

RISIKOORIENTIERTE INSTANDHALTUNGSOPTIMIERUNG VON MITTELSPANNUNGSKABELN

Jochen Bühler, Martin Hallas, Gerd Balzer

Technische Universität Darmstadt, Landgraf-Georg-Str. 4 64283 Darmstadt,
+49(0)6151/16-3151, jochen.buehler@eev.tu-darmstadt.de,
<http://www.eev.e-technik.tu-darmstadt.de>

Kurzfassung: In diesem Paper wird eine Methodik zur Anwendung der risikoorientierten Instandhaltungsstrategie auf Mittelspannungskabel dargestellt. Hierfür wurde ein MATLAB® Modell entwickelt, mit welchem nicht nur das Ausfallrisiko eines bestehenden Netzes bestimmt sondern auch dieses für ein gegebenes Budget möglichst effizient reduziert werden kann. Dieses Ziel wird erreicht, indem das Kosten-Nutzen-Verhältnis möglicher Investitionen evaluiert wird. Diese werden in der vorgestellten Arbeit auf Erneuerungen beschränkt, da Inspektions- oder Wartungsmaßnahmen an Kabelanlagen nur unter besonderen Umständen sinnvoll sind. Anhand des berechneten Kosten-Nutzen-Verhältnisses ist es also möglich die möglichen Erneuerungsmaßnahmen zu priorisieren. Dadurch lassen sich Schwachstellen im Netz gezielt bestimmen und beheben. Allgemein unterstützt also das entwickelte Simulationsmodell Asset-Manager dabei, Entscheidungen über zukünftige Investitionen in das Kabelnetz zu objektivieren.

Keywords: Instandhaltungsoptimierung, Mittelspannungskabel, Kosten-Nutzen Analyse, Risikobewertung, Priorisieren

1 Einleitung

Die Jahre der Nachkriegszeit in Deutschland waren gekennzeichnet durch ein starkes Wirtschaftswachstum. Damit ging ein stetig steigender Bedarf an elektrischer Energie einher. Dies führte zu einem rasanten Ausbau des elektrischen Netzes, insbesondere in den 60er und 70er Jahren [1]. Die damals installierten Betriebsmittel waren für eine technische Lebensdauer von 40 Jahren und mehr ausgelegt [2]. Dies hat zur Folge, dass sich noch heute eine Vielzahl dieser Komponenten im Betrieb befindet. Abbildung 1 zeigt beispielsweise die Altersstruktur der Kabel eines deutschen Verteilungsnetzes.

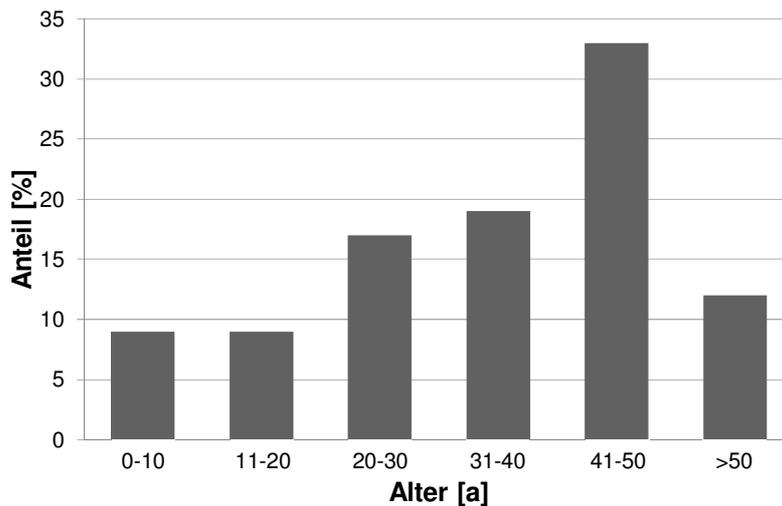


Abbildung 1: Altersstruktur der Kabel eines städtischen Verteilungsnetzes [3].

Diese zum Teil stark überalterten Komponenten, stellen heutige Netzbetreiber vor eine große Herausforderung. Denn sie erfordern eine intensivere Wartung bzw. eine baldige Erneuerung. Bleiben diese Maßnahmen aus, beeinflusst dies unter Umständen negativ die Versorgungszuverlässigkeit. Jedoch sind die Netzbetreiber seit der Liberalisierung des Energiemarktes im Jahr 1998 und insbesondere seit der Einführung der Anreizregulierung im Jahr 2009 einem erhöhten Kostendruck ausgesetzt und somit gezwungen auch im Bereich der Instandhaltung Kosten zu reduzieren [4][5]. Um allerdings überzogenen Einsparungen in diesem Bereich entgegenzuwirken, werden seitens des Gesetzgebers, in Deutschland, Kundenausfälle seit dem Jahr 2012 pönalisiert [6].

Das Ziel eines Asset-Managers ist daher, eine kostenoptimale Instandhaltungsstrategie im oben genannten Spannungsfeld zu finden. Hierzu muss das gegebene Instandhaltungsbudget stets optimal in das Netz investiert werden, sprich es muss der größtmögliche Nutzen für den Netzbetreiber bestimmt werden. Ein mögliches Werkzeug um dieses Ziel zu erreichen bietet die risikoorientierte Instandhaltungsstrategie. Anhand dieser Strategie ist es möglich Schwachstellen im Netz (also Betriebsmittel oder Betriebsmittelgruppen mit hohen Ausfallrisiken) gezielt auszumachen und zu beheben [7]. Feldversuche haben gezeigt, dass sich mithilfe dieser Strategie hohe Einsparpotentiale erschließen lassen [8]. Allerdings findet sie bisher nur in den höheren Spannungsebenen eine breite Anwendung [9]. Dabei weist gerade die Mittelspannungsebene eine hohe wirtschaftliche und technische Bedeutung für das gesamte elektrische Netz auf und bietet von daher erhebliche Optimierungspotentiale. Etwa 90% aller Kundenausfälle sind auf diese Spannungsebene zurückzuführen [10]. Die Anwendung der risikoorientierten Instandhaltungsstrategie in der Mittelspannungsebene gestaltet sich jedoch besonders schwierig. Sie kann nämlich nur angewendet werden, wenn sowohl der Zustand der Instandhaltungsobjekte als auch das Schadensausmaß bei einer Störung bewertet werden kann [7]. Die Mittelspannungsebene besteht jedoch aus einer hohen Anzahl von vergleichsweise günstigen Betriebsmitteln. Somit steht der Einsatz aufwendiger Monitoringsysteme zur Zustandserfassung oftmals in keinem angemessenen Verhältnis zu dem Wert der zu überwachenden Komponenten [11]. Auch aufwendige Zustandsprüfungen vor Ort sind oftmals nicht wirtschaftlich [12]. Aus diesem Grund beschränkt sich die

Zustandserfassung oberirdischer Anlagen in der Regel auf Inspektionen. Der Zustand unterirdischer Kabelanlagen hingegen kann im Regelfall lediglich über das Betriebsmittelalter, die Schadenshäufigkeit oder ähnliche Faktoren abgeschätzt werden.

Die Hauptfehlerquelle innerhalb der Mittelspannungsebene stellen Kabel eine dar [10]. Daher hat die optimale Instandhaltung dieser einen hohen Stellenwert hinsichtlich der Versorgungszuverlässigkeit. Zugleich weisen Mittelspannungskabel einen Tagesneuwert von ca. 23 Mrd. Euro auf. Dieser ist höher als die Summe der Tagesneuwerte aller Freileitungen, Transformatoren und Leistungsschalterfeldern in der Mittelspannungsebene [2]. Aus diesem Grund wird in diesem Paper eine Methodik vorgestellt, mit welcher es möglich ist die risikoorientierte Instandhaltungsstrategie auf Mittelspannungskabel anzuwenden. Hierfür wurde in MATLAB® ein Modell erstellt, mit welchem sich die Instandhaltung von einem beliebigen Mittelspannungskabelnetz optimieren lässt. Das Modell beschränkt sich auf Erneuerungen an Kabelanlagen, da an Kabeln in der Regel weder Inspektionen noch Wartungen durchgeführt werden können.

Zur Beschreibung der Funktionsweise des Modells werden zunächst die zum Verständnis notwendigen Grundlagen erläutert. Im Anschluss wird dargestellt, wie die erstellte Simulationssoftware das Kosten-Nutzen Verhältnis möglicher Instandhaltungsmaßnahmen berechnet. Basierend auf dieser Information können konkurrierende Erneuerungsmaßnahmen priorisiert werden, um so ein gegebenes Erneuerungsbudget optimal einzusetzen. Abschließend wird die Funktionsweise des Modells anhand von Beispielen aufgezeigt. Unter anderem wird ein Teilausschnitt eines real existierenden deutschen Mittelspannungsnetzes analysiert. Hierdurch ist es möglich allgemeine Erkenntnisse bezüglich der Erneuerung von Mittelspannungskabel zu gewinnen.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden wichtige theoretische Grundlagen zum Verständnis des Modells näher beleuchtet. Diese beinhalten den generellen Ausbau von Mittelspannungsnetzen sowie Mittelspannungskabelanlagen.

2.1 Aufbau von Mittelspannungsnetzen

Abbildung 2 zeigt den üblichen Aufbau eines Mittelspannungsnetzes. Es ist zu sehen, dass MS-Netze redundant aufgebaut sind und als offene Ringnetze betrieben werden [13].

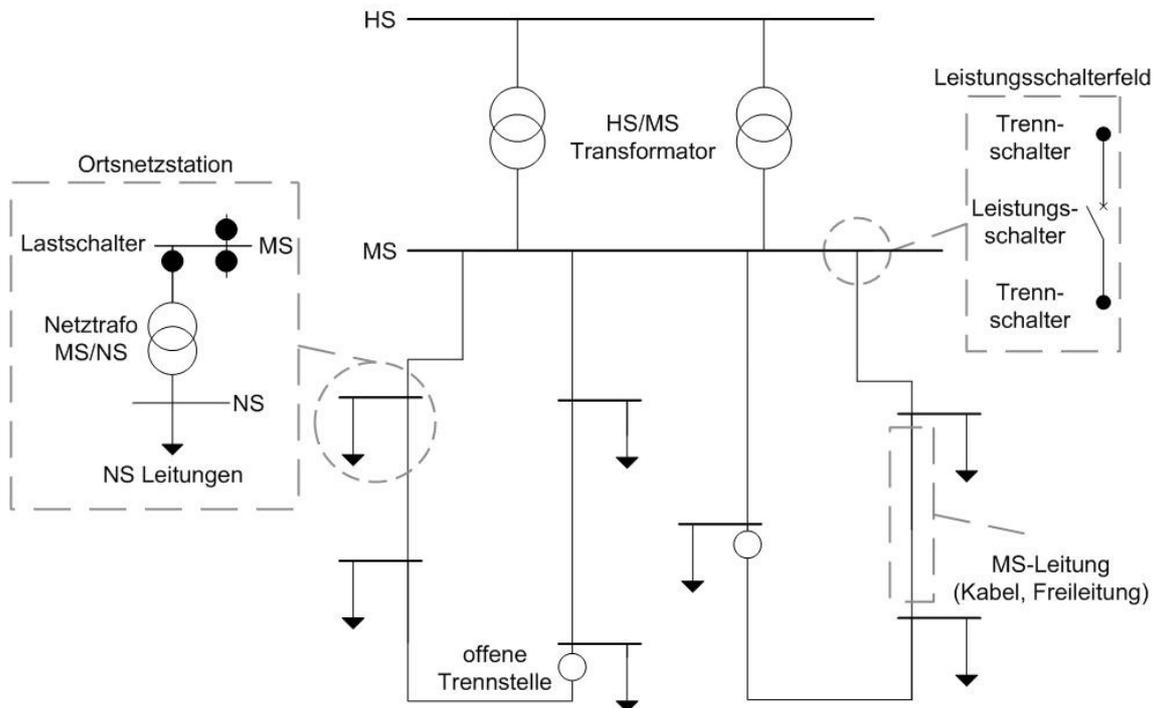


Abbildung 2: Prinzipieller Aufbau eines Mittelspannungsnetzes [11].

