

Langzeitsimulation am Beispiel eines Mittelspannungskabelnetzes

L. Asgariéh, G. Balzer; Technische Universität Darmstadt, Darmstadt
U. Jordan, H. Rost; Stadtwerke Bochum GmbH, Bochum
M. Mathis; ABB Mannheim

1 Einleitung

Nach [1] kann der Asset Management Prozess grundsätzlich in verschiedene Schritte unterteilt werden, der mit der Auswertung einer langfristigen Strategie beginnt und mit einer konkreten Wartungsaktivität für ein Betriebsmittel endet. Im folgenden Bericht wird der erste Schritt näher beschrieben, nämlich die Ableitung einer Ersatz- und Wartungsstrategie für mehrere Jahrzehnte. Mit Hilfe dieses Verfahrens ist es möglich, die Auswirkungen einer Wartungs- und Ersatzstrategie, z. B. Verlängerung der Service-Zyklen oder Verlängerung der Lebenszeit der Betriebsmittel, auf das Systemverhalten zu überprüfen und die finanziellen Auswirkungen hinsichtlich der Investitions- und Betriebskosten abzuschätzen. Die grundsätzliche Vorgehensweise wird anhand eines Mittelspannungskabelnetzes gezeigt.

2 Entwicklung einer langfristigen Strategie

2.1 Allgemeine Vorgehensweise

Das Ziel dieser Analyse ist es, einen langfristigen Plan für die Instandhaltungsstrategie eines Netzes abzuleiten, unter Verwendung geeigneter Alterungsmodelle. Diese Modelle besitzen die Aufgabe das Betriebsmittelverhalten in einem vorgegebenen Zeitbereich von z.B. 40 bis 80 Jahren, entsprechend der Nutzungsdauerzeit der verschiedenen Betriebsmittel, zu simulieren. Hieraus lassen sich die folgenden Arbeitsschritte ableiten:

- Zustandsbewertung und Ableitung des Fehlerverhaltens der Betriebsmittelgruppe,
- Ableitung eines Alterungsmodells für verschiedene Betriebsmittel,
- Darstellung verschiedener Funktionsketten für die digitale Simulation unter Berücksichtigung der personellen und finanziellen Ressourcen eines Unternehmens;
- Durchführung der dynamischen Simulationen,
- Analyse der Ergebnisse und Ableitung der Instandhaltungsmaßnahmen.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Arbeitsschritte, die oben beschrieben wurden, erklärt und die notwendigen Eingaben für die Simulationen definiert.

2.2 Alterungsmodell

Vereinfachend kann das allgemeine Fehlerverhalten einer Betriebsmittelgruppe in Abhängigkeit von der Lebensdauer nach Bild 1 dargestellt werden. Unter Berücksichtigung eines Durchschnittswertes der Fehlerrate, werden in diesem Fall beispielhaft vier verschiedene Zustands- bzw. Alterungsklassen abgeleitet, um eine typische Badewannenkurve zu erhalten. Die verschiedenen Störungsraten werden verwendet, um die Anzahl der Klassen eines Alterungsmodells unter Berücksichtigung des Markov-Modells nach [2] festzulegen.

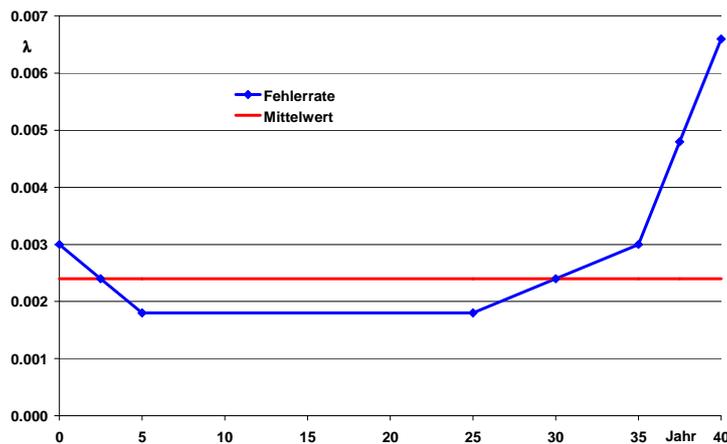


Bild 1: Typischer Verlauf der Fehlerrate eines Betriebsmittels (beispielhaft)

