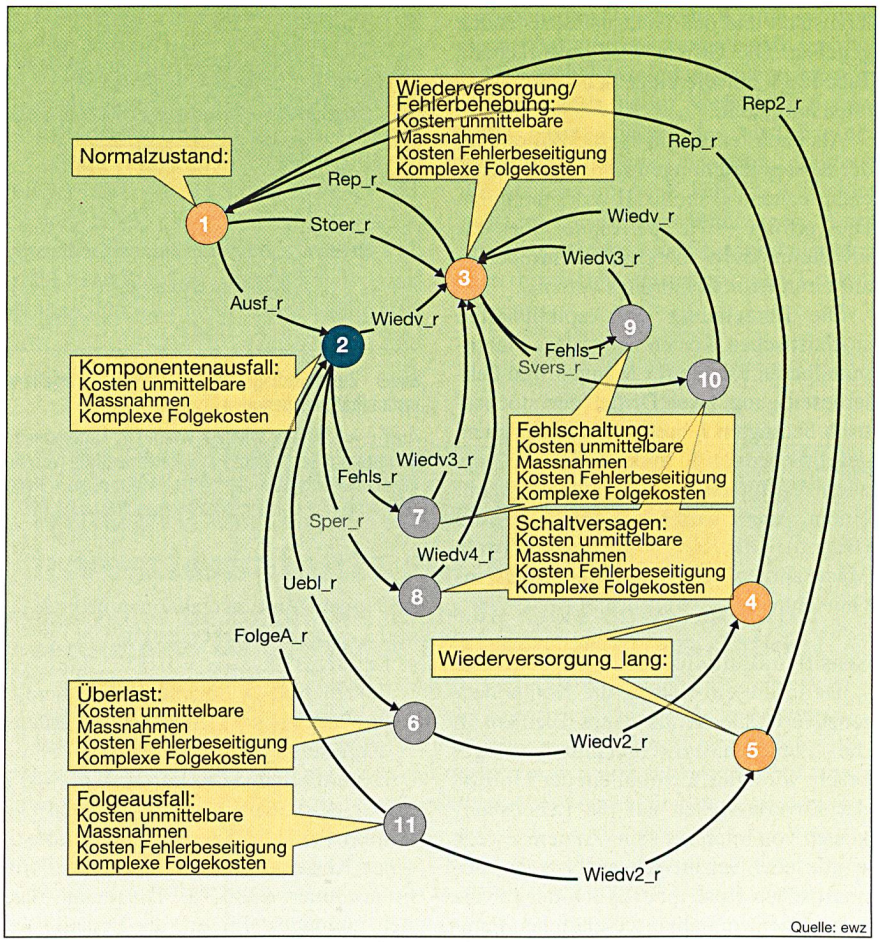

Bild 8 Zustandsdiagramm für Einfachausfälle von Komponenten im Unterwerk

Ausf_r: Ausfallrate; *Wiedv_r, Wiedv2_r, Wiedv3_r, Wiedv4_r:* Unterschiedliche (von Ausgangszustand abhängige) Wiederversorgungsraten; *Rep_r, Rep2_r:* Unterschiedliche (von Ausgangszustand abhängige) Reparaturraten; *Stoer_r:* Komponentenstörungsrate (es erfolgt Reparatur); *Fehls_r:* Fehlschaltungsrate; *Sper_r:* Schaltversagungsrate; *Uebl_r:* Überlast-Abschaltungsrate; *FolgeA_r:* Folgeausfallrate (nicht Überlast)

im Folgenden dargestellt. Danach werden diese Raten einer Sensitivitätsstudie unterzogen.

Als Ausfall wurde hier der in der IEC 60694 [5] definierte Major Failure λ_{maj} (wesentlicher Ausfall) gewählt, der zu einer unmittelbaren Änderung des Betriebszustandes im Netz führt. Als weitere, ebenfalls in der IEC 60694 definierte Ausfallgrösse wurde der Minor Failure λ_{min} (geringfügiger Ausfall) gewählt, der nicht zu einer unmittelbaren Änderung des Betriebszustandes im Netz führt, wohl aber eine Reaktion des Betreibers erfordert. Mit diesen beiden Definitionen wird einerseits den ereignisbedingten unmittelbaren Netzauswirkungen und den damit initiierten stochastischen Kosten Rechnung getragen und andererseits ein Vergleich mit von der Cigré publizierten Werten ermöglicht [6].