Die Leitungen bestehen in ländlichen Gebieten etwa zur Hälfte aus Freileitungen und zur anderen Hälfte aus Kabeln [14]. Deutsche Städte weisen einen fast hundertprozentigen Kabelanteil auf [15]. Aus diesem Grund ist der Verkabelungsgrad in Deutschland sehr hoch. Dieser liegt bei über 60% [16].

2.2 Aufbau von Mittelspannungskabelanlagen

Deutsche Großstädte erreichten schon früh einen hohen Verkabelungsgrad [16]. Seit dem wurden diese Kabelnetze bis zum heutigen Tage kontinuierlich erweitert und erneuert. Traditionell wurden für die Verkabelung Massekabel eingesetzt. Seit Anfang der 70er Jahre werden diese jedoch zunehmend durch modernere Kunststoffkabel (VPE) ersetzt. Der Übergang vom Massekabel zum Kunststoffkabel vollzog sich in der Mittelspannungsebene über das PE- und PVC-Kabel. Wegen seiner Empfindlichkeit gegenüber Wasser und Teilentladungen, sowie dem schlechten Temperaturverhalten wurden diese Kabel allerdings weitestgehend durch das VPE-Kabel abgelöst [17]. Hieraus resultiert, dass sich heute noch unterschiedliche Kabeltypen im Einsatz befinden, wobei VPE und Massekabel den größten Teil ausmachen (Abbildung 3).

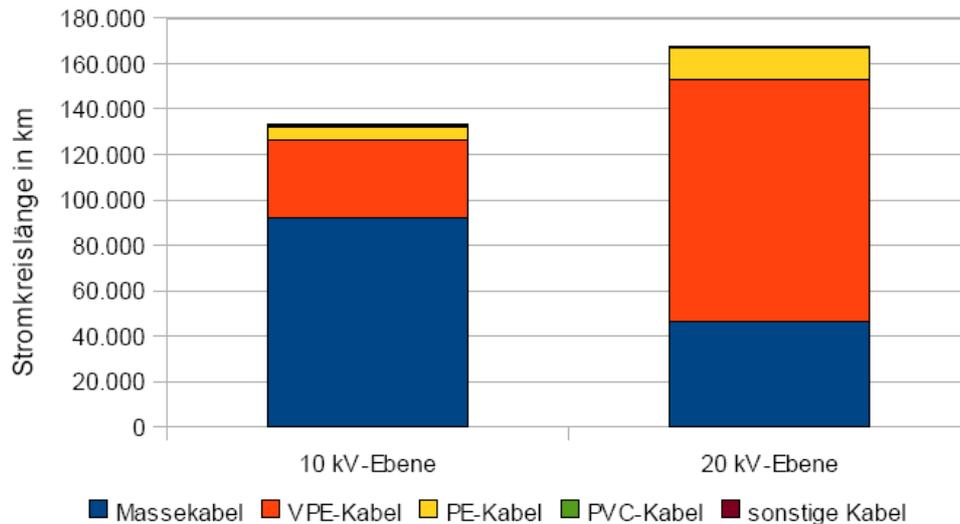


Abbildung 3: Stromkreislängen von Mittelspannungskabeln [18].

Eine ganze Kabelanlage (hiermit ist die gesamte Verbindungsleitung also von einem Kabelendverschluss zu dem anderen gemeint), besteht heutzutage jedoch nur selten aus einem Kabeltyp. Häufig weisen Kabelanlagen eine starke Segmentierung auf, d.h. dass mehrere Kabelstücke über Muffen miteinander verbunden sind. Abbildung 4 zeigt beispielhaft den Aufbau einer real existierenden Kabelanlage.



Abbildung 4: Segmentierte Kabelanlage mit Muffen (rund) und Endverschlüssen (rechteckig).

Es ist zu erkennen, dass sich die einzelnen Leiter nicht nur vom Dielektrikum her unterscheiden können, sondern auch vom Alter, Querschnitt, usw. Dieser Aufbau heutiger Kabelanlagen ist auf ihre Instandhaltungshistorie zurückzuführen. Kabel werden auch heute noch aufgrund ihrer schweren Zugänglichkeit in der Regel ereignisorientiert instand gehalten. Dies bedeutet, dass sämtliche Kabel betrieben werden, bis sie durch eine Störung ausfallen [19]. Erst daraufhin kommt es zu einer Instandsetzung. Das beschädigte Kabelteil wird in diesem Fall durch ein neues (heutzutage VPE) ersetzt. Dies spart zwar Kosten gegenüber dem Komplettaustausch, jedoch entstehen neue Übergangsstellen durch die notwendigen Muffen.

2.3 Kabelschäden

Kabelschäden können, aufgrund der unterirdischen Verlegung von Kabelanlagen, nur in Ausnahmefällen frühzeitig erkannt werden. Dementsprechend weiten sich diese mit der Zeit in der Regel zu Störungen aus und beeinträchtigen letztendlich den Normalbetrieb des Netzes. Nicht jeder Kabelschaden führt jedoch unweigerlich zu einer Versorgungsunterbrechung der Kunden. Laut [11] bewirken Schäden an Kabeln entweder eine unmittelbare Schutzauslösung (EAS) oder eine verzögerte Handausschaltung (VHA). Bei einer Schutzauslösung ist es im Gegensatz zu einer verzögerten Handausschaltung nicht möglich, präventive Maßnahmen zur Wiederversorgung zu treffen. Somit führen EAS-Schäden stets zu einer Versorgungsausfall der Kunden. Bei VHA-Schäden steht vor der Abschaltung des beschädigten Kabels, eine gewisse Zeitspanne (meist mehrere Stunden) zur Verfügung, um eine Umschaltung zu einem alternativen Versorgungspfad vorzubereiten. Da Mittelspannungsnetze in der Regel redundant aufgebaut sind (vgl. Kapitel 2.1) und somit ein alternativer Versorgungspfad meist vorhanden ist, beeinträchtigen diese Schäden im Normalfall nicht die Energieversorgung der Letztverbraucher [13][20].

3 Bestimmung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses von Erneuerungsmaßnahmen

Um ein gegebenes Erneuerungsbudget optimal in ein Netz zu investieren, ist es nötig genaue Informationen über das Kosten-Nutzen-Verhältnis möglicher Erneuerungsmaßnahmen zu besitzen. Nur so ist eine Vergleichbarkeit der einzelnen Investitionen möglich. Wie bereits erwähnt, unterscheiden sich Kabelanlagen bzw. Kabelabschnitte in der Regel jedoch in Dielektrikum, Alter, Durchmesser, Länge, usw., was natürlich den Vergleich erschwert. Um dieses Problem zu lösen, wurde eine Methodik erarbeitet, mit welcher es möglich ist, einen Kosten-Nutzen Wert für beliebige Maßnahmen zu berechnen. Hierzu wird in Kapiteln 3.1 und 3.2. gezeigt wie sich Nutzen und Kosten einer Erneuerungsmaßnahme bestimmen lassen.

3.1 Nutzen

Der Nutzen einer Erneuerungsmaßnahme im Kabelnetz, besteht in der Absenkung des Netzausfallrisikos. Er bestimmt sich somit aus der Differenz des Schadensrisikos eines bestimmten Kabels vor und nach dem Ersatz. Mathematisch wird das Schadensrisiko nach DIN IEC 56 410 durch das Produkt aus Schadenswahrscheinlichkeit und Schadenskonsequenz beschrieben.

Zur Beschreibung der Schadenswahrscheinlichkeit wird in dieser Arbeit die Schadensrate verwendet [21]. Da sich Kabelanlagen in der Regel aus einer Vielzahl an Kabelstücken und Garnituren zusammensetzen (vgl. Kapitel 2.2), müssen bei der Bewertung des Gesamtrisikos die Schadensraten aller Komponenten berücksichtigt werden (zeitgleiche Ausfälle der Komponenten sind nicht Gegenstand der Untersuchung, da sich elektrische Betriebsmittel die meiste Zeit in intaktem Normalzustand befinden [11]).

Die Konsequenzen von Schäden an Mittelspannungskabeln können sehr vielfältig sein. Sie können von finanzieller Art sein oder bis hin zu einem Imageverlust des Betreibers reichen. Der Fokus in dieser Arbeit liegt jedoch auf dem monetären Schaden.

Sind sowohl die Schadensrate als auch die Schadenskosten eines beliebigen Kabels bekannt, so ist es möglich dessen Schadensrisiko zu bestimmen. Besteht ein Kabel aus mehreren Kabelstücken unterschiedlichen Typs (z.B. Dielektrikum oder Alter), so ist es nötig, diese entsprechend ihrer Länge, getrennt voneinander zu betrachten. Zudem kann es unter Umständen notwendig sein Kabelstrecken entsprechend ihrer Verlegungsumgebung zu unterteilen. Dies liegt darin begründet, dass der Verlegungsort sowohl einen Einfluss auf die Schadenskosten als auch auf die Schadensrate hat.

Weiterhin müssen bei der Berechnung EAS- und VHA Schäden stets getrennt voneinander berücksichtigt werden. Diese Schadenstypen unterscheiden sich nämlich erheblich hinsichtlich ihrer Schadenswahrscheinlichkeit und –konsequenz (vgl. Kapitel 2.3). Das Gesamtrisiko R_{Ges} eines Kabels setzt sich demnach aus den Schadensrisiken für EAS- R_{EAS} und VHA-Schäden R_{VHA} zusammen. Da die Schadensraten der Kabelstücke abhängig von deren Betriebsalter t [11] sind, ist daher das Gesamtrisiko eine Funktion der Zeit (die Schadensraten von Garnituren werden in dieser Arbeit als konstant angenommen). Das Gesamtrisiko eines Kabels bestehend aus i Kabelstücken (Index K) und j Garnituren (Index G) ergibt sich also aus Gleichungen 1, 2 und 3. Hierbei sind λ_{EAS-K} , λ_{VHA-K} , λ_{EAS-G} , λ_{VHA-G} die Schadensraten und sk_{EAS-K} , sk_{VHA-K} , sk_{EAS-G} , sk_{VHA-G} die Schadenskosten der jeweiligen Elemente in Abhängigkeit des Schadentyps. Es ist zu beachten, dass die Schadensraten der Kabelstücke immer als Funktion der Kabellänge l angegeben werden, wohingegen die Schadensraten von Garnituren absolute Werte sind.

$$R_{Ges}(i, j, t_1, \dots, t_i, l_1, \dots, l_i) = R_{EAS}(i, j, t_1, \dots, t_i, l_1, \dots, l_i) + R_{VHA}(i, j, t_1, \dots, t_i, l_1, \dots, l_i) \quad (1)$$

$$R_{EAS}(i, j, t_1, \dots, t_i, l_1, \dots, l_i) = \sum_i sk_{EAS-K,i} \cdot \lambda_{EAS-K,i}(t_i) \cdot l_i + \sum_j sk_{EAS-G,j} \cdot \lambda_{EAS-G,j} \quad (2)$$

$$R_{VHA}(i, j, t_1, \dots, t_i, l_1, \dots, l_i) = \sum_i sk_{VHA-K,i} \cdot \lambda_{VHA-K,i}(t_i) \cdot l_i + \sum_j sk_{VHA-G,j} \cdot \lambda_{VHA-G,j} \quad (3)$$

Da das Gesamtrisiko eines Kabels maßgeblich durch die Kabellänge beeinflusst wird, ist ein direkter Vergleich möglicher Erneuerungsmaßnahmen bei unterschiedlichen Kabellängen nicht möglich. Eine Vergleichbarkeit kann nur erreicht werden, wenn der Erneuerungsnutzen auf die Gesamtkabellänge l_{Ges} bezogen wird. Dieser normierte Nutzen $\Delta R'_{Ges}$ hat somit die Einheit [€/km·a] und kann mit Gleichung 4 bestimmt werden. Wobei $R_{Ges,Vor}$ und $R_{Ges,Nach}$ die Risiken vor und nach der Erneuerung sind.

$$\Delta R'_{Ges} = \frac{\Delta R_{Ges}}{l_{Ges}} = \frac{R_{Ges,Vor} - R_{Ges,Nach}}{l_{Ges}} \quad (4)$$

In Kapiteln 3.1.2 und 3.1.1 wird im Folgenden gezeigt, wie sich die Schadensraten bzw. die Schadenskosten aus Gleichungen 2 und 3 für beliebige Kabel bzw. Garnituren bestimmen lassen.