Als Folge dieser Überlegungen kann ein Alterungsmodell entwickelt werden, das die Änderung des technischen Zustandes berücksichtigt. Als Beispiel hierfür gilt ein Modell, wie es in [2] ausführlich beschrieben ist, indem verschiedene Wartungsmaßnahmen berücksichtigt und Zustände simuliert werden. Aufgrund der unterschiedlichen Übergangsraten zwischen den Zuständen und den Maßnahmen, kann der Zustand der Betriebsmittelgruppe mit Hilfe des Markov-Modells in Abhängigkeit des Alters abgeleitet werden.

Die Teile einer vollständigen Betriebsmittelgruppe, die den verschiedenen Zustandsklassen (gut, mittel, schlecht und kritisch) zugeteilt werden, müssen durch eine Zustandsbewertung abgeleitet werden. Die einzelnen Betriebsmittel durchlaufen während ihrer Betriebszeit die verschiedenen Zustandsklassen, während die verschiedenen Wartungsmaßnahmen diesen Prozess verlangsamen oder beschleunigen können, was vom Erfolg der Wartungsmaßnahme und dem Zyklus abhängt. Eine wesentliche Aufgabe hierbei ist es, alle Betriebsmittel den verschiedenen Zustandsklassen zuzuweisen und die Übergangsraten zu spezifizieren. Im allgemeinen besteht ein Betriebsmittel, z. B. Kabel, aus verschiedenen Typen (papierisoliert, VPE), die auch ein unterschiedliches Betriebs- und Fehlverhalten aufweisen. Folglich ist es sinnvoll, ein Alterungsmodell für jedes der verschiedenen Betriebsmitteltypen zu erstellen.

2.3 Funktionsketten

Der Alterungseffekt der Betriebsmittel und die hieraus notwendigen Maßnahmen (Instandhaltung oder Ersatz), kann mit Hilfe von Funktionsketten nachgebildet werden, in denen die Ursachen und Wirkungen auf verschiedene Faktoren nachgebildet werden, z. B. den Zusammenhang zwischen den verschiedenen Gebieten: Technologie – Personal – Finanzen – Kunde – Unternehmen [2]. Des Weiteren kann der erforderlichen Personal- und Finanzbedarf für jeden Netzbetreiber in Abhängigkeit der Instandhaltung und des Ersatzes von Betriebskomponenten abgeleitet werden. Gleichzeitig beeinflusst der Zustand des Betriebsmittels das gesamte Netzverhalten, welches einen Einfluss auf die Spannungsqualität hat, was wiederum das Verbrauchsverhalten der Kunden beeinflusst. Im Prinzip ist es möglich, weitere Betrachtungsfelder wie Gesellschaft, Gesetzgebung, Regulator usw., zu integrieren, um weitere Einflüsse und Erfordernisse zu berücksichtigen.

2.4 Ergebnis der dynamischen Simulation

Die dynamische Simulation liefert dem Asset Manager eine Vielzahl an Informationen. Der wichtigste Punkt ist hierbei zum einen die Kenntnis der jährlichen Investitionskosten (CAPEX: capital investment expenditures) und zum anderen die jährlichen Betriebskosten (OPEX: operational investment expenditures), welche sich aus den

- Revisions- und Instandhaltungskosten,
- Investitionskosten für den Ersatzbedarf,
- Reparaturkosten, die sich auf Basis der Fehlerrate, untergliedert in major und minor Fehler ergeben
- Kosten verursacht durch nicht gelieferte Energie,

ermitteln. Dies liefert unter Berücksichtigung der verschiedenen finanziellen Aufwendungen und der Kenntnis, wie viele Betriebsmittel pro Jahr gewartet und ersetzt werden müssen, die Gesamtkosten für eine Betriebsmittelgruppe über einen größeren Betrachtungszeitraum (z. B. 50 Jahre).