Für die hier betrachtete Komponente wurde unter konservativem Ansatz für λ_{maj} ein Wert von 0,001 (Anzahl/Jahr) eingesetzt, für λ_{min} ein Wert von 0,0075 (Anzahl/Jahr).

Mit dem λ_{maj} ist somit die gesamte Übergangswahrscheinlichkeit zum Fehlerzustand und den Netzausfallzuständen gegeben. Die Grösse wird entsprechend Tabelle IV auf die einzelnen Übergangsraten aufgeteilt.

Als nächster Schritt ist die Zuordnung der Kostenverteilungen zu den Zuständen entsprechend Tabelle II vorzunehmen. Dies erfolgt – wie im Kapitel über das «Kostenmodell» bereits beschrieben – auf Grund von Erfahrungswerten.

Die Berechnung der kapitalisierten stochastischen Kosten zeigt, dass die unmittelbaren Kosten für Mängel- und Fehlerbeseitigung zwei Drittel der stochastisch bedingten Jahreskosten ausmachen, gefolgt von den indirekten Kosten – die auch Haftungskosten enthalten – mit einem Anteil von etwa einem Drittel (Bild 6). Die Kosten der unmittelbaren Massnahmen fallen dagegen nicht ins Gewicht.

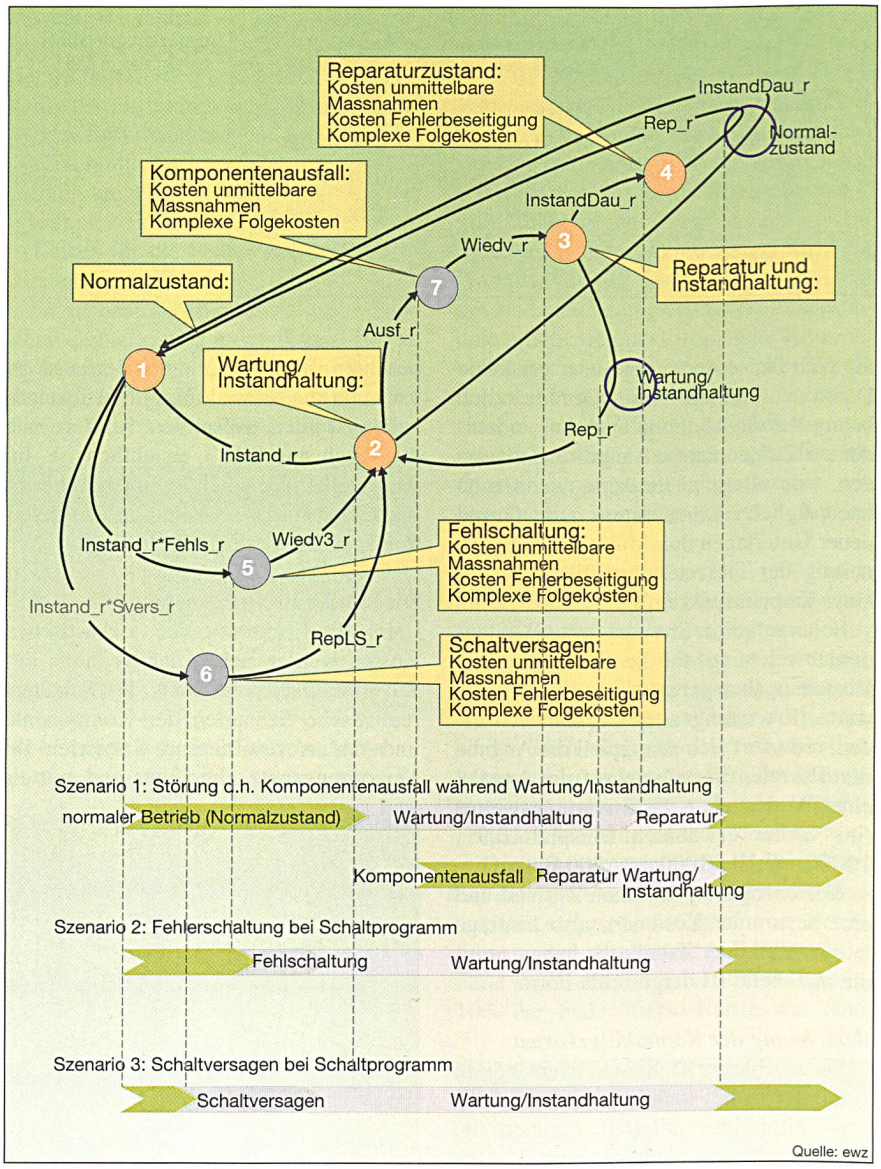

Bild 9 Zustandsdiagramm für bestimmte Ausfälle von Komponenten im Unterwerk während Wartungs- bzw. Instandhaltungsperioden

Ausf_r: Ausfallrate; *Wiedv_r, Wiedv3_r :* Unterschiedliche (von Ausgangszustand abhängige) Wiederversorgungsraten; *Rep_r, RepLS_r:* Unterschiedliche (von Ausgangszustand abhängige) Reparaturraten; *Instand_r:* Instandhaltungshäufigkeit (rate); *InstandDau_r:* Kehrwert der Instandhaltungsdauer (->Rate); *Fehls_r:* Fehlschaltungsrate; *Svers_r:* Schaltversagungsrate

Sensitivitätsstudie