3.1.1 Schadensrate

Kabelanlagen sind in der Praxis, über ihre Betriebszeit hinweg, einer Vielzahl von elektrischen und mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt. Dies wirkt sich auf das Ausfallverhalten dieser aus. Da die Beanspruchungshöhe jeder Komponente in der Kabelanlage sehr individuell ist, muss sie fallspezifisch untersucht werden. In Kapiteln 3.1.1.1 und 3.1.1.2 werden die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Schadensraten von Kabeln und Garnituren näher analysiert.

3.1.1.1 Kabel

Das Ausfallgeschehen von Kabeln wird nach [11] im Wesentlichen durch altersbedingte sowie fremd verursachte Schäden bestimmt. Vorbeugende Maßnahmen, welche zur Prävention von externen Schäden getroffen werden können, sind meist sehr begrenzt (Es ist beispielsweise möglich, generell Kabel mit robusteren Kabelmänteln einzusetzen. Dies würde jedoch zu unverträglich hohen Investitionskosten führen). Von daher spielen fremd verursachte Schäden für die Energieversorger in der Regel nur eine untergeordnete Rolle. Viel wichtiger sind Kabelausfälle, welche auf die Alterung des Kabels zurückzuführen sind. Solche Ausfälle könnten nämlich durch die Einleitung von rechtzeitigen Erneuerungsmaßnahmen verhindert werden. Aus diesem Grund ist es nötig die Schadensraten von Kabeln in eine Schadensrate für altersbedingte und eine für fremd verursachte Schäden zu unterteilen.

Bei der Bestimmung der altersabhängigen Schadensrate (Index Alt) ist zu beachten, dass das Betriebsalter t eines Kabels zwar einen Indiz für den Abnutzungsgrad eines Kabels ist, jedoch müssen hier zusätzliche Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Ein Hinweis auf eine hohe Abnutzung kann beispielsweise eine hohe Schadensanfälligkeit des Kabels in der Vergangenheit sein. Zusätzlich ist es nötig außergewöhnliche Ausnahmeneigenschaften von Kabeln wie z.B. ein besonders kritischer Verlegungsort zu berücksichtigen. Dementsprechend wurden in dem MATLAB® Modell die dimensionslosen Parameter SA für die Schadensanfälligkeit und AE für außergewöhnliche Eigenschaften eingeführt, mit welchen die altersabhängigen Schadensraten fallspezifisch gewichtet werden können. Es wird angenommen, dass sich die Parameter im gleichen Maße auf die Eintrittswahrscheinlichkeit von EAS- sowie VHA-Schäden auswirkt. Weiterhin wird bei der Bestimmung der Schadensrate externer Schäden (Index Ext) die Annahme getroffen, dass solche Schäden stets eine unmittelbare Schutzauslösung bewirken und somit vom Typ EAS sind. Dies liegt darin begründet, dass externe Einflüsse wie beispielsweise Baggerarbeiten in der Regel gleich mehrere Phasen eines Kabels stark beschädigen. Dadurch ist eine kontrollierte Abschaltung wie z.B. bei einphasigen Kurzschlüssen in kompensierten oder isolierten Netzen nicht möglich. Für die Berechnung der EAS- λ_{EAS-K} und VHA-Schadensraten λ_{VHA-K} ergeben sich somit Gleichungen 5 und 6. Die Gewichtungsfaktoren gew können hierbei vom Anwender genutzt werden um alle Einflussfaktoren nach Belieben zu gewichten. In Übereinstimmung mit der heutigen Instandhaltungspraxis der Netzbetreiber, sollte jedoch gew_{SA} tendenziell stärker gewichtet werden als die anderen Faktoren. Dies ist dadurch zu begründen, dass die Schadensanfälligkeit von Kabeln schon für sich allein genommen ein Erneuerungskriterium für die Netzbetreiber sein kann.

$$\lambda_{EAS-K}(t) = \lambda_{EAS-K,Alt}(t) \cdot (\text{gew}_{Alt} + SA \cdot \text{gew}_{SA} + AE \cdot \text{gew}_{AE}) + \lambda_{EAS-K,Ext} \cdot \text{gew}_{Ext} \quad (5)$$

$$\lambda_{VHA-K}(t) = \lambda_{VHA-K,Alt}(t) \cdot (\text{gew}_{Alt} + SA \cdot \text{gew}_{SA} + AE \cdot \text{gew}_{AE}) \quad (6)$$

In den nächsten Abschnitten werden die bereits erwähnten Parameter „externe Einflüsse“, „Alterung“, „Schadensanfälligkeit in der Vergangenheit“ und „außergewöhnliche Kabeleigenschaften“ näher analysiert.

Externe Einflüsse

Mehr als ein Viertel (27%) aller Kabelschäden im elektrischen Netz, werden durch externe Einflüsse verursacht [10]. Somit stellen fremd verursachte Schäden ein nicht zu vernachlässigendes Risiko dar und müssen von daher berücksichtigt werden. Wie in Tabelle 1 zu sehen ist, weisen fast alle Kabeltypen eine nahezu identische mittlere Schadensrate für fremd verursachte Schäden auf. Einen erhöhten Wert weisen lediglich PE-Kabel auf. Dies wird in [11] auf die geringere mechanische Festigkeit des Kabelmantels zurückgeführt.

Tabelle 1: Mittlere Schadensrate externer Einflüsse $\lambda_{EAS-K,Ext}$ [11].

Kabeltypen	Mittlere Schadensrate externer Einflüsse [1/km·a]
PE-Kabel	0,0119
PVC-Kabel	0,0039
Massekabel	0,0034
VPE-Kabel	0,0036

Alterung

In [11] wurde das Langzeitverhalten von VPE- und Massekabeln untersucht. Zudem sind in der Studie die mittleren Schadensraten für PE- und PVC Kabel zu finden. Im Folgenden werden aus den Werten in [11] jeweils zwei Schadensratenfunktionen für EAS- und VHA-Schäden für alle Kabeltypen bestimmt.

VPE-Kabel

VPE-Kabel werden generell hinsichtlich ihrer Anfälligkeit gegenüber altersbedingter Schäden, in Kabel der neuen und der alten Generation unterteilt. Aufgrund von Konstruktionsmängeln sind VPE-Kabel, welche bis zum Jahr 1983 verlegt wurden, stark wasserbäumchengefährdet [11]. Sie weisen somit eine wesentlich höhere Schadensrate auf, als Kabel der neuen Generation, wo dieses Problem weitestgehend behoben wurde [17]. In [11] wurde das Ausfallverhalten für Kabel beider Generationen untersucht. In beiden Fällen hat sich ein exponentieller Anstieg der Schadensraten für VHA und EAS-Schäden mit der Zeit t gezeigt. Die Werte für die Parameter a und b der exponentiellen Funktionen in Gleichungen 7 und 8, sind in Tabelle 2 gegeben und wurden [11] entnommen.

$$\lambda_{\text{EAS-K,Alt}}(t) = a_{\text{EAS}} \cdot e^{b_{\text{EAS}} \cdot t} \quad (7)$$

$$\lambda_{\text{VHA-K,Alt}}(t) = a_{\text{VHA}} \cdot e^{b_{\text{VHA}} \cdot t} \quad (8)$$

Tabelle 2: Parameter zur Berechnung der altersabhängigen Schadensraten von VPE-Kabeln [11].

Parameter	VPE neue Generation	VPE alte Generation
$a_{\text{EAS}} [1/(\text{km} \cdot \text{a})]$	0,001209	0,000436
$a_{\text{VHA}} [1/(\text{km} \cdot \text{a})]$	0,000242	0,000087
$b_{\text{EAS}} [1/\text{a}]$	0,039746	0,161723
$b_{\text{VHA}} [1/\text{a}]$	0,039746	0,161723

Massekabel

In [11] wurde das Ausfallverhalten von Massekabeln bis zu ihrem 55ten Nutzungsjahr analysiert. Es hat sich gezeigt, dass sowohl die Schadensrate für EAS- als auch die für VHA-Schäden als konstant über die Zeit angenommen werden kann. Demnach gelten Gleichungen 9 und 10.

$$\lambda_{\text{EAS-K,Alt}}(t) = c_{\text{EAS}} \quad \text{für } t \leq 55\text{a} \quad (9)$$

$$\lambda_{\text{VHA-K,Alt}}(t) = c_{\text{VHA}} \quad \text{für } t \leq 55\text{a} \quad (10)$$

Es ist zu beachten, dass die Schadensraten für EAS- und VHA-Schäden in [11] auch fremd verursachte Schäden beinhalten. Da an dieser Stelle allerdings ausschließlich altersbedingte Schäden betrachtet werden sollen, wurde die Schadensrate für fremd verursachte Schäden von der für EAS-Schäden subtrahiert. Wie bereits erwähnt, wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass alle Schäden, welche durch externe Einflüsse verursacht werden, den EAS-Schäden zuzuordnen sind. Die resultierenden Werte für c sind in Tabelle 3 gegeben.

Tabelle 3: Parameter zur Berechnung der altersabhängigen Schadensraten von Massekabeln.

Parameter	Massekabel
$c_{\text{EAS}} [1/(\text{km} \cdot \text{a})]$	0,00408
$c_{\text{VHA}} [1/(\text{km} \cdot \text{a})]$	0,00240

Da die verwendete Statistik keine Daten für Kabel über 55 Jahre liefert, wurde zur Berücksichtigung auch älterer Massekabel, in dem MATLAB® Modell zusätzlich eine Prognosefunktion implementiert. Hierbei muss eine Variable *prog* für ein beliebiges Jahr T (über 55 Jahren) vom Benutzer definiert werden. Für das gegebene Jahr wird schließlich

eine Schadensrate nach Gleichung 11 bestimmt. Die Werte für c entsprechen dabei denen aus Tabelle 3. Durch lineare Interpolation zwischen der berechnenden Schadensrate und der im fünfundfünfzigsten Jahr, ist es demnach möglich auch Massekabeln über dem 55ten Nutzungsjahr eine Schadensrate zuzuordnen (vgl. Abbildung 5). Der Faktor $prog$ sollte tendenziell größer eins gewählt werden, da mit einem Anstieg der Schadensraten mit zunehmenden Kabelalter zu rechnen ist. Es sei darauf hingewiesen, dass das Modell auch die Möglichkeit bietet mehrere Stützstellen für verschiedene Zeitpunkte zu definieren. In diesem Fall würde die Interpolation zwischen allen verfügbaren Werten stattfinden.

$$\lambda(T) = c + c \cdot prog \quad (11)$$

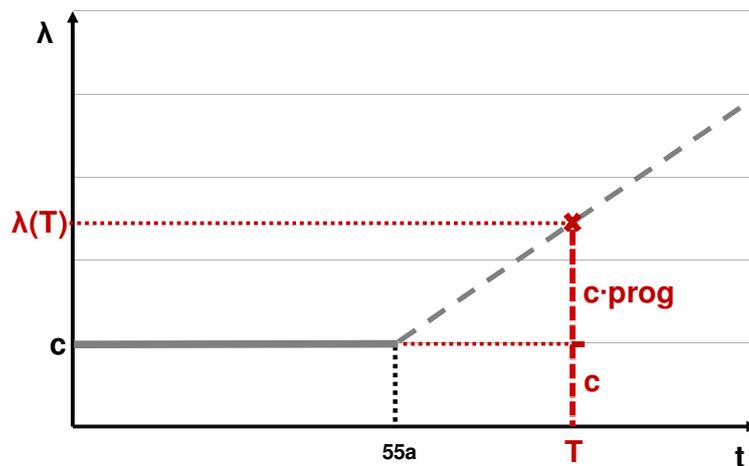


Abbildung 5: Prognose der Alterung von Massekabeln.

