

DIAGNOSEMANAGEMENTSYSTEM FÜR MITTELSPANNUNGSKABEL DER KNG-KÄRNTEN NETZ GMBH - EIN ERFAHRUNGSBERICHT

Hans-Jürgen Wernegger¹⁾, Albert Glanznig²⁾, Gerd Mitterling³⁾, Karl Schoaß⁴⁾,
David Sturm⁵⁾, Tobias Neier⁶⁾

¹⁾DI Hans-Jürgen Wernegger, KNG-Kärnten Netz GmbH, Abteilung Diagnose und Instandhaltung HS, Kirchengasse 104, A-9020 Klagenfurt am Wörthersee, +43 (0)50525 1245, hans-juergen.wernegger@kaerntennetz.at

²⁾Ing. Albert Glanznig, KNG-Kärnten Netz GmbH, Abteilung Diagnose und Instandhaltung HS, Kanzelweg 19, A-9523 Landskron, +43 (0)50525 2212, albert.glanznig@kaerntennetz.at

³⁾Gerd Mitterling, KNG-Kärnten Netz GmbH, Abteilung Diagnose und Instandhaltung HS, Kanzelweg 19, A-9523 Landskron, +43 (0)50525 2750, gerd.mitterling@kaerntennetz.at

⁴⁾Ing. Karl Schoaß, KNG-Kärnten Netz GmbH, Abteilung Instandhaltung MS/NS, Arnulfplatz 2, A-9020 Klagenfurt am Wörthersee, +43 (0)50525 2500, karl.schoass@kaerntennetz.at

⁵⁾DI David Sturm, KNG-Kärnten Netz GmbH, Abteilung Instandhaltung MS/NS, Arnulfplatz 2, A-9020 Klagenfurt am Wörthersee, +43 (0)50525 2286, david.sturm@kaerntennetz.at

⁶⁾Tobias Neier, Baur GmbH, Regional Sales Manager & Technical Advisor, Raiffeisenstrasse 8, A-6832 Sulz, +43 (0)5522 4941 167, t.neier@baur.at

Kurzfassung: Die KNG-Kärnten Netz GmbH (KNG) betreibt ein ca. 18.000 km langes Strom-Leitungsnetz, davon beträgt die Länge des Mittelspannungskabelnetzes ca. 2.900 km.

Ab Anfang der 1970er-Jahre begann in der Mittelspannungskabelmaterialtechnologie der Übergang vom klassischen Bleikabel hin zum Kunststoffkabel (Abbildung 1). Die von den Bleikabeln her gewohnte hohe Fertigungsqualität hat anfangs die materialtechnologischen Defizite bei den Kunststoffkabeln noch kompensiert. Die nun folgenden Kabelgenerationen, wie PVC – PE – VPE 1. Generation – VPE 2. Generation (längs-/querwasserdicht) haben sich in der Massenproduktion nicht nur qualitativ unterschiedlich entwickelt, sondern prägen durch die unterschiedlich zu erwartenden Nutzungsdauern auch die Anlagenstruktur. Daraus lässt sich aber nur ein „pragmatisches“ Alterungsmodell ableiten, das aber noch keine Aussage über den tatsächlichen Zustand bzw. die Restlebensdauer zulässt.

Die Inspektion der Mittelspannungskabel hat sich dabei im Wesentlichen auf die Kabelendverschlüsse konzentriert. Die Instandsetzung der Mittelspannungskabel erfolgte ereignisorientiert.

Seit 2016 setzt die KNG von der Firma Baur die dem neuesten Stand der Technik entsprechenden Kabeldiagnosemessgeräte zur Zustandsbewertung von Mittelspannungskabeln ein. Das war der Start für einen schrittweisen Übergang zu einer, ansonsten bei allen anderen Assets angewandten, zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie.

Die nachfolgende Analogie zeigt die Chancen und Stärken der neuen Instandhaltungsstrategie auf:

Erfolgt die Zustandsbewertung von Holzmasten durch eine visuelle Inspektion mit einer Sichtkontrolle, so erfolgt die Zustandsbewertung bei einem Mittelspannungskabel durch eine diagnostische Inspektion mit einer Verlustfaktormessung ($\tan \delta$ - Messung). Mit dieser $\tan \delta$ - Messung kann zukünftig auch der Zustand von Mittelspannungskabeln erfasst werden.

Die TU-Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, hat die KNG dabei mit einer Studie zur Einführung einer zustandsbasierten Instandhaltungsstrategie für Mittelspannungskabel begleitet. Im Rahmen des 2018 stattgefundenen Symposiums Energieinnovation in Graz haben wir dem Auditorium den Strategiewechsel und einen Ausblick der nächsten Schritte präsentiert.

In dieser Publikation beschreibt die KNG nun die systematische Weiterentwicklung bei der Einführung eines Diagnosemanagementsystems für eine zustandsorientierte Instandhaltung von Mittelspannungskabeln.

In den einzelnen Abschnitten beschreiben wir

- das Big Picture unseres Diagnosemanagementsystems.
- die aus der Normung abgeleiteten Rahmenbedingungen.
- die Instandhaltungsgrundsätze.
- die gewählte Methodik zur Priorisierung der zu „inspizierenden“ Kabeldiagnosestrecken.
- die Messtechnik und die praktischen Erfahrungen bei der Messung.
- die Zustandsbewertung der Mittelspannungskabel.
- die Kennzahlen - Kriterien für Instandsetzungs- bzw. Erneuerungsmaßnahmen.
- die tabellarische, grafische und schematische Dokumentation der Daten.
- die Zusammenfassung der wesentlichsten Erkenntnisse.