Da in diesem Beitrag die Komponentenzuverlässigkeit als neues Element in die Lebenslaufkostenrechnung eingebracht wird, dürfte vor allem der Einfluss der Zuverlässigkeit auf die Lebenslaufkosten von Interesse sein. Zu dem Zweck wurde eine Sensitivitätsanalyse der stochastischen Kosten bezüglich der für die Komponentenqualität wesentlichen Parameter λ_{Fehlr} (Übergangsrate zum Fehlerzustand) und $\lambda_{AuftMar}$ (Übergangsrate zum Mangelzustand, Bilder 2 und 5) durchgeführt. Im Folgenden werden zwei Berechnungen der Gesamtkosten (Jahreskostenwert) mit zwei Varianten für λ_{Fehlr} und $\lambda_{AuftMar}$ gegenübergestellt:

- Referenzfall: $\lambda_{Fehlr} = 0{,}001$, $\lambda_{AuftMar} = 0{,}0075$ (dieses Beispiel wurde bereits im Kapitel «stochastische Kosten» dargestellt)
- Extremfall: $\lambda_{Fehlr} = 0{,}01$, $\lambda_{AuftMar} = 0{,}1$

Der Kostenanteil von 4% an den Gesamtkosten wird von den deterministischen Kosten (96%) im Referenzfall völlig dominiert (Bild 7a). Dies zeigt, dass sich zumindest für die als Beispiel gewählte Komponente und die verwendeten Kostenverteilungen – auf Grund der hohen Zuverlässigkeit und Qualität der Komponente – das Betrachten der stochastischen Kostenanteile erübrigt.

Anders sieht die Sache aus, wenn sich die beiden Parameter um eine Zehnerpotenz vergrössern (Extremfall, Bild 7b): Dann wächst der Anteil der stochastischen Kosten mit 31% an den Gesamt-

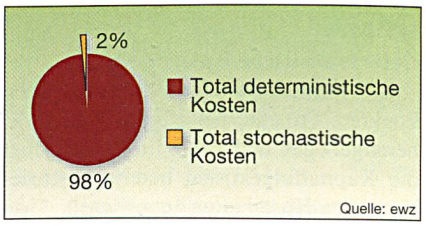

Bild 10 Gegenüberstellung der deterministischen und der stochastischen Jahreskosten für das Beispiel Unterwerk

kosten schnell in die Grössenordnung der deterministischen Kosten. Weitere (hier nicht dargestellte) Resultate zeigen eine starke Sensitivität der stochastischen Kosten in diesem Parameterbereich, was auch nicht weiter verwunderlich ist, da die MTTF[2)] bzw. der Kehrwert der Ausfallrate in den Bereich der Betriebsdauer zu liegen kommt. Daraus folgt, dass für Ausfallwerte in diesem Bereich der Einfluss von zufälligen Kosten nicht mehr vernachlässigt werden darf.