PE- und PVC Kabel

Da das Alterungsverhalten von PE- und PVC-Kabeln in [11] nicht näher untersucht wurde und der Bestandteil dieser Kabel im heutigen Netz relativ gering ist (vgl. Abbildung 3), werden die Schadensraten dieser Kabeltypen als konstant über die Zeit angenommen. Somit gilt:

$$\lambda_{\text{EAS-K,Alt}}(t) = c_{\text{EAS}} \quad (12)$$

$$\lambda_{\text{VHA-K,Alt}}(t) = c_{\text{VHA}} \quad (13)$$

Wie bereits erwähnt, sind in [11] lediglich die mittleren Schadensraten von PE- und PVC-Kabeln enthalten. Die Studie liefert jedoch keine Informationen bezüglich des Verhältnisses von EAS- zu VHA-Schäden. Da allerdings davon auszugehen ist, dass dieses bei allen Kunststoffkabeln ähnlich ist, wird die Annahme getroffen, dass es dem von VPE-Kabeln entspricht. Dieses berechnet sich mit den Werten aus Tabelle 2 nach Gleichung 14. Wie zu sehen ist, ist das Verhältnis bei VPE-Kabeln der alten und der neuen Generation fast identisch.

$$\frac{\lambda_{\text{EAS-K,Alt}}(t)}{\lambda_{\text{VHA-K,Alt}}(t)} = \frac{0,001209 \cdot e^{0,039746 \cdot t}}{0,000242 \cdot e^{0,039746 \cdot t}} \approx \frac{0,000436 \cdot e^{0,161723 \cdot t}}{0,000087 \cdot e^{0,161723 \cdot t}} \approx 5 \quad (14)$$

Mit dem Berechneten Verhältnis und den mittleren Schadensraten in [11] ergeben sich für den Parameter c in Gleichungen 12 und 13 die Werte in Tabelle 4.

Tabelle 4: Parameter zur Berechnung der altersabhängigen Schadensraten von PE- und PVC-Kabeln.

Parameter	PE-Kabel	PVC-Kabel
c_{EAS}	0,1948	0,0162
c_{VHA}	0,0390	0,0032

Schadensanfälligkeit in der Vergangenheit

Heutzutage ist es gängige Praxis der Netzbetreiber Erneuerungsentscheidungen im Kabelnetz anhand der Schadenshistorie von Kabeln zu fällen. Dies liegt daran, dass davon ausgegangen wird, dass ein Kabel, welches beispielsweise innerhalb eines kurzen Zeitraums mehrere nicht fremd verursachte Schäden aufgewiesen hat, insgesamt einen hohen Abnutzungsgrad aufweist. Demnach wäre dieses mit einer hohen Erneuerungspriorität zu versehen.

Dieser Sachverhalt wird in dem vorgestellten Modell anhand des Parameters SA berücksichtigt. Für dessen Bestimmung wurde ein Fuzzy-Logik-Modell mit zwei Eingangsgrößen entwickelt [22]. Die Eingangsgröße „Schadenshäufigkeit“ beschreibt die Anzahl an Schäden und das „Schadensintervall“ den zeitlichen Abstand zwischen diesen. Da es sich hierbei um unscharfe Größen handelt, bietet sich die Verwendung der Fuzzy-Logik an. Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, ist das Fuzzy-System nach einem in der Praxis vielfach erprobten Standardansatz aufgebaut [22]. Dies bedeutet, dass die Eingangsparameter durch Dreiecksfunktionen und der Ausgangsparameter mit Singletons modelliert wurde. Für die Defuzzifizierung wurde die „center of area“ Methode eingesetzt. Für jede Eingangsgröße wurden zwei linguistische Variablen definiert. Für die Schadenshäufigkeit „normal“ und „hoch“ und für Schadensintervall „kurz“ und „lang“. Die hieraus resultierende Schadensanfälligkeit, wird mit den drei linguistischen Variablen „normal“, „erhöht“ oder „stark erhöht“ beschrieben. Alle Parameter liegen im Bereich zwischen null und eins.

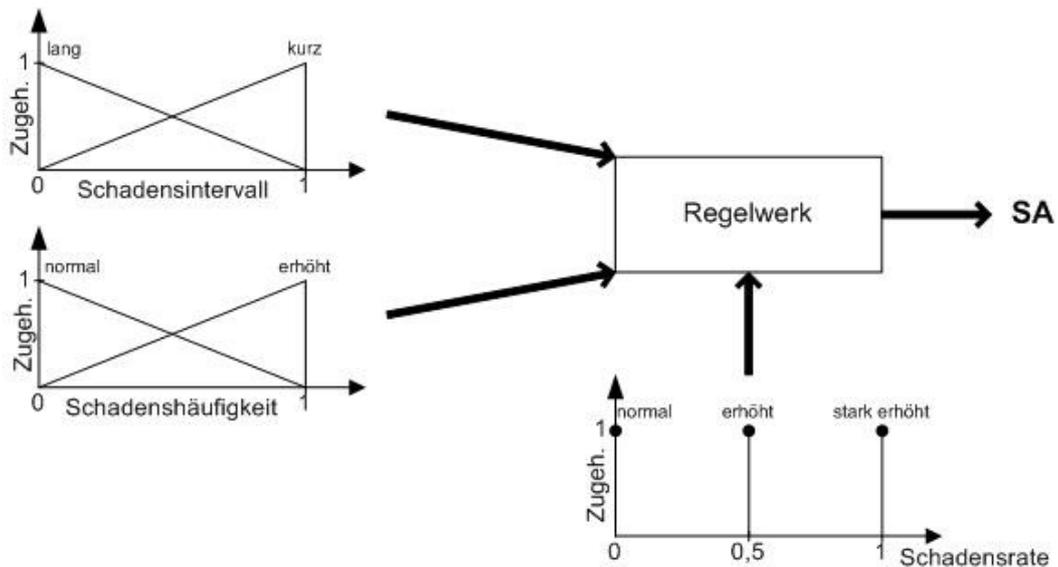


Abbildung 6: Fuzzy-Logik-Modell zur Berechnung der Schadensanfälligkeit SA.

Das Regelwerk des Modells ist in Tabelle 5 dargestellt. Insgesamt wurden vier Regeln definiert. Dies entspricht der Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten der Eingangsparameter. Es ist zu erkennen, dass das Schadensintervall stärker gewichtet wurde als die Schadenshäufigkeit, was auch der Einschätzung von Experten entspricht.

Tabelle 5: Regeln des Fuzzy-Logik-Modells zur Berechnung der Schadensanfälligkeit SA.

Schadensintervall	Schadenshäufigkeit	Schadensanfälligkeit
lang	normal	normal
lang	hoch	erhöht
kurz	normal	stark erhöht
kurz	hoch	stark erhöht

Allgemein wird ein Schadensintervall von zehn Jahren als „lang“ und eines von einem Jahr als „kurz“ angesehen. Welche Schadenshäufigkeiten jedoch als „hoch“ bzw. „niedrig“ einzuordnen sind, hängt stark von dem jeweiligen Kabeltypen ab. Bei besonders kritischen Kabeln (siehe oben) wie alten VPE- oder PE-Kabeln, reicht beispielsweise ein Schaden bereits aus, um diese als „hoch“ einzustufen. Wohingegen bei Masse- und neuen VPE-Kabeln mehrere Schäden als „normal“ angesehen werden können.

Außergewöhnliche Kabeleigenschaften

Zur Berücksichtigung außergewöhnlicher Kabeleigenschaften wurde in Gleichungen 6 und 7 der Faktor *AE* eingeführt. Dieser kann wahlweise im Bereich zwischen null und unendlich liegen. Somit ist es dem Anwender des Modells überlassen, wie stark er den Einfluss des Parameters bewerten möchte. Zur Erleichterung bei der Wahl der Höhe des Parameters,

werden an dieser Stelle, exemplarisch einige zu berücksichtigende Kabeleigenschaften aufgeführt:

- Massekabeleinschlüsse: Beidseitig durch Übergangsmuffen (diese verbinden Kabel ungleichen Typs z.B. VPE- mit Massekabeln) eingeschlossene Massekabel sind vom natürlichen Massefluss unterbrochen und können nicht mehr bei der Instandhaltung nachgetränkt werden. Aus diesem Grund wird eine schnellere Alterung dieser Einschlüsse vermutet [23].
- Sektorförmiger Leiter: Bis in die Mitte der 80er Jahre wurden Massekabel mit sektorförmigen Leitern verlegt. Diese weisen eine leicht erhöhte Schadensrate auf.
- Korrosion durch Streuströme: Werden Massekabel in der Nähe von Bahngleisen verlegt, so können Streuströme im Erdreich zu einer Korrosion des Außenmantels durch elektrochemische Prozesse führen, was zu frühzeitigen Schäden führen kann [24].

Tendenziell ist der Wertebereich für AE auf den unteren Dezimalbereich zu beschränken, da eine besonders hohe Auswirkung dieses Parameters auf die auf das Ausfallgeschehen von Kabeln, in der Praxis noch nicht nachgewiesen werden konnte.

3.1.1.2 Garnituren

Garnituren sind für einen Anteil von etwa einem Viertel aller Schäden in Kabelanlagen verantwortlich [11]. Zur vollständigen Bewertung des Ausfallgeschehens von Kabelanlagen ist es demnach nötig, die Schadenswahrscheinlichkeit dieser näher zu analysieren. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Überlegungen bezüglich des Ausfallverhaltens von Kabeln, werden die Schadensraten von Garnituren als konstant angenommen. Somit findet eine Unterscheidung lediglich hinsichtlich des Bautyps statt. Es sei weiterhin darauf hingewiesen, dass in Tabelle 1 fremd verursachte Schäden an Garnituren bereits mitberücksichtigt wurden. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass deren Anteil, aufgrund des geringen Ausmaßes von Garnituren gegenüber einer gesamten Kabelanlage, vernachlässigbar gering ist. D.h. in diesem Kapitel werden ausschließlich abnutzungsbedingte Schäden untersucht.

Die mittleren Schadensraten für Garnituren von VPE- und Massekabeln sind in Tabelle 6 zu finden und wurden [11] entnommen. Für Garnituren von PE- und PVC-Kabeln, wird wiederum angenommen, dass sie denen von VPE-Kabeln entsprechen.

Tabelle 6: Mittlere Schadensraten von Muffen und Endverschlüssen nach [11].

Schadensraten von Muffen und Endverschlüssen [1/a·km]	EAS	VHA
VPE-Kabel alter und neuer Generation*	0,001127	0,000397
Massekabel	0,007816	0,001090

* Fremd verursachte Schäden waren ursprünglich hier mit enthalten. Wurden allerdings von den EAS-Schäden abgezogen.

Es ist zu sehen, dass in [11] Muffen und Endverschlüsse nur gemeinsam erfasst und als Mittelwerte in Abhängigkeit der Kabellänge angegeben wurden. Es ist allerdings bekannt, dass der Schadensanteil von Endverschlüssen (13,9%) in Kabelanlagen gegenüber dem von Muffen (21%) um etwa ein Drittel geringer ist [11]. Unter Verwendung der zusätzlichen Informationen, dass die mittlere Länge von Kabelanlagen in Deutschland 651 Meter beträgt und dass im Schnitt 2,75 Muffen pro Kilometer Kabel installiert sind, ist es möglich im Folgenden aus den Werten in Tabelle 6, individuelle Schadensraten für einzelne Muffen bzw. Endverschlüsse abzuschätzen [16][23]. Die Berechnung der EAS-Schadensrate einer VPE-Muffe ergibt sich beispielsweise Gleichung 15.

$$\lambda_{\text{EAS-G}} = \frac{21\%}{(13,9\% + 21\%)} \cdot 0,001127 \cdot \frac{1}{\text{km} \cdot \text{a}} \cdot \frac{1}{2,75} \text{km} = 2,47 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{a}} \quad (15)$$

Die EAS-Schadensrate eines VPE-Endverschlusses ergibt sich z.B. aus Gleichung 16 (es muss hier durch zwei dividiert werden, da jede Kabelanlage zwei Endverschlüsse besitzt).

$$\lambda_{\text{EAS-G}} = \frac{13,9\%}{(13,9\% + 21\%)} \cdot 0,001127 \cdot \frac{1}{\text{km} \cdot \text{a}} \cdot 0,651 \text{km} \cdot \frac{1}{2} = 1,46 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{a}} \quad (16)$$

Alle weiteren Schadensraten für Garnituren sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Schadensraten für Garnituren.

Schadensrate [1/a]	VPE-Kabel		Massekabel	
	Muffe	Endverschluss	Muffe	Endverschluss
EAS	$2,47 \cdot 10^{-4}$	$1,46 \cdot 10^{-4}$	$1,71 \cdot 10^{-3}$	$1,01 \cdot 10^{-3}$
VHA	$8,69 \cdot 10^{-5}$	$5,15 \cdot 10^{-5}$	$2,39 \cdot 10^{-4}$	$1,41 \cdot 10^{-4}$

Bisher unberücksichtigt blieben Übergangsmuffen. Studien an Massekabeln haben jedoch gezeigt, dass Schäden an Übergangs- und Verbindungsmuffen nahezu in gleichen Anteilen auftreten [16]. Aus diesem Grund entsprechen die Schadensraten von Übergangsmuffen denen von Massekabeln in Tabelle 7.