Die Summe der beiden Kostenarten stellt die erwartete finanzielle Aufwendung für den betrachteten Zeitraum für eine Betriebsmittelgruppe dar, so dass hieraus verschiedene Investitions- und Wartungsstrategien abgeleitet werden können. Im Beispiel nach Kapitel 3 werden zwei verschiedene Varianten bei den nachfolgenden Simulationen für ein Kabelsystem berücksichtigt, um den Einfluss auf die Investitions- und Betriebsmittelkosten zu ermitteln:

- Variante 1: Maximale Betriebsmittelzeit 70 Jahre, d. h., Austausch aller dann noch vorhandenen Kabel,
- Variante 2: Maximale Betriebsmittelzeit 80 Jahre, d. h., Austausch aller dann noch vorhandenen Kabel unter Berücksichtigung eines höheren Reparaturaufwands als Folge einer geänderten Fehlerrate.

3 Beispiel

3.1 Eingabedaten

Bild 2 zeigt die Altersverteilung des untersuchten 10-kV-Kabelnetzes, was sowohl Papierblei- als auch Kunststoffkabel umfasst. Es zeigt sich, dass eine große Anzahl der existierenden Kabelstrecken die maximale, erwartete Lebensdauer von 70 Jahren bereits überschritten haben (Variante 1), so dass in der nachfolgenden Simulation diese Kabelverbindungen sofort ausgetauscht werden, welches im ersten Jahr der Betrachtung sofort zu einem großen Investitionsvolumen führen wird. Darüber hinaus wird angenommen, dass aufgrund von neuen Netzstrukturen nur 80 % der zum Austausch anstehenden Kabel gegen neue ersetzt werden.

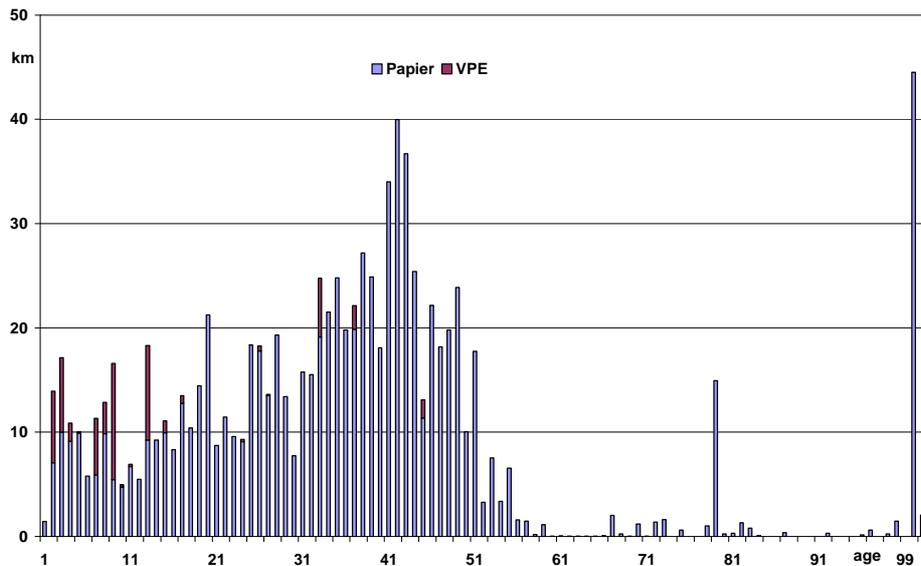


Bild 2: Altersverteilung des untersuchten Kabelnetzes

Für die Simulation wird ein Alterungsmodell benutzt, welches im ersten Fall (Variante 1) aus fünf und im zweiten (Variante 2) aus sechs Zustandsklassen besteht. Die verschiedenen Klassen hinsichtlich des Alters und der Fehlerraten können der Tabelle 1 entnommen werden. Die Fehlerraten werden für eine Lebensdauer > 40 Jahren angenommen, wobei für die beiden verschiedenen Kabeltypen (Papierbleikabel, Kunststoffkabel) ein gleiches Alterungsverhalten unterstellt wird. Aufgrund der Betriebserfahrung wird für die Nachbildung angenommen, dass nach 40 Jahren (bzw. 50 Jahren) bereits 10 % der Kabellängen ersetzt werden müssen und dass nur 5 % der Kabel ihr maximales Betriebsmittelalter erreichen.