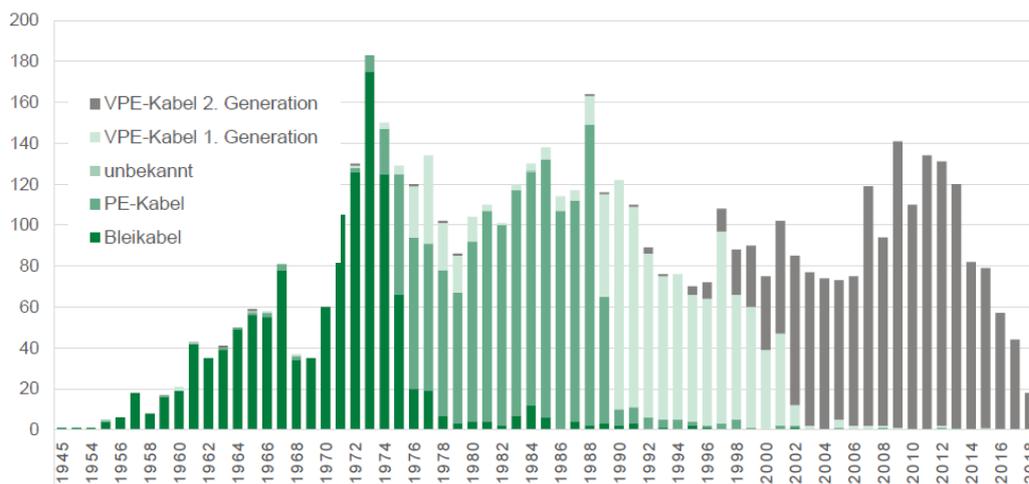


Abbildung 1: Häufigkeitsverteilung der Technologiegenerationen von Mittelspannungskabel über die Zeit

Keywords: Mittelspannungskabel, Kabeldiagnosemessung, true-sinus VLF-Prüfung, Verlustfaktor $\tan \delta$ - und Teilentladungsmessung, Reliability Theory, diagnostischer – technischer - strategischer Zustand, zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie

1 Einleitung

Für die Etablierung einer effektiven und effizienten Instandhaltungsstrategie für Mittelspannungskabel in der KNG haben wir die in Abbildung 2 dargestellte Vorgehensweise gewählt.

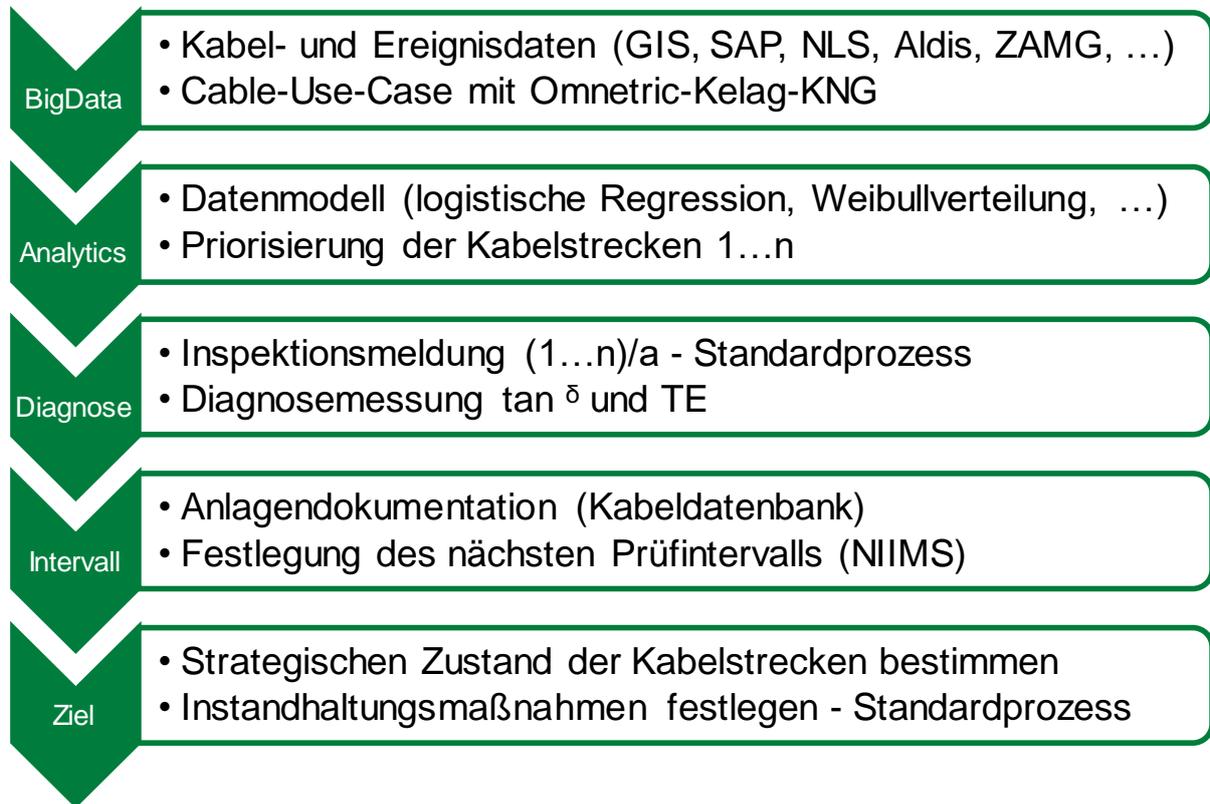


Abbildung 2: Der Weg zu einer zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie für Mittelspannungskabel.