Da für beide Fälle die deterministischen Kosten als gleich bleibend angenommen wurden, lässt sich schliessen, dass bei einer billigeren Komponente (bei Werten im Extrembereich von λ) der Anteil der stochastischen Kosten an den Gesamtkosten noch höher liegt.

Beispiel Unterwerk

Im Folgenden werden Resultate zu einer Anwendung (Testfall) der Methode in einer Investitionsrechnung für ein Anlagenprojekt gezeigt. Dabei handelt es sich um eine Erweiterung eines bestehenden Unterwerkes. Vorgehen und Berechnung der Kosten sind prinzipiell gleich wie am Beispiel des Leistungsschalters.

Was die deterministischen Kosten betrifft, ist es klar, dass die kapitalisierten Initialkosten die Gesamtkosten noch mehr dominieren, als es bereits beim Leistungsschalter der Fall war. Die Ermittlung der stochastischen Kosten erforderte vorgängig zuerst eine umfassendere und detailliertere Darstellung der möglichen Szenarien, welche grundsätzlich auf der Darstellung von Bild 2 aufbaut. Insbesondere treten rekursive Strukturen in der Darstellung auf, wenn Folgestörungen oder mehrfache Störungen verschiedener Komponenten berücksichtigt werden.

Es zeigte sich, dass es zweckmässiger ist, die im Beispiel des Leistungsschalters integrierte, aber recht rudimentäre Darstellung der Wartung/Instandhaltung (Bild 5) – und damit verbunden der Entdeckung von Mängeln – wegzulassen, und diese beiden Vorgänge separat und detaillierter zu modellieren.

Die Mangelbehebung ist allerdings in den folgenden Resultaten nicht berücksichtigt, sondern nur Komponentenausfälle und -defekte, die beim Auftreten sofort bemerkt werden.

Auf Grund der geringen Ausfallhäufigkeit gewisser Grundkomponenten wie Leistungsschalter, Trenner, Transformator usw. wurden unabhängige Mehrfachausfälle von Komponenten ebenfalls nicht betrachtet. Berücksichtigt wurden lediglich abhängige Folgefehler bei Schalter- und Schutzversagen nach Kurzschlüssen und Fehlschaltungen bei Schalthandlungen (Bild 8).

Da geplante Umschaltungen in einem Unterwerk im Zusammenhang mit der Instandhaltung recht häufig vorkommen, werden Ausfälle während dieser Phase gesondert betrachtet; auf Grund reduzierter Redundanz müssen Unterbrüche – und damit andere Kostenfolgen als während des Normalbetriebs – berücksichtigt werden.

Für die zwei Grundszenarien – Einfachausfälle während des Normalbetriebs und Einfachausfälle während der geplanten Ausschaltungen – wurden zwei standardisierte Zustandsdiagramme abgeleitet. Die Übergangsraten und die Zuordnung der Kosten zu entsprechenden Zuständen erfolgte analog zum Beispiel des Leistungsschalters, diesmal allerdings für die Komponenten und Teilanlagen

- Leitungsfeld (getrennt nach Spannungsebene)
- Trafofeld (getrennt nach Spannungsebene)
- Kupplungsfeld (getrennt nach Spannungsebene)
- Transformator
- Schaltanlage SF_6 (getrennt nach Spannungsebene)
- Unterwerk.

In Bild 8 sind Fehlschaltungen, Leistungsschalter- und Schutzversagen durch entsprechende Zustände und Übergangsraten berücksichtigt. Ferner werden Folgefehler auf Grund möglicher Auswirkungen durch Komponentenausfälle (Explosion, Brand usw.) sowie Überlast ebenfalls dargestellt.