Klasse	Alter	Fehlerrate in p.u.
1	1 – 5	1.0
2	6 - 25	1.0
3	26 – 40	1.0
4	41 – 55	2.0
5	56 – 70	4.0
6	70 – 80	6.0

Tabelle 1: Klasseneinteilung des Alterungsmodells in Abhängigkeit der Fehlerrate (1.0 p.u., nur dielektrische Fehler)

Papierbleikabel: $0.0065 \frac{1}{(a \cdot km)}$; Kunststoffkabel: $0.0020 \frac{1}{(a \cdot km)}$ [3]

Bei den Fehlerraten werden ausschließlich dielektrische Fehler berücksichtigt, da bei Störungen, die durch Vorgänge Dritter verursacht werden, z. B. Reparaturen aufgrund von Erdarbeiten, ein Kostenersatz erfolgt.

3.2 Ergebnisse

Bild 3 zeigt das gesamte Investitionsvolumen für neue Kabelstrecken über den gesamten betrachteten Zeitraum von 50 Jahren für die beiden untersuchten Varianten. Die Investitionsspitze zu Beginn der Nachbildung (2008) ist eine Folge der Altersverteilung nach Bild 2, da am Anfang einige Kabel als Folge des Alters sich bereits im Zustand "schlecht" befinden, was einen unmittelba-

ren Austausch erfordert, da eine maximale Betriebsdauer von 70 bzw. 80 Jahren vorausgesetzt wird. Darüber hinaus ist die zweite Spitze zwischen 2035 und 2045 (oder 2040 und 2052 in Abhängigkeit der Varianten) ein Resultat des hohen Investitionsvolumens zu Beginn der 60er und 70er des letzten Jahrhunderts, was sich ebenfalls aus Bild 2 ablesen lässt.

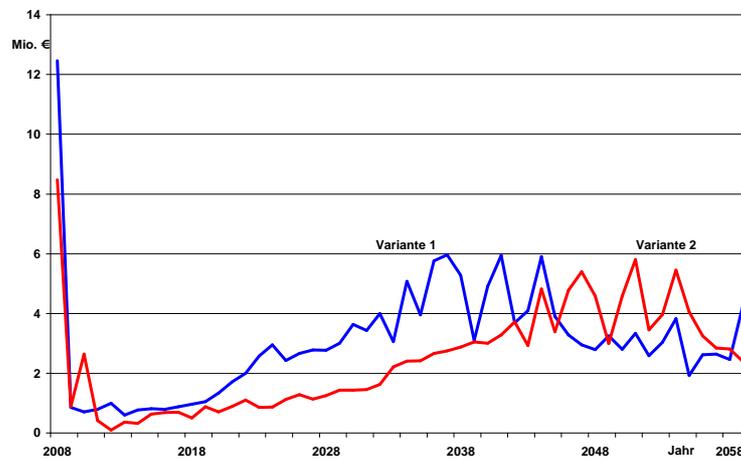


Bild 3: Jährliche Investitionen (CAPEX)

Auf der Basis der gesamten Kabellängen und der Fehlerraten können die jährlich wahrscheinlichen Reparaturkosten und zusätzlich die jährlichen Kosten für Kabelinspektionen (Muffen, Endverschlüsse) und die Kabelverluste bestimmt werden. Das Ergebnis stellt die gesamten Betriebskosten über den Betrachtungszeitraum dar (Bild 4). In den späteren Jahren ist die Verringerung der Betriebskosten eine Folge des Ersatzes der Papierbleikabel durch gleichwertige Kunststoffkabel, da in diesen Fällen eine Inspektion des Kabelzubehörs nicht mehr notwendig ist und des geringeren Ersatzbedarfs.