1.1 BigData

Gemeinsam mit der Firma Omnetric, der Kelag IT und des dafür zuständigen KNG-Fachbereiches für Instandhaltung sind alle verfügbaren und unterschiedlichsten Daten von Mittelspannungskabeln aggregiert, auf einem Big Table topologisch zusammengeführt und georeferenziert dargestellt worden (Abbildung 3).

- Historische Lebensdauer
- Querschnitt
- Technologie
- Abschnitte
- Risiko und Störungsereignisse
- Bebaute Fläche

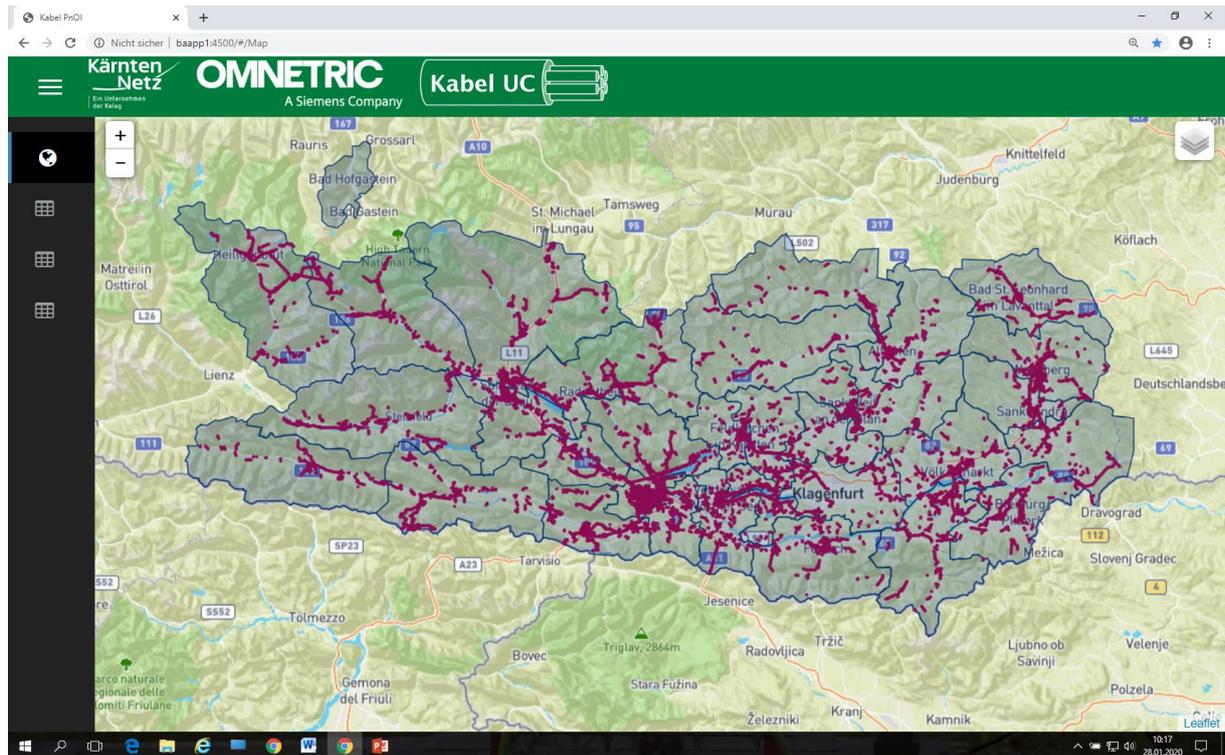


Abbildung 3: Visualisierung der Mittelspannungskabelstrecken - Landkarte Kärnten

1.2 Analytics

Die KNG hat im nächsten Schritt mit einem statistischen Modell die Restlebensdauer der einzelnen Kabeldiagnosestrecken analysiert, bei der die Zeit bis zu einem Ausfall zwischen Gruppen (Blei, PVC, PE, VPE 1, VPE 2) verglichen wird, um die Wirkung prognostischer Faktoren oder schädlichen Einflüssen ableiten zu können.

1.3 Diagnoseprozess

Der neu entstandene Kabeldiagnoseprozess wurde systemtechnisch in den bestehenden Instandhaltungs-Standardprozess und in die kaufmännische und technische Anlagenstruktur integriert. Für die Anlagenstruktur stehen zwei Kernsysteme zur Verfügung, nämlich

- das SAP-PM System und das SAP-Mobil für alle kaufmännischen Betriebsmitteldaten.
- das GIS-System für alle technischen und georeferenzierten Betriebsmitteldaten.

1.4 Diagnoseintervall

Der aus der Diagnosemessung gewonnene Zustand des Mittelspannungskabels bestimmt das Messintervall und ist als nächste Inspektion im Standardprozess vorzumerken.

1.5 Ziel

Mit dem strategischen Zustand der Mittelspannungskabelstrecke, der sich aus dem Ergebnis von Zustand/Pönalisierung und Wichtigkeit ableiten lässt, werden die erforderlichen Instandhaltungsmaßnahmen festgelegt.