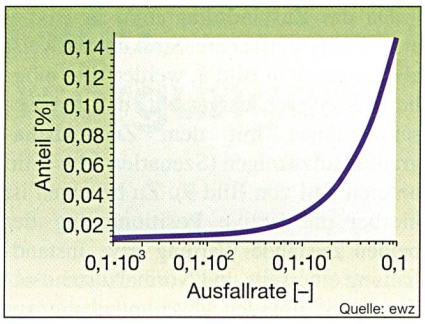

Bild 11 Verlauf prozentualer Anteil der stochastischen Jahreskosten an den Gesamtjahreskosten

Dargestellt in Abhängigkeit der Leistungsschalter-Ausfallrate (aktueller Wert $0{,}1 \cdot 10^{-2} = 0{,}001$ Ausfälle pro Jahr)

Das Diagramm in Bild 9 beschreibt bestimmte Ausfälle oder Unterbrüche, welche – bei Fehlschaltungen oder Schalterversagen – erst durch Schalthandlungen ermöglicht werden. Daneben beschreibt es aber auch Ausfälle, welche für die während der Dauer der Wartungs- bzw. Instandhaltungstätigkeiten geltenden speziellen Schaltzuständen andere Auswirkungen haben als im Normalfall. So bewirkt beispielsweise der Ausfall eines Transformators im Unterwerk, während ein weiterer für eine längere Zeit einer grösseren Revision unterzogen wird, unter Umständen einen länger dauernden Unterbruch mit entsprechenden Kostenfolgen.

Modèle de calcul de l'effet des investissements sur les coûts

Exemples de calcul des coûts de cycle de vie pour un sectionneur de puissance 170 kV et une sous-station

Au niveau de l'optimisation des bénéfices, la libéralisation du marché et la pénurie de ressources exigent de la part des fournisseurs d'énergie une connaissance précise des coûts de cycle de vie à attendre pour un bien d'investissement. L'article présente un exemple de calcul tenant compte non seulement des coûts connus ou calculables, comme ceux de maintenance et d'exploitation, mais encore des coûts à survenance stochastique dus aux défaillances et pannes, y compris amortissement et intérêts. La méthode rend ces coûts planifiables accessibles à un calcul d'investissement en fonction de la fiabilité des composants du réseau, ce qui permet d'examiner la sensibilité aux coûts. Le modèle de calcul permet par exemple de comparer des composants similaires, de considérer isolément des composants spécifiques ou des systèmes complets et d'analyser les effets des caractéristiques de fiabilité sur les coûts totaux.

Da das Zustandsdiagramm in Bild 9 eine etwas einfachere Struktur aufweist als dasjenige in Bild 8, werden drei mögliche Szenarien dargestellt, um den Zusammenhang mit dem Zustandsdiagramm aufzuzeigen (Szenarien 1 bis 3 im unteren Teil von Bild 9). Zu beachten ist hierbei die fiktive Positionierung der beiden Zustände Wartung bzw. Instandhaltung einerseits und Normalzustand andererseits, um den Zusammenhang zur zeitlichen Abfolge der Szenarien zu ermöglichen.

Aus den Bilder 8 und 9 ist ersichtlich, welche Zustände zur Kostenberechnung berücksichtigt werden. Die Kostentypisierung wurde dabei von Kapitel «Kostenmodell» übernommen.

Das zur Berechnung notwendige Zahlenmaterial für die Übergangsraten und Kostenverteilungen wurde auf Grund von internen Statistiken, Angaben und Schätzungen zusammengetragen.

Die Berechnung der kapitalisierten stochastischen Kosten zeigt, dass diese für die aktuellen Komponentenausfallraten 2% der gesamten Lebenslaufkosten (Abschreibdauer) ausmachen (Bild 10).