3.1.2 Schadenskosten

Allgemein setzen sich die Kosten infolge eines Schadens aus folgenden Bestandteilen zusammen:

- Reparaturkosten
- Unterbrechungskosten (inklusive Pönalen)
- Kundenausfallkosten und
- Kosten durch Umwelt- und Personenschäden.

Kundenausfallkosten müssen nach aktueller deutscher Gesetzeslage nur vom Netzbetreiber getragen werden, wenn dieser fahrlässig gehandelt hat [25]. Weiterhin sind Schäden an Umwelt und Menschen vielschichtig und lassen sich nur schwer quantifizieren. Aus diesem Grund, werden in dieser Arbeit ausschließlich Reparatur- und Unterbrechungskosten berücksichtigt. Die Schadenskosten sk_{EAS-K} , sk_{VHA-K} , sk_{EAS-G} , sk_{VHA-G} ergeben sich demnach aus Gleichungen 17, 18, 19 und 20.

$$sk_{EAS-K} = rk_{EAS-K} + uk_{EAS-K} \quad (17)$$

$$sk_{VHA-K} = rk_{VHA-K} + uk_{VHA-K} = rk_{VHA-K} \quad (18)$$

$$sk_{EAS-G} = rk_{EAS-K} + uk_{EAS-G} \quad (19)$$

$$sk_{VHA-G} = rk_{VHA-G} + uk_{VHA-G} = rk_{VHA-G} \quad (20)$$

Hierbei sind rk_{EAS-K} , rk_{VHA-K} , rk_{EAS-G} , rk_{VHA-G} , uk_{EAS-K} , uk_{EAS-G} , uk_{VHA-K} , uk_{VHA-G} die Reparatur- und Unterbrechungskosten für Garnituren und Kabel in Abhängigkeit des Schadenstyps. Da es, wie bereits erwähnt, lediglich bei EAS-Schäden zu einer Versorgungsunterbrechung kommt ist uk_{VHA-K} und uk_{VHA-G} null. Wie die restlichen Parameter bestimmt werden können wird im Anschluss gezeigt.

Reparaturkosten

In [11] wurden die Reparaturkosten infolge eines Schadens für VPE- und Massekabel statistisch erfasst. Miteinbegriffen sind hierbei die Garnituren beider Kabeltypen (Endverschlüsse und Verbindungsmuffen zwischen typgleichen Kabeln). Die Statistischen Werte liefern jedoch keine Informationen bezüglich der Reparaturkosten von PE- und PVC-Kabeln sowie Übergangsmuffen. Aus diesem Grund müssen an dieser Stelle Annahmen getroffen werden. Bei PE- und PVC-Kabeln wird davon ausgegangen, dass sämtlicher Kunststoffkabel ähnlich hohe Reparaturkosten aufweisen. Somit entsprechen sie denen von VPE-Kabeln. Bei Übergangsmuffen wird vom schlechtesten Fall ausgegangen, weswegen sie den höheren Reparaturkosten von Massekabeln zugeordnet werden [11].

Weiterhin ist nach [11] ist die Höhe der Reparationskosten rk unabhängig von dem Schadenstyp (EAS oder VHA). Für Kabel und Garnituren gleichen Typs (VPE oder Masse) gilt demnach Gleichung 21.

$$rk_{EAS-K} = rk_{VHA-K} = rk_{EAS-G} = rk_{VHA-G} = rk \quad (21)$$

Die Reparaturkosten unterteilen sich stets in Maßnahmen- und Folgekosten [11]. Maßnahmenkosten mk dienen ausschließlich der Instandsetzung der betroffenen Komponente und umfassen das eingesetzte Personal sowie die nötigen Materialien. Werden weitere Komponenten durch die schadensbetroffene Komponente beschädigt (z.B. durch Überlastung), so stellen deren Instandsetzungskosten die Folgekosten fk dar. Es gilt daher:

$$rk = mk + fk \quad (22)$$

In Tabelle 8 sind die mittleren Folgekosten für VPE- und Massekabel gegeben. Diese Werte werden für alle Rechnungen als konstant angenommen.

Tabelle 8: Mittlere Folgekosten fk [11].

Kabeltypen	Mittlere Folgekosten [€]
VPE-Kabel	197
Masse-Kabel	225

Die Maßnahmenkosten werden im Folgenden jedoch näher untersucht, da deren Höhe sehr fallspezifisch ist. Tritt ein Schaden in einer Kabelanlage auf, so muss zunächst die Fehlerstelle geortet werden. Anhand von Erdarbeiten wird diese anschließend freigelegt (das sog. Muffenloch) und das beschädigte Kabelstück wird durch eine Reparaturmuffe oder ein kurzes Kabelstück ersetzt. Die Materialkosten für die Reparatur sind demnach vernachlässigbar gering. Der Aufwand für die Erdarbeiten kann jedoch beträchtlich sein. Wie hoch dieser letztendlich ist, hängt stark von dem Verlegungsort des beschädigten Kabels ab. Kabel an schwer zugänglichen Orten wie Straßenkreuzungen mit einem sehr hohen Verkehrsaufkommen erfordern beispielsweise einen sehr hohen Aufwand. Ein solcher Fehlerort erfordert meist einen längeren Arbeitseinsatz des Entstörungspersonals, da versiegelte Böden zunächst abgetragen und nach der Reparatur wiederhergestellt werden müssen [24]. Zudem ist auch eine provisorische Beschilderung des Straßenverkehrs oder ggf. eine Umprogrammierung der Ampelsteuerung, unter Absprache mit den örtlichen Behörden von Nöten [24]. Folglich werden die Maßnahmenkosten maßgeblich durch die Zugänglichkeit und das Verkehrsaufkommen an der Fehlerstelle beeinflusst. Da es sich bei diesen beiden Faktoren um unscharfe Parameter handelt, wurde für die Bewertung der Maßnahmenkosten die Fuzzy-Logik verwendet [22].

Insgesamt wurden zwei Fuzzy-Logik-Modelle erstellt, eines für Masse- und eines für Kunststoffkabel. Beide Modelle sind identisch nach dem in der Praxis vielfach erprobten Standardansatz aufgebaut [22]. In Abbildung 7 ist es beispielhaft für Massekabel aufgeführt.

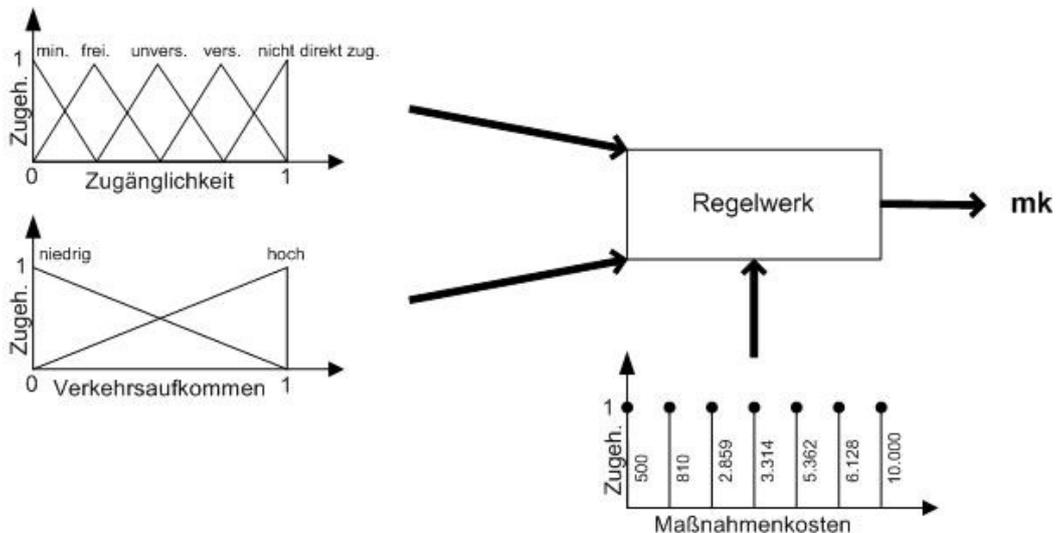


Abbildung 7: Fuzzy-Logik-Modell zur Berechnung der Maßnahmenkosten mk von Massekabel.

Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, wurden für die Beschreibung des Verkehrsaufkommens die zwei linguistische Variablen „hoch“ und „niedrig“ eingeführt und den Werten null und eins zugeordnet. Zur Beschreibung der Zugänglichkeit ist hingegen eine höhere Anzahl an linguistischen Variablen nötig, da diese sehr vielfältig sein kann. Insgesamt wurden für die Zugänglichkeit fünf linguistische Variablen definiert und Werte zwischen null und eins zugeordnet: „minimaler Aufwand“, „freiliegendes Kabel“, „versiegelter Boden“, „unversiegelter Boden“ und „nicht direkt zugänglich“. Beim „minimaler Aufwand“ handelt es sich um Maßnahmen, welche in jeden Fall durchgeführt werden müssen nach einem Kabelschaden wie z.B. die Freischaltung der Fehlerstelle oder die Fehlerortung. Die Kategorie „freiliegendes Kabel“ beinhaltet Kabel, welche frei zugänglich sind. Was beispielsweise bei Kabelabschnitten, welche durch ein Gebäude verlaufen, der Fall ist. Für unterirdisch verlegte Kabel muss nach der Bodenbeschaffenheit unterschieden werden. Eine Grünfläche entspricht z.B. einem „unversiegelter Boden“ wohingegen ein Bürgersteig oder eine Nebenstraße einen „versiegelter Boden“ darstellt. Kabel, welche bspw. unter einer Hauptstraßen oder einem Fluss verlaufen, sind hingegen der Kategorie „nicht direkt zugänglich“ zuzuordnen.

Die zwei Eingangsparameter sind mit den sieben Ausgangs-Singletons über das Regelwerk verknüpft. Eine Regel kann beispielsweise lauten:

„Wenn die Zugänglichkeit durch einen versiegelten Boden beschrieben ist und das Verkehrsaufkommen niedrig ist, dann betragen die Maßnahmenkosten 3.266€“.

Die gesamte Anzahl an Regeln bestimmt sich durch die Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten der Eingangsparameter. Dementsprechend ergeben sich in diesem Fall zehn Regeln ($5 \cdot 2$). Da bei unversiegelten Böden jedoch mit keinem Verkehrsaufkommen zu rechnen ist, reduziert sich die Anzahl an Regeln auf sieben [26]. Im Folgenden soll gezeigt werden wie die Regeln generiert wurden.

Die minimalen, die mittleren und maximalen die Maßnahmenkosten eines Kabelschadens können [11] entnommen werden und sind in Tabelle 9 aufgelistet.

Tabelle 9: Maßnahmenkosten [11].

Maßnahmenkosten [€]	VPE-Kabel	Massekabel
Minimal (mk_{min})	300	500
Mittel (mk_{mit})	3.665	3.769
Maximal (mk_{max})	9.000	10.000

Es wird angenommen, dass die minimalen Maßnahmenkosten dem oben bereits erwähnten Minimalaufwand entsprechen. Wohingegen die maximalen Kosten das worst-case Szenario widerspiegeln. Diese treten also dann auf, wenn ein Kabel nicht direkt zugänglich und das Verkehrsaufkommen hoch ist. Weiterhin wurde angenommen, dass die Maßnahmenkosten eines freiliegenden Kabels, den mittleren Maßnahmenkosten einer Freileitung entsprechen, also laut [11] 810€. Dieser Ansatz wurde wegen einer ähnlichen Zugänglichkeit beider Betriebsmittel gewählt.

Die restlichen Regeln bzw. Ausgangswerte wurden mit Hilfe der mittleren Maßnahmenkosten in Tabelle 9 bestimmt. Zusätzlich wurde die verhältnismäßige Beeinflussung der Zugänglichkeit und des Verkehrsaufkommens auf die spezifischen Tiefbaukosten bei einer Kabelneuverlegung auf die Maßnahmenkosten übertragen. Die Werte hierfür sind in Tabelle 10 gegeben.