2 Normung

Immer mehr Gremien befassen sich mit dem Thema der Kabeldiagnose, die zu einigen Änderungen und Fortschritten in diesen Bereich geführt haben. Die Kabeldiagnose befindet sich mittlerweile in allen Normen wieder, die in den letzten Jahren überarbeitet worden sind und wird zum Instrument für Netzbetreiber zur Instandhaltung ihrer Netze. Die wichtigsten Normen und Gremien zum Thema Kabeldiagnose stellen die IEC, die IEEE, die DIN VDE sowie die CIGRE dar. Was beinhalten nun die Normen und welche Änderungen haben in den letzten Jahren stattgefunden? Ein kurzer Überblick über die wichtigsten Normen zeigt, wie sich das Thema der Kabeldiagnose etabliert hat.

2.1 IEC 60502-2014

Die IEC 60502-2014 befasst sich unter anderem mit folgenden Themen:

- Prüfung und Diagnose von Verteilernetzen im Mittelspannungsbereich (6-30) kV
- eine Neuerung in der Norm führte zur Aufnahme der 0,1 Hz VLF Prüfmethode und deren
- Empfehlung: Parallele $\tan \delta$ und/oder Teilentladungsmessung zur Kabelprüfung
- einfache DC-Prüfung für Kunststoffkabel wurde aus der Norm entfernt

2.2 IEEE 400-2012 und IEEE 400.2-2013

Mit der IEEE wurde nun auch

- die VLF (very low frequency) - Prüfmethode mit Sinus 0,1 Hz in der Norm angeführt und
- als einzige Methode gelistet, bei der ausreichende Erfahrung am Markt vorhanden ist und die für alle Anwendungsfälle „useful“ oder „potentially useful“ eingestuft worden ist.
- die HVDC Prüfung von XLP-Kabel aufgrund von schlechten Erfahrungen nicht mehr empfohlen und daher aus der Norm entfernt.

Mit der IEEE 400.2-2013 wurde

- der Monitored Withstand Test (MWT) in den Markt eingeführt. Dies bedeutet die Durchführung der VLF Sinus Spannungsprüfung mit paralleler Diagnosemessung.

2.3 CIGRE

Ein Gremium der CIGRE hat eine

- Arbeitsgruppe (B1.58) zum Thema Kabeldiagnose im Mittelspannungsbereich eingerichtet und somit diesem Thema mehr Bedeutung zugeordnet.
- Untersuchungen von Trends und Beobachtungen der Marktentwicklung durchgeführt.

2.4 DIN VDE

Die DIN VDE Handlungsempfehlung beinhaltet eine

- Inbetriebnahmeprüfung von Mittelspannungs-Kabelanlagen mit
- VLF-Spannungsprüfung mit TE-Messung, welche eine Reduktion von Prüfzeit und Prüfpegel ermöglicht.

Auszug aus DIN VDE: „Die Prüfungen können den Nachweis des ordnungsgemäßen Zustandes der Anlage erschließen. Sowohl neue als auch bestehende Anlagen nach Änderungen und Erweiterungen müssen vor ihrer Inbetriebnahme einer Überprüfung unterzogen werden.“

Zusammenfassend wird ersichtlich, dass alle gelisteten Normen die $\tan \delta$ und/oder die Teilentladungsmessung begleitend zur Spannungsprüfung beinhalten und empfehlen.

3 Instandhaltungsgrundsätze

Die Aufgaben der Instandhaltung sind insbesondere die

- Erhöhung und optimale Nutzung der Lebensdauer von Anlagen
- Verbesserung der Betriebssicherheit und Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit
- Vorausschauende Budgetplanung

Das ist die Motivation in der KNG, auch das Mittelspannungskabel in eine zustandsorientierte Instandhaltung überzuführen. Mit dem Vergleich zur Freileitung konnte auch für das Mittelspannungskabel das Verständnis für eine zustandsorientierte Instandhaltungs-Strategie gewonnen und mit allen am Prozess beteiligten Mitarbeitern auch ein gemeinsam getragenes Ziel verfolgt werden (Abbildung 4).

Freileitung (z.B.)	Instandhaltung NM-I	MS-Kabel (z.B.)
Fehlerbild - visuelle Kontrolle	Inspektion (SAP-Meldung)	Fehlerbild-Diagnosemessung
Trasse, Spechtlöcher, BMF	Wartung	Kabelmantelfehler, TE
Mastwechsel	Instandsetzung	Reparatur
Verkabelung oder 1:1 Ersatz	Verbesserung	Teilaustausch, Erneuerung
Σ (baulicher Zustand aus Inspektion, Alterspönale, Technikpönale)	technischer Anlagenzustand	Σ (diagnostischer Zustand aus Inspektion, Alterspönale, Technikpönale)

Abbildung 4: Instandhaltungsvergleich Vergleich zwischen Freileitung und Mittelspannungskabel

Einflussfaktoren können die Lebensdauer beeinflussen und sind daher zu berücksichtigen (Abbildung 5).