Analog zur Sensitivitätsanalyse des vorigen Beispiels lässt sich der prozentuale Anteil der stochastischen Kosten in Abhängigkeit der Ausfallrate AusfLS_r der auch im Unterwerk wichtigen Komponenten Leistungsschalter darstellen (Bild 11). Eine Verzehnfachung der aktuellen Ausfallrate auf 1 Mal pro 100 Jahre bewirkt eine Verdoppelung des prozentualen Anteils, womit sich eine Vervielfachung nicht so dramatisch auswirkt wie im Schalterbeispiel. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass dort vor allem Mangelbehebung, also die Instandhaltungsaufwendungen, den grössten Beitrag lieferten, welche hier nicht berücksichtigt wurden. Wie auch im ersten Beispiel steigen die Kosten erst dann stärker an, wenn die MTTF, also der Kehrwert der Ausfallrate, in den Bereich der Betriebsdauer kommt (<100 Jahre oder AusfLS_r > 0,01 Anzahl/Jahr).

Ausblick

Im Laufe der Arbeit an diesem Beitrag zeigte sich, dass ein grösserer Teil der stochastischen Kosten bei der Mängelbehebung und Instandhaltung anfällt. Deswegen wurde in einer Parallelstudie [7] mehr Gewicht auf die genaue Modellierung von Alterung und Verschleiss gelegt, auf Kosten einer genauen Darstellung des Störungsgeschehens (Vernachlässigung von Ausfalldauern). Ebenso wurden Ausfallkosten, die beim Kunden anfallen, zu den indirekten Ausfallkosten hinzuaddiert. Der stochastische Kostenanteil steigt dann wesentlich und kann durchaus im Bereich der deterministischen Kosten liegen.

Analysen der vorliegenden Art beinhalten einen grossen Initialaufwand wie Konzeptentwicklung, Programmierarbeit und vor allem Datenzusammentragen. Erst mit der Zeit wird durch Standardisierung (Methoden, Szenarien und Zustandsdiagramme) und Wiederverwendung des vorhandenen Datenmaterials der Aufwand geringer, so dass diese Methodik in Planungsprojekten ihren Platz finden kann. Vorderhand muss aber noch Aufbauarbeit geleistet werden.

Referenzen

[1] *J. Bader, H. Feld, P. Müller, M. Lutz:* Kostenoptimierung im liberalisierten Energiemarkt I: Ein Modell zur Berechnung der Kostenwirksamkeit. Elektrizitätswirtschaft, Nr. 13, S. 66, 2001.

[2] *J. Bader, H. Feld, P. Müller, M. Lutz:* Kostenoptimierung im liberalisierten Energiemarkt II : Berechnung der Kostenwirksamkeit am Beispiel eines Hochspannungs-Leistungsschalters. Elektrizitätswirtschaft, Nr. 13, S. 72, 2001.

[3] *A. Birolini:* Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme. Springer-Verlag, 3. Auflage, 1991.

[4] DIN EN 50160: Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen. Oktober 1995.

[5] IEC 60694: Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards. Second edition, 1996.

[6] *Ch. R. Heising:* Worldwide Realibilty Survey of High-Voltage Circuit Breakers. IEEE Industry Application Magazine May/June, 1996.

[7] *J. Bader, H.-H. Schiesser, H. Luternauer:* Substations in an urban electrical network – an analysis of outages and their costs. CIRED, 17th Int. Conf. on Electricity Distribution, Session 5 No 42, Barcelona, 12-15 May 2003.

Angaben zu den Autoren

Pascal Müller, ewz (Elektrizitätswerk der Stadt Zürich), CH-8050 Zürich, pascal.mueller@ewz.stzh.ch

Jürg Bader, ewz (Elektrizitätswerk der Stadt Zürich), CH-8050 Zürich, juerg.bader@ewz.stzh.ch

Herbert Feld, Siemens AG EV HS 22-3, D-13623 Berlin, herbert.feld@ev.siemens.de

[1] C_I: Cost of Installation, Purchase Costs; C_O: Operating Costs; C_A: Administration Costs; C_P: Cost of Planned Corrective Maintanance; C_D: Cost of Decommissioning and Disposal.

[2] MTTF: Mean Time To Failure