Tabelle 10: Spezifische Tiefbaukosten [26][27].

Verlegungsort	Spezifische Tiefbaukosten [€/m]
Unversiegelter Boden (stk_{unv})	90
Versiegelter Boden und niedriges Verkehrsaufkommen ($stk_{ver,nv}$)	110
Mittlere Tiefbaukosten (stk_{mit})	130
Versiegelter Boden und hohes Verkehrsaufkommen ($stk_{ver,hv}$)	200

Um den Einfluss der Zugänglichkeit und des Verkehrsaufkommens auf die Maßnahmenkosten zu bestimmen, müssen zunächst die mittleren Tiefbaukosten tk_{mit} ermittelt werden. Diese ergeben sich aus der Differenz der mittleren Maßnahmenkosten mk_{mit} und den Kosten für die Mindestmaßnahmen mk_{min} in Tabelle 9. Die Berechnung hierfür ist beispielhaft für Massekabel in Gleichung 23 aufgeführt.

$$tk_{mit} = mk_{mit} - mk_{min} = 3.769\text{€} - 500\text{€} = 3.269\text{€} \quad (23)$$

Diese Kosten werden nun den spezifischen mittleren Tiefbaukosten aus Tabelle 10 zugeordnet. Durch eine Dreisatzrechnung und unter der Verwendung der spezifischen Tiefbaukosten unversiegelter Böden, versiegelter Böden mit niedrigem Verkehrsaufkommen und versiegelter Böden mit hohem Verkehrsaufkommen (Tabelle 10) ist es nun möglich, die

Tiefbaukosten auch für diese Szenarien zu berechnen. Für Massekabeln in unversiegelten Böden tk_{unv} ergibt sich beispielsweise folgender Dreisatz:

$$tk_{unv} = tk_{mit} \cdot \frac{stk_{unv}}{stk_{mit}} = 3.269\text{€} \cdot \frac{90 \frac{\text{€}}{\text{m}}}{130 \frac{\text{€}}{\text{m}}} = 2.263\text{€} \quad (24)$$

Werden nun diese Kosten um die Kosten für die Mindestmaßnahmen erhöht, so ergeben sich die gesamten Maßnahmenkosten mk_{unv} für den betrachteten Fall.

$$mk_{unv} = tk_{unv} + mk_{min} = 2.263\text{€} + 500\text{€} = 2.763\text{€} \quad (25)$$

Analog hierzu lassen sich die Maßnahmenkosten für versiegelte Böden mit niedrigen und hohen Verkehrsaufkommen berechnen.

Da eine nicht direkte Zugänglichkeit des Kabels in Tabelle 10 nicht berücksichtigt wird, ist es zum Schluss nötig diesen Fall gesondert zu betrachten. Wie bereits erwähnt entspricht eine nicht direkte Zugänglichkeit bei hohem Verkehrsaufkommen dem worst-case und wird daher den maximalen Maßnahmenkosten in Tabelle 9 zugeordnet. Für ein niedriges Verkehrsaufkommen wird angenommen, dass sich die Tiefbaukosten gegenüber dem Szenario „versiegelter Boden mit niedrigem Verkehrsaufkommen“ verdoppeln. Dies liegt darin begründet, dass Kabel unter Gewässern oder Straßenkreuzungen beispielsweise in Rohren verlegt werden [24]. Daher sind bei einem Schaden zwei Muffenlöcher an den Rohrenden von Nöten, um die beschädigte Stelle herauszuschneiden. Die gesamten Maßnahmenkosten $mk_{ndz,nv}$ können für diesen Fall folglich mit Gleichung 26 berechnet werden.

$$mk_{ndz,nv} = 2 \cdot tk_{ver,nv} + mk_{min} \quad (26)$$

In Tabelle 11 sind alle Maßnahmenkosten für VPE- und Massekabel, welche für die Bildung des Regelwerks des Fuzzy-Logik-Modells verwendet wurden, zusammengefasst.

Tabelle 11: Maßnahmenkosten mk in Abhängigkeit von Zugänglichkeit und Verkehr.

Zugänglichkeit	Verkehr	VPE-Kabel [€]	Massekabel [€]
Minimaler Aufwand	-	300	500
Freiliegendes Kabel	-	810	810
Unversiegelter Boden	-	2.629	2.763
Versiegelter Boden	niedrig	3.147	3.266
	hoch	5.177	5.529
Nicht direkt zugänglich	niedrig	5.994	6.032
	hoch	9.000	10.000

Das Gesamtergebnis des Fuzzy-Logik-Modells ist beispielhaft für Massekabel in Abbildung 8 dargestellt. Es ist zu sehen, dass das Verkehrsaufkommen den Kurvenverlauf erst ab einer Zugänglichkeit von 0,5 beeinflusst. Dies entspricht dem Übergang von unversiegelten zu versiegelten Böden. Insgesamt ergibt sich für ein geringeres Verkehrsaufkommen ein flacherer Kurvenverlauf als für einen hohes.

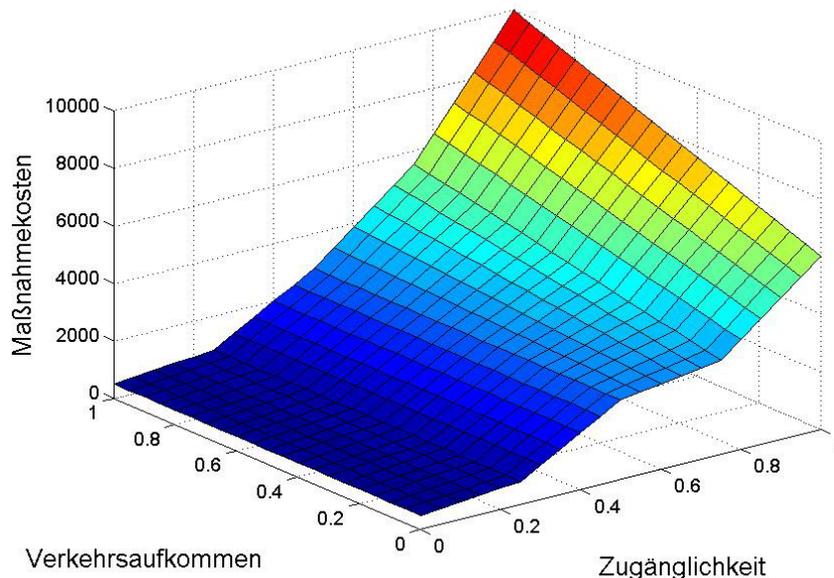


Abbildung 8: Maßnahmenkosten von Massekabeln.

Unterbrechungskosten

Kommt es infolge eines EAS-Schadens an einem Kabel oder einer Garnitur zu einer Versorgungsunterbrechung der Kunden, so kann der finanzielle Schaden für den Energieversorger beträchtlich sein. Dies liegt darin begründet, dass seit dem Jahr 2012 in solchen Fällen Strafzahlungen (Pönalen) durch den Netzbetreiber gezahlt werden müssen. Hierdurch möchte der Gesetzgeber verhindern, dass Kosten in der Instandhaltung zu Lasten der Netzqualität gesenkt werden. Die Höhe der Strafzahlungen bestimmt sich nach [6] in der Mittelspannungsebene aus der unterbrochenen Bemessungsscheinleistung und der Ausfalldauer der betroffenen Netzkuppel- und Letztverbrauchertransformatoren (NKT und LVT). Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, bewirken Kabelschäden mit Schutzauflösung eine Öffnung des übergeordneten Leistungsschalters im entsprechenden Abgang. Dementsprechend sind von der Unterbrechung alle NKT's und LVT's zwischen dem Leistungsschalter und der offenen Trennstelle betroffen. Daher führen sämtliche Kabelanlagen in ein und demselben Abgang sowie alle Komponenten innerhalb dieser (also sowohl sämtliche Kabelstücke als auch Garnituren), zu denselben Unterbrechungskosten uk . Daher gilt für uk_{EAS-K} und uk_{EAS-G} aus Gleichungen 17 und 19:

$$uk_{EAS-K} = uk_{EAS-G} = uk \quad (27)$$

Da die Anzahl von NKT's und LVT's in einem Abgang stets Fallspezifisch ist, sind Pönalzahlen immer Netztopologieabhängig. Aus diesem Grund werden in dem erstellten MATLAB® Modell die Unterbrechungskosten fallspezifisch anhand der installierten Bemessungsscheinleistung der betroffenen Netzkuppel- P_{NKT} und Letztverbrauchertransformatoren P_{LVT} berechnet (es wird bei der Berechnung ein $\cos\varphi=1$ angenommen, da dies dem worst-case entspricht). In Übereinstimmung mit [6] und [10] wird zusätzlich eine Unterbrechungsdauer 54,85 Minuten und eine Pönale von 8€/kWh angesetzt. Für Komponenten eines Abgang mit i NKT's und j LVT's berechnen sich die Unterbrechungskosten demnach mit Gleichung 28.

$$uk = \frac{54,85}{60} \text{ h} \cdot 8 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot \left(\sum_i P_{NKT} + \sum_j P_{LVT} \right) \quad (28)$$

3.2 Kosten

In heutigen Mittelspannungsnetzen werden, wie bereits erwähnt, zur Erneuerung von Kabelanlagen in der Regel neue VPE-Kabel eingesetzt. Die Gesamtkosten einer Kabelneuverlegung hängen von den Kabel- und Tiefbaukosten und somit von der Kabellänge ab. Für die Berechnung der Kabelkosten, werden in dem Modell, entsprechend [26], die mittleren spezifischen Kabelkosten sk_{mit} von 20€/m verwendet. Wie bereits dargestellt wurde, hängen die Tiefbaukosten jedoch stark von dem Verlegungsort ab, da sie maßgeblich durch die beiden Parameter Zugänglichkeit und Verkehrsaufkommen beeinflusst werden.

Anhand des Fuzzy-Logik-Modell, welches in Kapitel 3.1.2 eingeführt wurde, ist es möglich die resultierenden Maßnahmenkosten eines Kabelschadens für einen beliebigen Verlegungsort zu bestimmen. Da die Tiefbaukosten Bestandteil der Maßnahmenkosten sind, bietet es sich an, zunächst die Maßnahmenkosten mk_{neu} für das zu erneuernde Kabel zu berechnen und daraus im Anschluss die Tiefbaukosten tk_{neu} abzuleiten. Hierfür müssen lediglich die Maßnahmenkosten, um die Kosten für die sogenannten Mindestmaßnahmen in Tabelle 9 reduziert werden. Dies ist beispielhaft in Gleichung 29 dargestellt.

$$tk_{neu} = mk_{neu} - mk_{min} \quad (29)$$

Aus diesen (absoluten) Werten, lassen sich nun kabellängenabhängige Tiefbaukosten stk_{neu} für das zu erneuernde Kabel anhand einer Dreisatzrechnung bestimmen. Hierzu werden die mittleren Tiefbaukosten (wie sie bereits beispielhaft für Massekabel in Gleichung 24 bestimmt wurden) den mittleren spezifischen Tiefbaukosten aus Tabelle 10 zugeordnet. Der resultierende Dreisatz ist in Gleichung 30 dargestellt.

$$stk_{neu} = stk_{mit} \cdot \frac{tk_{neu}}{tk_{mit}} \quad (30)$$

Unter Einbeziehung der Materialkosten für das Kabel, lassen sich also die Gesamtkosten einer Kabelneuverlegung K_{Ges} in Abhängigkeit der Kabellänge ℓ und des Verlegungsortes mit Gleichung 31 berechnen.

$$K_{Ges}(\ell) = (\text{stk}_{\text{neu}} + \text{skk}_{\text{mit}}) \cdot \ell \quad (31)$$

Soll also beispielsweise ein 100 Meter langes VPE Kabel unter einem versiegelten Boden mit mittlerem Verkehrsaufkommen verlegt werden, so ergeben sich mit dem Fuzzy-Logik-Modell Maßnahmenkosten von 4.398€. Die Gesamtkosten belaufen sich somit auf:

$$K_{Ges}(100\text{m}) = \left(130 \frac{\text{€}}{\text{m}} \cdot \frac{4.398\text{€} - 300\text{€}}{3.665\text{€} - 300\text{€}} + 20 \frac{\text{€}}{\text{m}} \right) \cdot 100\text{m} = 17.832\text{€} \quad (32)$$

4 Optimaler Einsatz des Erneuerungsbudgets

Mit den Informationen in Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** es möglich die Kosten und den Nutzen beliebiger Erneuerungsmaßnahmen zu bewerten. Dadurch ist es möglich ein gegebenes Budget optimal zu investieren. Dies wird im Folgenden mit zwei Beispielen gezeigt. In Kapitel 4.1 wird die Funktionsweise des Modells durch die Analyse einer einzelnen Kabelanlage gezeigt. Zur Gewinnung allgemein gültiger Erkenntnisse bezüglich der Erneuerungen von Mittelspannungskabeln, wird schließlich in Kapitel 4.2 das entwickelte Simulationsmodell auf einen Teilausschnitt eines real existierenden Deutschen Netzes angewendet.