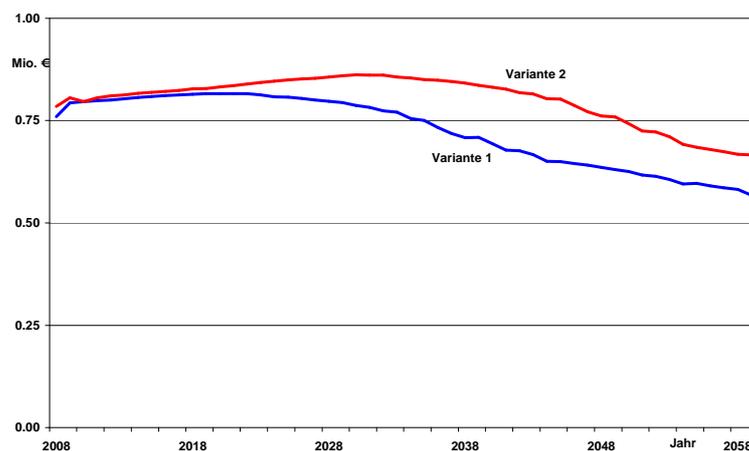


Bild 4: Jährliche Betriebskosten (OPEX)

Im folgenden werden die Betriebskosten hinsichtlich der unterschiedlichen Bestandteile für die Untersuchungsvariante 1 näher untersucht, hierbei werden die folgenden Kostenbestandteile berücksichtigt:

- Kabelverluste,
- Reparaturkosten als Folge von Störungen,
- Kosten durch Inspektion am Kabelzubehör (Papierbleikabel),
- Kosten für die nicht gelieferte Energie (Annahme: 5 €/kWh).

Die für den betrachteten Zeitraum ermittelten Betriebskosten sind in Bild 5 zusammengefasst, wobei auf die Auflistung der Kosten für die nicht gelieferte Energie aufgrund des geringes Betrages verzichtet wird (Maximalwert ca. 28 Tsd. €, Jahr: 2028), obwohl die ausgefallene kWh mit jeweils 5 € bewertet wird. Es zeigt sich, dass die Verlustkosten den größten Einfluss auf die Betriebskosten haben, mit einem Wert zwischen 0.6 und 0.5 Mio. € pro Jahr, während die übrigen Kostenarten von untergeordneter Bedeutung sind. Der Höchstwert der Betriebskosten tritt im Jahr 2021 mit einem Wert von 815.7 Tsd. € auf.

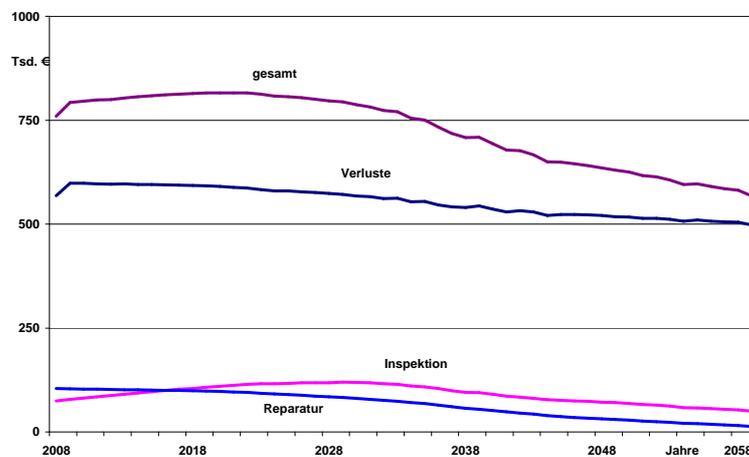


Bild 5: Gesamte Betriebskosten (Variante 1)

4 Bewertung

Ausgehend von den zwei untersuchten Strategien können die Auswirkungen auf die jährlichen Investitions- und Betriebskosten für ein Kabelnetz bestimmt und aufsummiert werden. Das Ergebnis ist in Tabelle 2 aufgetragen.