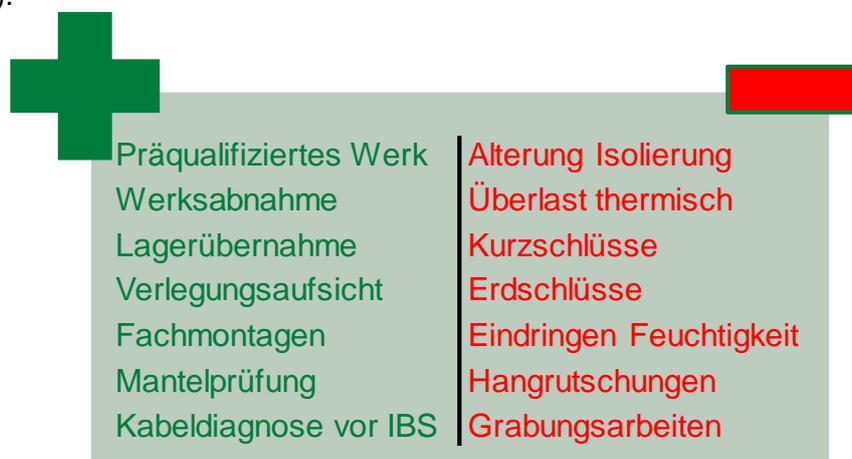


Abbildung 5: Einflussfaktoren bei einem Mittelspannungskabel

4 Methodik

Für das „Schätzen“ der Restlebensdauer von Mittelspannungskabeln wurde das erweiterte Cox-Model von Prentice, Williams und Peterson (PWP) - (Referenz Paper aus 1981) angewandt. Die Priorisierung der Diagnosemessung wird, basierend auf diesem Modell, gemeinsam mit dem Expertenwissen der KNG-Kabelspezialisten durchgeführt.

Dafür musste zuerst das ca. 2.900 km lange Mittelspannungskabelnetz in die möglichen Messstrecken überführt werden. Das war deshalb erforderlich, da jedes Kabelsegment topologisch ein Equipment darstellt und eine Messstrecke aber aus mehreren solcher Segmente bestehen kann.

So entstanden ca. 5.500 Kabeldiagnosestrecken (KDS), die in der technischen Anlagenstruktur im GIS und im SAP als neue Objekte aufzunehmen sind.

Im nächsten Schritt wurden alle Sachdaten der KDS und die historischen Ereignisse, wie z.B. water-trees-Schäden, zusammengeführt. Diese historischen Ereignisse beeinflussen die Lebensdauer und können zu einem vorzeitigen Ausfall führen.

4.1 Modellwahl und Variablenselektion

Die Analyse erfolgte mit einem PWP-Model, das die komplexe Struktur der KDS gut wiedergeben kann. Die möglichen Variablen wurden durch das angepasste „Lasso-Verfahren“ (Referenz Paper 1997) für zensierte Daten gemeinsam mit dem Expertenwissen der KNG-Kabelspezialisten auf die relevanten Variablen verringert.

4.2 Kaplan-Meier-Schätzer

Der Kaplan-Meier-Schätzer (Referenz Paper 1958) der KDS bis zum ersten Ausfall ist in Abbildung 6 dargestellt und gibt ein gutes Indiz der Lebensdauer verschiedener Technologiegenerationen.

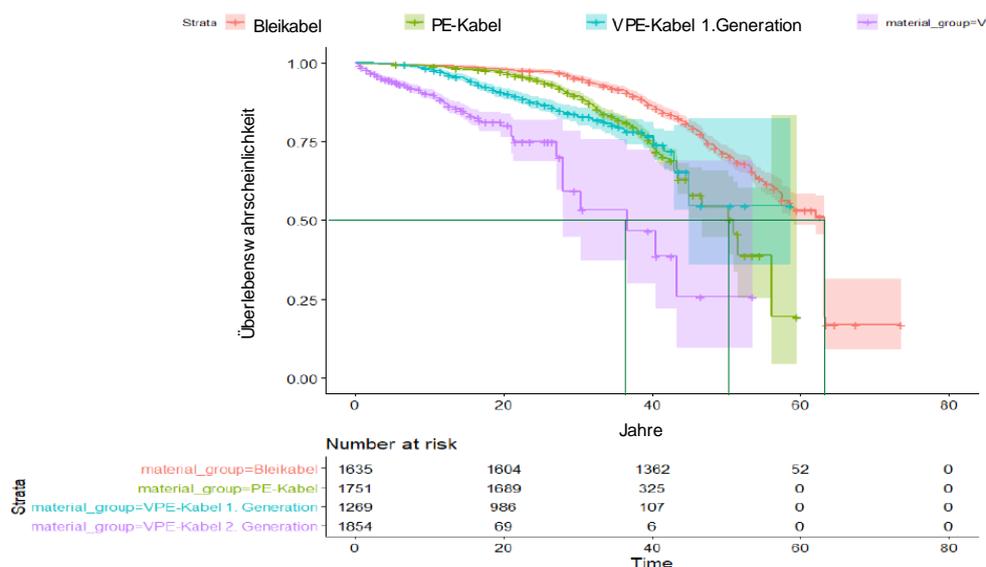


Abbildung 6: Kaplan-Meier-Schätzer der KDS (erster Ausfall pro Technologiegeneration)

4.3 Modellevaluierung

Für die Modellevaluierung haben wir einen Regelkreis eingeführt, um das Modell mit den tatsächlichen Zustandsergebnissen abzugleichen (Abbildung 7).