4.1 Analyse einer Kabelanlage

Im Folgenden sollen mögliche Erneuerungsoption an der Kabelanlage in Abbildung 9, hinsichtlich ihres Kosten-Nutzen-Verhältnisses priorisiert werden, um somit die optimale Erneuerungsmaßnahme zu bestimmen. Die Kabelanlage besteht aus vier Massekabeln (welche nicht älter als 55 Jahre sind), drei Muffen (rund) und zwei Endverschlüssen (rechteckig).



Abbildung 9: Exemplarische Kabelanlage.

Die Anzahl an zu untersuchenden Erneuerungsmaßnahmen hängt in erster Linie von dem Aufbau der Kabelanlage ab. Von dem Modell wird nämlich stets der Ersatz der kompletten Kabelanlage (von ev1 bis ev2), jeglicher Kabelstücke (z.B. k1) sowie Kabelabschnitte mit mindestens einer Muffe (z.B. k3 & m3 & k4) bewertet. Ein weiterer Faktor, welcher die Anzahl an Erneuerungsoptionen beeinflusst, ist, wie bereits in Kapitel 3.1 erwähnt wurde, die Verlegungsumgebung. So kann es beispielweise sinnvoll sein ein Kabelstück nur an der

Stelle zu erneuern wo das Schadensrisiko aufgrund des Verlegungsortes besonders hoch ist. Dies kann z.B. bei einem Kabel der Fall sein, welches teils unter einem unversiegelten Boden und teils unter einer Straßenkreuzung mit hohem Verkehrsaufkommen verläuft. Zusätzlich werden von dem Modell alle möglichen Kombinationsmöglichkeiten der oben genannten Erneuerungsoptionen berücksichtigt.

Der Einfachheit halber wurde für das Beispiel in Abbildung 9 eine konstant mittlere Verlegungsumgebung entlang der gesamten Kabelstrecke angenommen (d.h. die Maßnahmenkosten und die spezifischen Tiefbaukosten entsprechen mk_{mit} und stk_{mit} in Tabelle 9 und Tabelle 10). Daraus ergaben sich insgesamt 15 zu untersuchende Erneuerungsmaßnahmen. Bei der Simulation wurden die Gewichtungsfaktoren in Tabelle 12 verwendet.

Tabelle 12: Verwendete Gewichtungsfaktoren.

gew_{Alt}	gew_{SA}	gew_{AE}	gew_{Ext}
1	0	0	1

In Tabelle 13 ist die resultierende Prioritätenliste für die Kabelanlage in Abbildung 9 zu finden.

Tabelle 13: Prioritätenliste.

	Abschnitt	ΔR_{Ges} [€/ (km · a)]	K_{Ges} [k€]	$\Delta R_{Ges}/K_{Ges}$ [1/(km · a)]
1	k2 + m2 + k3	172,36	4,43	0,0389
...
4	ka1	697,17	33,96	0,0205
...
15	k2	4,31	2,21	0,001947

Es ist zu sehen, dass der Ersatz der Kabelstücke $k2$ und $k3$ sowie der Muffe $m2$ das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Austausch dieses kurzen Kabelabschnitts, von nur 30 Metern, die Beseitigung einer Muffe beinhaltet. Somit bewirkt diese Maßnahme eine relativ starke Absenkung des Schadensrisikos bei vergleichsweise niedrigen Investitionskosten.

Ist der Netzbetreiber bereit mehr Geld für einen höheren Nutzen zu investieren, so sollte er sich zusätzlich für die Erneuerungsmaßnahme mit der nächsthöheren Priorität entscheiden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass manche Maßnahmen mehrmals in der Prioritätenliste enthalten sein können, nämlich als Teilmenge von anderen. Ein Beispiel hierfür sind die Erneuerungsoptionen 15 und eins in Tabelle 13. Daher wird von dem Simulationsmodell stets überprüft ob eine höhere Investition eine Vergrößerung des Nutzens bewirkt. Ist dies nicht der Fall, so bricht die Simulation ab und die Investitionsobergrenze für eine

Kabelanlage ist erreicht. Diese ist also spätestens dann erreicht ist, wenn die Kabelanlage als Ganzes erneuert wird.

4.2 Analyse eines real existierenden Netzausschnitts

Zur Gewinnung allgemeiner Erkenntnisse bezüglich der Erneuerung von Mittelspannungskabeln, wurde das vorgestellte Modell auf einen Netzausschnitt eines real existierenden Mittelspannungsnetzes einer deutschen Großstadt angewandt. Der betrachtete Ausschnitt besteht aus einem Ringnetz (vgl. Kapitel 2.1), welches insgesamt zehn Ortsnetzstationen versorgt. Die Summe der Bemessungsscheinleistung der Netzkuppel- und Letztverbrauchertransformatoren in den jeweiligen Abgängen des Ringnetzes, beträgt 2696 bzw. 1767 kVA.

Insgesamt umfasst das Ringnetz zehn Kabelanlagen mit einer Gesamtlänge von 2.612 Metern. Die mittlere Länge der Kabelanlagen liegt bei 237 Meter, wohingegen einzelne Kabelstücke im Mittel lediglich 69 Meter lang sind. Demnach weist das Netz eine hohe Anzahl an Übergangsstellen auf. Das Mengenverhältnis der installierten Kabeltypen ist in Abbildung 10 dargestellt. Es ist zu sehen, dass Massekabel den größten Anteil an der gesamten Kabellänge ausmachen. Gefolgt werden diese von den PE-Kabeln. Den mit Abstand kleinsten Teil machen VPE-Kabel aus. Das mittlere Alter der Kabel liegt bei 45 Jahren, wobei das älteste Kabelstück 61 und das neuste neun Jahre alt ist.

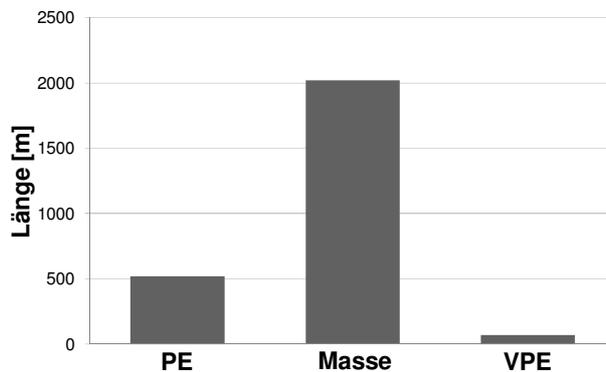


Abbildung 10: Mengenverhältnis der installierten Kabeltypen.

Die Verlegungsumgebung sämtlicher Kabel wurde mit Hilfe von Google-Earth Aufnahmen abgeschätzt. Abbildung 11 zeigt den Anteil der Wegabschnitte in Abhängigkeit der Kabellängen. Die freiliegenden Kabelstücke sind darauf zurückzuführen, dass die letzten fünf Meter Kabel vor den Endverschlüssen in den Ortsnetzstationen, als frei zugänglich modelliert wurden.

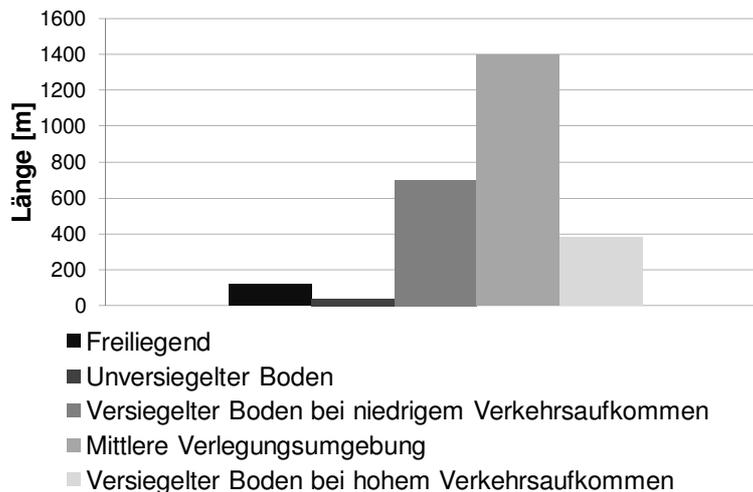


Abbildung 11: Verlegungsumgebung der installierten Kabel.

Bei der Simulation wurden sowohl alterungsbedingte als auch fremd verursachte Schäden berücksichtigt (wobei bei Massekabeln eine konstante Schadensrate über die Zeit ($prog=0$) angenommen wurde). Außergewöhnliche Kabeleigenschaften konnten in keinem Fall festgestellt werden. Weiterhin war das Schadensaufkommen der Kabel in der Vergangenheit nicht bekannt. Aus diesem Grund wurden die Gewichtungparameter in Tabelle 12 verwendet.

Das Ergebnis der Simulation ist in Abbildung 12 zu sehen. Abbildung 12 zeigt die Risikoänderung des betrachteten Netzausschnitts in Abhängigkeit des verfügbaren Budgets. Die rote Linie zeigt im Umkehrschluss an, welches Budget aufgebracht werden müsste, um einen gewünschten Risikowert zu erzielen.

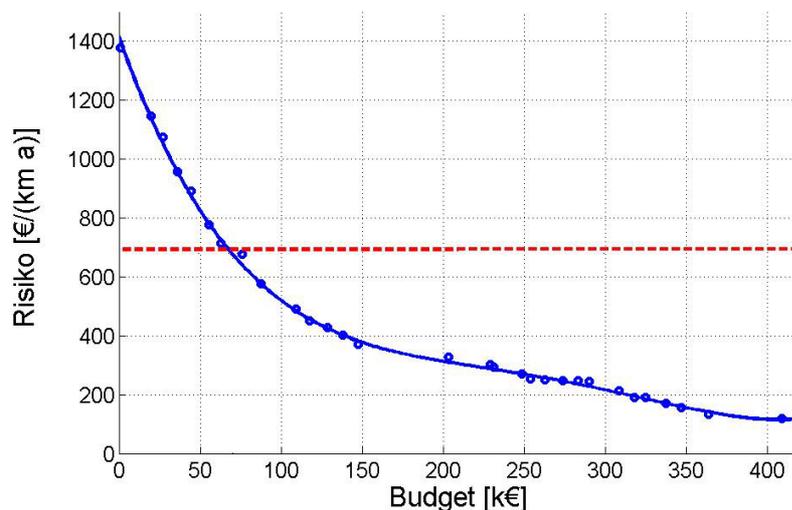


Abbildung 12: Risikoänderung des Beispielnetzes bei variablem Budget.

Insgesamt wurden 3443 Erneuerungsoptionen analysiert. Anhand der Steigung der Kurve zeigt sich, dass manche Erneuerungsmaßnahmen ein wesentlich besseres Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweisen als andere. Dadurch ist der Abfall der Kurve im Anfangsbereich sehr

viel stärker als im Endbereich. Dies hat zur Folge, dass derselbe Investitionsbetrag im vorderen Teil einen wesentlich größeren Nutzen bewirkt als im hinteren Teil der Kurve. Soll beispielweise das Anfangsrisiko um die Hälfte reduziert werden, also um ca. 700€/km·a, so müssen um die 75 tausend Euro investiert werden. Dasselbe Investitionsvolumen müsste aufgebracht werden, um das Risiko von 200€/km·a um etwa 20€/km·a abzusenken.

Welche Erneuerungsmaßnahmen tendenziell ein gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis und somit eine hohe Erneuerungspriorität aufweisen, wird im Folgenden aufgezeigt. In Tabelle 14 sind allgemeinen Schlussfolgerungen, welche aus den obigen (und weiteren) Simulationen gewonnen werden konnten, aufgelistet.