Kostenart	Variante 1	Variante 2
CAPEX / Mio. €	159.49	127.76
OPEX / Mio. €	37.72	41.67

Tabelle 2: Aufsummierte Zahlungen der Investitions- und Betriebskosten
 Variante 1: maximale Betriebsdauer 70 Jahre
 Variante 2: maximale Betriebsdauer 80 Jahre

Es zeigt sich, dass durch eine längere Nutzungsdauer (Variante 2) der Kabel trotz einer höheren Fehlerrate die Investitionskosten in Summe um einen Wert um 31.7 Mio. € unterschritten werden, bei gleichzeitiger Erhöhung der Betriebskosten um 4 Mio. € im Vergleich zur Variante 1. Einen wesentlichen Einfluss auf die Zahlungen hat hierbei das Ausfallverhalten der Kabel im Zeitbereich

zwischen 70 und 80 Jahren, da der Unterschied in den Betriebskosten in erster Linie eine Konsequenz der Reparaturkosten ist, während auch in diesem Fall die Kosten der nicht gelieferten Energie nicht von Bedeutung sind. Darüber hinaus könnte in einem zweiten Arbeitsschritt für eine Strategieentscheidung mit Hilfe der Vorgehensweise untersucht werden, um welchen Wert sich die Fehlerrate nach Tabelle 1 im Bereich > 70 Betriebsjahre erhöhen müsste, um Kostengleichheit der beiden Varianten zu erhalten.

Darüber hinaus ist grundsätzlich zu bedenken, dass Strategien, die sich zu Beginn der Simulation durch eine geringere Investition auszeichnen und damit unter Umständen höhere Betriebskosten auf spätere Jahre verschoben werden, stets den Vorzug gegenüber den Strategien haben, die durch einen größeren Investitionsaufwand zu Beginn, mit optimalen Betriebsmitteln, in den laufenden Jahren zu geringeren Betriebskosten führen. Dieses ist eine Folge des bei einer Barwertbetrachtung verwendeten Kapitaldienstfaktors der u. U. im Bereich von 7 %/a liegt.

5 Zusammenfassung

Grundsätzlich ist es möglich, das Investitions- und Wartungsverhalten von Betriebsmitteln mit Hilfe von statistischen Annahmen über einen größeren Zeitbereich nachzubilden, wobei wesentliche Randbedingungen vorgegeben werden (Fehlerrate, Aufwendungen für Instandhaltung usw.). Bei einer Änderung der Anfangsbedingungen, z. B. Wartungszyklus, können die Einflüsse auf die finanziellen Konsequenzen und der Netzzuverlässigkeit abgeschätzt werden.

Der entscheidende Vorteil einer dynamischen Simulation ist, neben der Berechnung der jährlichen Kosten eines Netzes, auch verschiedene Investitionsstrategien miteinander zu vergleichen und die Auswirkungen zu diskutieren unter Berücksichtigung der Randbedingungen. Dieses ist von besonderem Interesse, wenn die Auswirkungen einer Instandhaltungsstrategie für behördliche Gremien und einen Regulator dokumentiert und nachgewiesen werden müssen.

Literatur

- [1] Balzer, G.; Gaul, A.; Neumann, C.; Schorn, C.: The General Asset Management Process of Power Systems. Cigre Symposium 2007, Osaka, report 212
- [2] Balzer, G.; Asgari, L.; Gaul, A.: Dynamische Asset Simulation: Abschätzung des Investitionsbedarfs von Betriebsmitteln. ew, H 4, 2008, S. 26-30
- [3] FGH-Technischer Bericht 299: Asset-Management von Verteilungsnetzen – Komponentenverhalten und Analyse des Kostenrisikos