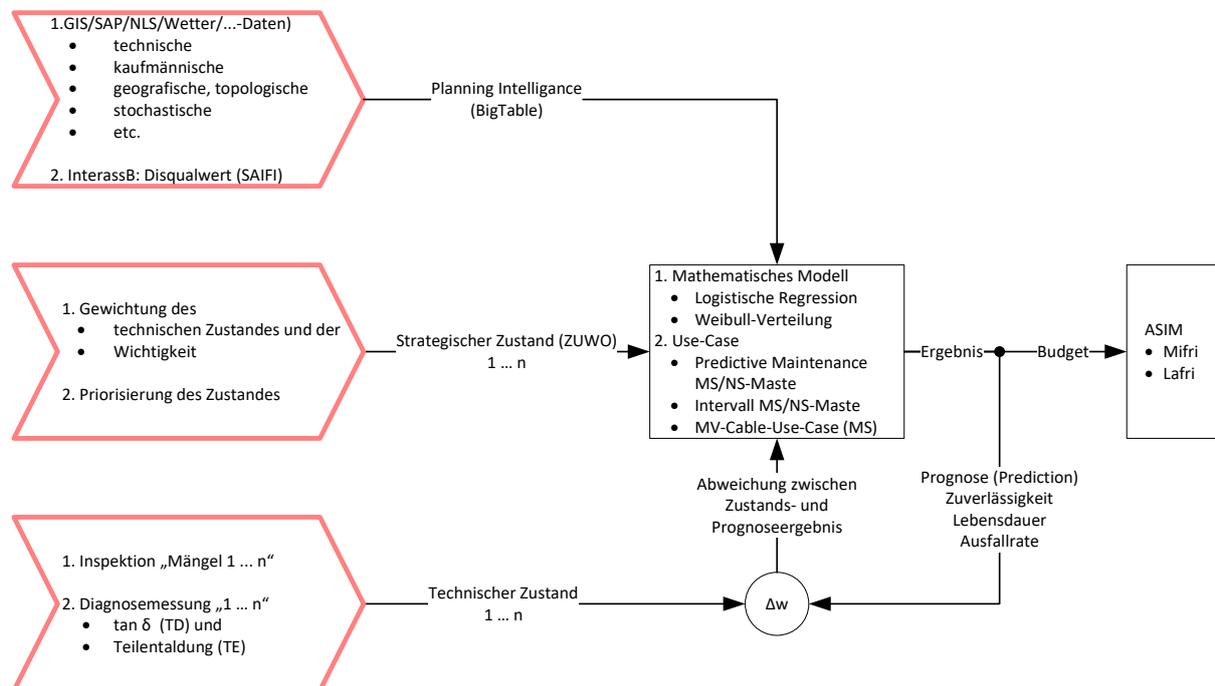


Abbildung 7: Modellevaluierung

4.4 Messparameter

Die Abbildung 8 zeigt die für jeden Fall anzuwendende Messtechnik und die Messparameter.

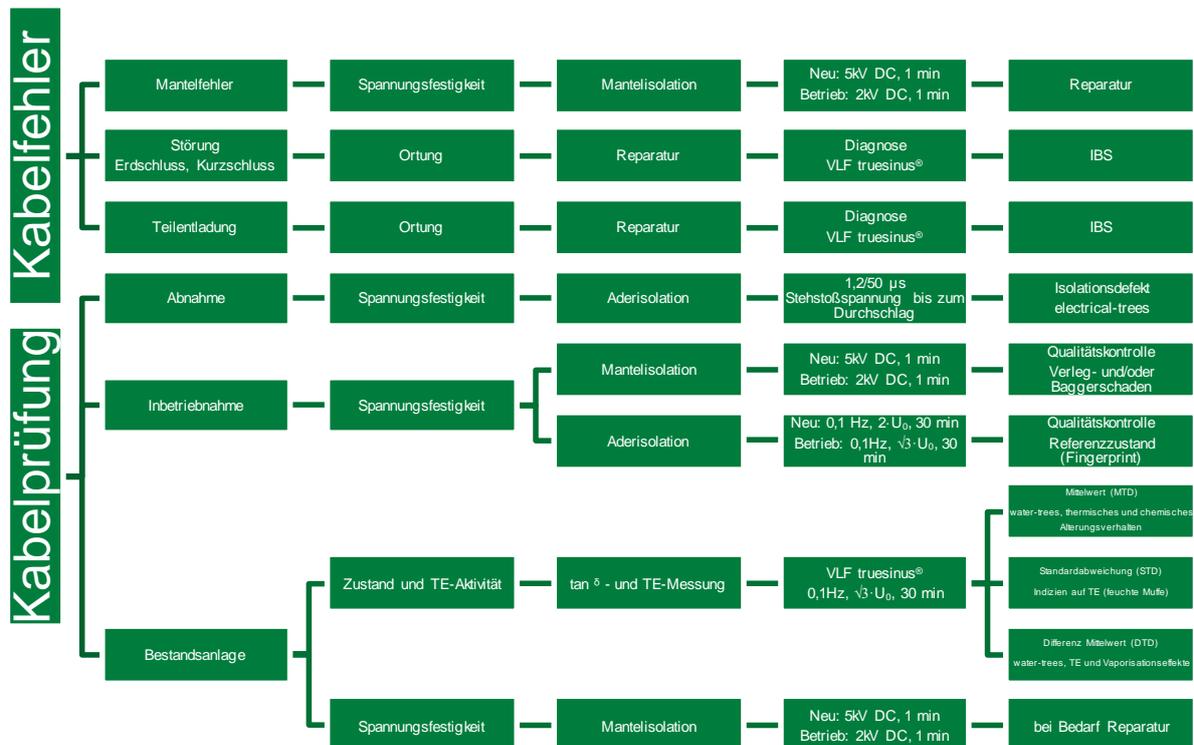


Abbildung 8: Messtechnik und Messparameter

5 Messtechnik

Die KNG setzt für Kabeldiagnosemessungen die Baur-Messtechnologie ein. Die verwendete DC-Prüfung wurde von der VLF-Prüfung abgelöst. Mit der DC-Prüfung war nur die Aussage möglich, ob ein Kabel okay oder infolge eines Durchschlages nicht okay ist. Diese Prüfung hat aber kein Ergebnis über den Zustand und die restliche Lebensdauer des Mittelspannungskabels gegeben. Der in der KNG eingesetzte Monitored Withstand Test (MWT) beinhaltet zusätzlich zur Kabelprüfung auch eine parallel durchzuführende $\tan \delta$ und/oder Teilentladungsmessung (Abbildung 9).