Tabelle 14: Schlussfolgerungen aus den Simulationen.

Schlussfolgerung	Begründung
Die Unterbrechungskosten eines Kabels bestimmen maßgeblich dessen Priorität. Vorrangig bei der Erneuerungsentscheidung ist demnach die EAS-Schadensrate eines Kabels. Die Verlegungsumgebung ist nur sekundär.	Durch die Einführung von Pönalen liegen die Unterbrechungskosten in der Regel in etwa um eine Zehnerpotenz über den Reparaturkosten.
Besonders kritische Kabel wie PE-, PVC- und alte VPE-Kabel haben immer eine sehr hohe Erneuerungspriorität.	Kritische Kabel weisen besonders hohe Schadensraten auf. Zum Beispiel ist die mittlere EAS-Schadensrate von PE-Kabeln ca. 48 Mal größer als die von Massekabeln.
Der Ersatz von Masseendverschlüssen bietet sich dann an, wenn die Länge des angeschlossenen Kabels bis zur nächsten Muffe nur sehr kurz ist (ca. 15 Meter).	VPE-Endverschlüsse weisen eine wesentlich niedrigere EAS-Schadenrate auf als Masseendverschlüsse. Weiterhin sind Endverschlüsse leicht zugänglich. Durch den Ersatz einer kurzen Kabelstrecke kann also eine starke Absenkung des Schadensrisikos bei vergleichsweise niedrigen Investitionskosten erreicht werden.
Die Erneuerung kurzer segmentierter Kabelabschnitte, ist der Erneuerung von langen nicht segmentierten Kabelstücken vorzuziehen.	Die Reduzierung der Anzahl an Muffen durch die Erneuerung eines kurzen Kabelabschnitts, bewirkt einen großen Nutzen bei geringen Kosten. Die Erneuerung von langen Kabelstücken ist sehr kostenintensiv.
Besondere Einflüsse, welche die altersbedingte Schadensrate eines Kabels erhöhen, beeinflussen nur unterproportional dessen Priorität.	Ein Großteil der Kabelschäden wird durch externe Einflüsse verursacht. Auf diesen Schadensanteil hat eine beschleunigte Alterung des Kabels keine Auswirkung.
Stark segmentierte Massekabel sind kritischer als stark segmentierte VPE-Kabel.	Die Schadensraten von VPE-Muffen sind um ca. eine Zehnerpotenz niedriger als die von Massekabel-Muffen.

5 Zusammenfassung

Der Strommarkt in Deutschland hat sich seit der Liberalisierung der Energiewirtschaft stark gewandelt. Die neue Wettbewerbssituation hat den Kostendruck auf die Netzbetreiber massiv erhöht. Aus diesem Grund sehen sich diese heutzutage gezwungen mögliche Einsparpotentiale zu erschließen. Große Einsparpotentiale bietet die Instandhaltungsoptimierung. Einsparungen in diesem Bereich sind jedoch stets mit Risiken behaftet, da sie sich negativ auf die Netzzuverlässigkeit auswirken können. Am stärksten wird die Netzzuverlässigkeit zurzeit durch den Zustand der Mittelspannungsnetze geprägt. Diese sind nämlich für 90% aller Ausfälle im gesamten elektrischen Netz verantwortlich. Der Großteil dieser Ausfälle lässt sich wiederum auf die Mittelspannungskabel zurückführen. Aus diesem Grund ist es von großer Wichtigkeit, ein Modell zur Instandhaltungsoptimierung von Mittelspannungskabeln zu entwickeln.

In diesem Paper wurde daher ein MATLAB[®] Modell dargestellt, mit welchem sich Entscheidungen, über zukünftige Investitionen in das Kabelnetz, objektivieren lassen. Mögliche Investitionen wurden hierbei auf Erneuerungen beschränkt, da Inspektionen und Wartungen an Kabelanlagen nur in Ausnahmefällen durchgeführt werden können. Ziel der Optimierung war es somit, den größten Nutzen für ein vorgegebenes Erneuerungsbudget zu erzielen. Dies wurde durch die Evaluierung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses möglicher Erneuerungsmaßnahmen erreicht. Da heutige Mittelspannungsnetze größtenteils historisch gewachsen sind und somit Kabelanlagen in der Regel aus einer Vielzahl kleinerer Kabelstücke unterschiedlichen Typs und Alters bestehen, wurden bei der Erneuerungsoptimierung auch Teilerneuerungen mitberücksichtigt. Die Kosten einer Maßnahme wurden stets aus den Kabel- und Verlegungskosten in Abhängigkeit der Kabellänge und der Verlegungsumgebung (z.B. städtisch oder ländlich) berechnet. Der Nutzen, konnte anhand der Differenz des Ausfallrisikos vor und nach der Maßnahme quantifiziert werden. Hierbei wurden alle Komponenten wie Muffen, Endverschlüsse oder Kabel, welche zum Gesamtrisiko beitragen, berücksichtigt. Das Risiko jeder Komponente wurde schließlich aus dem Produkt der Eintrittswahrscheinlichkeit und des Schadensausmaßes bestimmt. Diese beiden Faktoren wurden auf der Grundlage statistischer Daten, in Abhängigkeit äußerer Faktoren wie die Verlegungsumgebung ermittelt. Zudem wurde bei der Bestimmung dieser Faktoren menschliches Kausalwissen mit Hilfe der Fuzzy-Logik in das Modell eingebunden. Da Lastausfälle ab dem Jahr 2012 in Deutschland pönalisiert werden, wurden zusätzlich Strafzahlungen für die nicht zeitgerecht gelieferte Energie berücksichtigt. Über das berechnete Kosten-Nutzen-Verhältnis jeder Erneuerungsmaßnahmen war es also möglich diese zu priorisieren. Dadurch war es möglich Schwachstellen im Netz gezielt zu bestimmen und zu beheben.

Das vorgestellte Modell wurde zur Gewinnung allgemeiner Erkenntnisse bezüglich der Erneuerung von Mittelspannungskabeln, auf einen Teilausschnitt eines realen Mittelspannungsnetzes einer deutschen Großstadt angewandt. Die wichtigsten Erkenntnisse waren unter anderem:

- Die Kosten, welche durch Pönalzahlung im Schadensfall eines Kabels entstehen, bestimmen maßgeblich dessen Priorität. Die Verlegungsumgebung ist demnach nur sekundär.

- Besonders kritische Kabel wie PE-, PVC- und alte VPE-Kabel haben immer eine sehr hohe Erneuerungspriorität.
- Die Erneuerung kurzer segmentierter Kabelabschnitte, ist der Erneuerung von langen nicht segmentierten Kabelstücken vorzuziehen.
- Stark segmentierte Massekabel weisen ein hohes Risiko auf und sind kritischer zu bewerten als stark segmentierte VPE Kabel.

6 Literatur

- [1] M. Kizilcay, G. Kafrowski, „Ein Beitrag zur Zustandsbewertung von Mittelspannungs-Betriebsmitteln“, ETG-Kongress FT 3+4, Paper 4.8, 2009.
- [2] J. Stürmer, „Instandhaltungs- und Erneuerungsstrategien in Verteilungsnetzen“, Dissertation, Univ. Dortmund, 2001.
- [3] U. Prause, „Kostenreduktion im Energieverteilnetz: Optimierung der Instandhaltung und Erneuerung von Kabelnetzen“, Regionalforum Dresden, 2006.
- [4] I. Jürgens, „Langfristoptimierung für das risikoorientierte Asset Management von elektrischen Energieversorgungssystemen“, Dissertation, Univ. Dortmund, 2007.
- [5] L. Asgarieh, „Entwicklung von Alterungsmodellen zur Durchführung von Asset Simulationen“, Dissertation, Univ. Darmstadt, 2011.
- [6] Beschluss der Bundesnetzagentur, „Festlegung über den Beginn der Anwendung, die nähere Ausgestaltung und das Verfahren der bestimmung des Qualitätselementes hinsichtlich der Netzzuverlässigkeit für Elektrizitätsverteilernetze nach den §§19 und 20 ARegV“, 2011.
- [7] D. Drescher, „Rechnergestützte Bewertung von Betriebsmitteln für Instandhaltungsstrategien“, Dissertation, Univ. Darmstadt, 2004.
- [8] W. Schreiner, „Risiko-orientiertes Anlagenmanagement“, in Energiewirtschaftliche Tagesfragen 52Jg. Heft 11, S. 776-779, 2002.
- [9] G. Balzer, M. Brandl, D. Lehmer, „Instandhaltung von Mittelspannungsschaltanlagen“, in Elektrizitätswirtschaft, Jg. 98, Heft 15, S. 29-34, 1999.
- [10] Forum Netztechnik / Netzbetrieb im VDE - FNN, „FNN-Störungs- und Verfügbarkeitsstatistik – Berichtsjahr 2008 –“, 2009.
- [11] Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V. (FGH), „Technischer Bericht 299: Asset-Management von Verteilungsnetzen – Komponentenverhalten und Analyse des Kostenrisikos“, 2006.
- [12] D. Meurer, M. Stürmer, „Kabelsysteme für Mittel- und Hochspannung – Alterungsdiagnose: notwendig und hilfreich?“, ETG Fachbericht 87, S. 93-96, 2002.
- [13] F. Wirtz, „Zusammenhang von Zuverlässigkeit und Kosten in Mittelspannungsnetzen“, Ph. D. dissertation, Dissertation, Univ. Aachen, 2008.

- [14] Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V. (FGH), „Technischer Bericht 302: Ein Werkzeug zur Optimierung der Störbeseitigung für Planung und Betrieb von Mittelspannungsnetzen“, 2008.
- [15] T. Okrasznski, G. Balzer, C. Schorn, „Reliability Centered Maintenance (RCM) - a Step to Medium Voltage Cable Network Optimization“, Proceedings of WES Conference Torino, 2006.
- [16] Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V. (FGH), „Technischer Bericht 300: Zustandsdiagnose von Papiermasse-Kabelanlagen in Verteilnetzen“, 2006.
- [17] W. Castor, „Grundlagen der elektrischen Energieversorgung“, Fachbibliothek von HAAG, 2006.
- [18] Verband der Netzbetreiber – VDN – e.V. beim VDEW, „VDN-Störungsstatistik 2002: Bundesrepublik Deutschland gesamt“, VDEW Energieverlag GmbH, 2004.
- [19] M. Schwan, K.-H. Weck, A. Schnettler, A. Schneider, W.H. Wellßow, M. Kaiser „Asset-Management von Verteilungsnetzen unter Anwendung eines Kostenrisiko-Managements“, in ETG-Fachbericht 94, Seite 75-83, 2003.
- [20] H. Vennegeerts, M. Obergünner, „Zuverlässigkeit von Verteilungsnetzen: Wesentliche Einflüsse und vereinfachte Berechnung“, in ETG-Fachbericht 98, 2005.
- [21] Cigre Working Group C 1.1, “Asset management of transmission systems and associated Cigre activities”, 2006.
- [22] J. Adamy, “Fuzzy Logik, Neuronale Netze und Evolutionäre Algorithmen“, vol. 2., Aachen: Shaker Verlag, 2007.
- [23] F. Petzold, D. Götz, M. Keller, „Zustandsbestimmung und Risikoabschätzung von TE-Fehlstellen in Mittelspannungskabeln und Garnituren“, in ETG Fachbericht 119, Seiten 239-244, 2009.
- [24] Verband der Netzbetreiber - VDN - e.V. beim VDEW, „Kabelhandbuch“, 6. Auflage, Frankfurt am Main, Berlin, Heidelberg: VDEW Energieverlag GmbH, 2001.
- [25] Bundesministerium der Justiz, "Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz - EnWG)", 2005.
- [26] CONSENTEC Consulting für Energiewirtschaft und -technik GmbH, „Untersuchung der Voraussetzungen und möglicher Anwendung analytischer Kostenmodelle in der deutschen Energiewirtschaft“, Aachen: Untersuchung im Auftrag der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, 2006.
- [27] U. Jordan, A. Underbrink, M. Maximini, „Zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung: Risikoanalyse in Verteilnetzen“, in Elektrizitätswirtschaft, Jg.103, Heft 24, Seiten 60-64, 2004