Messmethoden

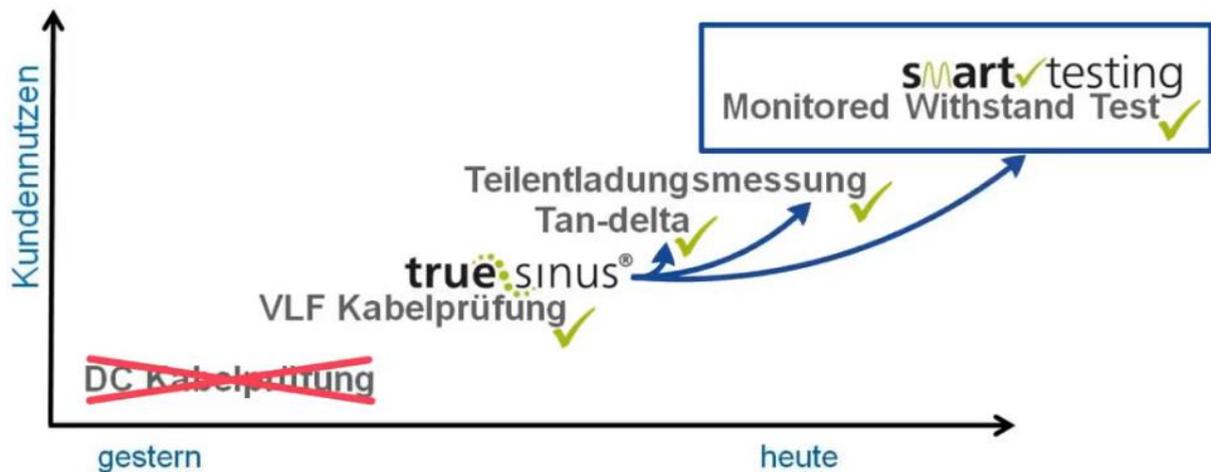


Abbildung 9: Entwicklung der Messtechnik (Quelle: Baur)

Diese Methode liefert tiefere Erkenntnisse über den Kabelzustand und wie in Abbildung 10 gezeigt wird, sehr detaillierte Informationen über die Art des Fehlerbildes.

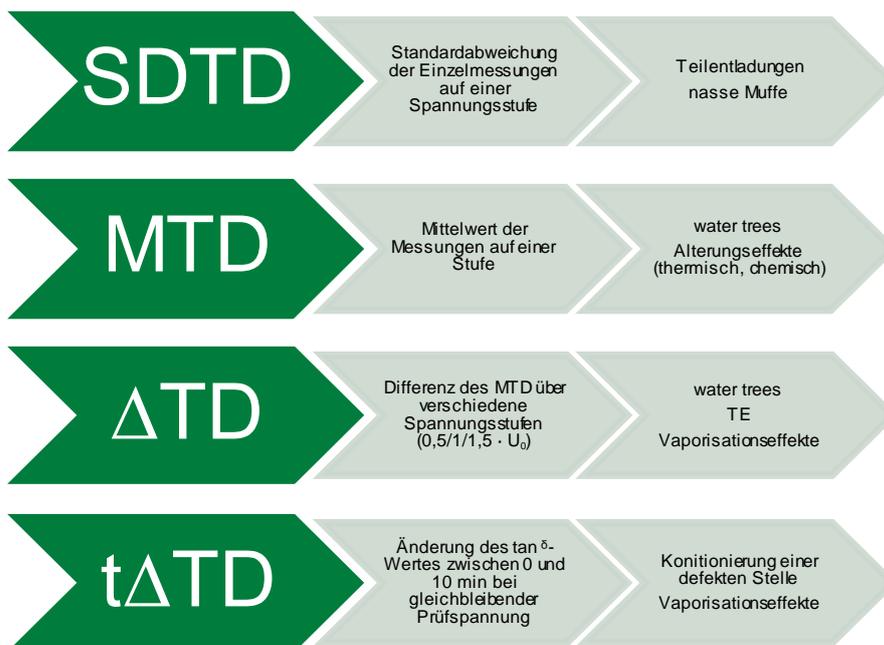


Abbildung 10: statistische Interpretation der Messdaten

6 Zustandsbewertung

Der strategische Zustand für die Priorisierung der Instandhaltungsmaßnahmen einer KDS wird mathematisch aus dem technischen Zustand und der Wichtigkeit ermittelt. Damit der technische Zustand und die Wichtigkeit dasselbe Gewicht haben, wird durch den Ursprung eine Tangente mit 45° gelegt (Abbildung 11).

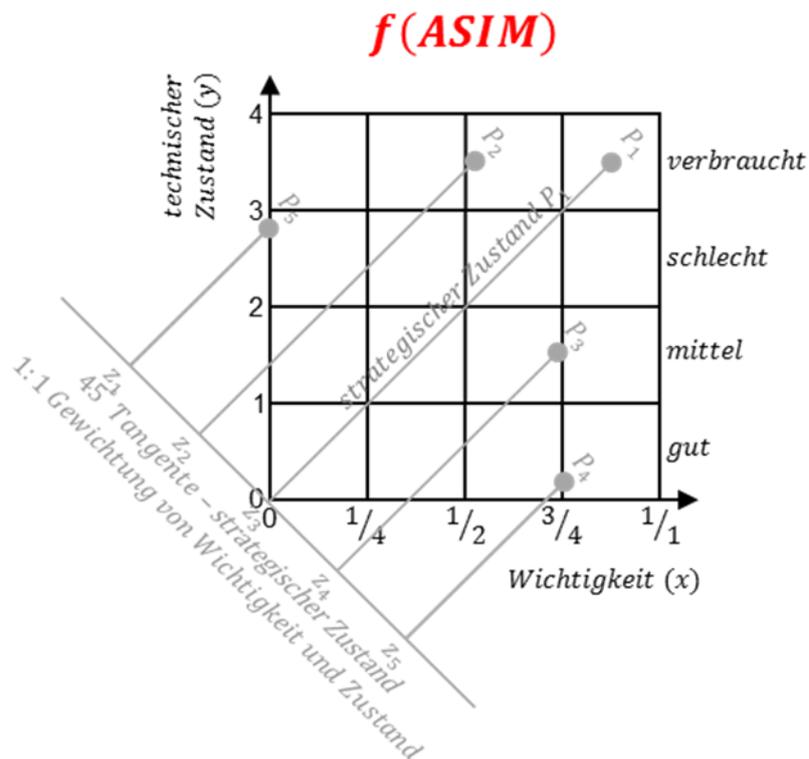


Abbildung 11: ZUWO-Systematik zur Priorisierung der Instandhaltungsmaßnahmen

6.1 Technischer Zustand

Der technische Zustand bestimmt sich aus:

- Alterspönale (Alterungsmodell innogy)
- Technikpönale (Hersteller, Type, Halbleiterschicht, Störungshäufigkeit)
- Diagnosemessung – diagnostischer Zustand

6.2 Wichtigkeit

Die Wichtigkeit bestimmt sich aus der Netztopologie:

- Schutzstrecke
- Stammstrecke
- Schaltbarkeit
- Ausfalleistung
- Übertragungsleistung
- Stichanbindung

6.3 Instandhaltungsmaßnahmen

Die Instandhaltungsmaßnahmen werden entsprechend dem strategischen Zustand eingeleitet. Diese Maßnahmen können sein:

- Lokale Reparatur einer Teilentladungsstelle
- Reparatur eines Mantelfehlers
- Austausch einer Teillänge
- Ersatz der gesamten Mittelspannungskabelstrecke

Zusätzlich wird das Risiko bewertet, mit welcher Wahrscheinlichkeit Mittelspannungskabel im nächsten Jahr ausfallen können, in Verbindung mit den sich ergebenden finanziellen Aufwendungen (Störungskosten). Diesen Kosten werden die Instandhaltungskosten für unterschiedliche Szenarien des Betriebsmittels zur Vermeidung dieser Störung bzw. zur Wiederherstellung der Funktionalität des Kabelsystems gegenübergestellt. Bei den Kosten der verschiedenen Szenarien sind in jedem Fall auch die zu erwartenden Störungskosten des neuen bzw. des instand gesetzten Mittelspannungskabels zu berücksichtigen, da im Allgemeinen auch nach einer Instandhaltung/Ersatz noch Störungen auftreten können. Wenn diese Instandhaltungskosten geringer sind als die wahrscheinlichsbedingten Störungskosten, ist eine Instandhaltung in diesem Umfang technisch/wirtschaftlich darstellbar und sinnvoll.

7 Kennzahlen

Bei der Entscheidung, ein älteres Betriebsmittel bzw. eine gesamte Kabelstrecke auszutauschen, sind grundsätzlich verschiedene Szenarien in Abhängigkeit der technischen Randbedingungen möglich:

- Verlängerung der Lebensdauer (Szenario 1: Lebensdauer)
- Austausch sämtlicher Betriebsmittel (Szenario 2: Ersatz)
- Erneuerung durch Austausch einzelner Komponenten (Szenario 3, Austausch)
- Änderung der Versorgungsstruktur (Szenario 4, Netzänderung).

Szenario	technisch	wirtschaftlich	soziologisch
1. Lebensdauer	Fehlerrate, Restlebensdauer	Instandhaltungskosten, Lebenszykluskosten	Umwelteinfluss
2. Ersatz	Zuverlässigkeit	Ersatzkosten	Sicherheit, Umwelt, Image in der Öffentlichkeit
3. Austausch	Zustandsbewertung, Zuverlässigkeit	Ersatzkosten, Folgekosten	Fehlerwahrscheinlichkeit, Umwelt
4. Netzänderung	Versorgungssicherheit, Verfügbarkeit	Folgekosten, Lebenszykluskosten	Mitarbeitermotivation, Image in der Öffentlichkeit Umwelt

Hierbei können die Kennziffern verschiedenen Bereichen (technisch, wirtschaftlich, soziologisch) zugeordnet werden, wie dieses beispielhaft in der oben angeführten Tabelle dargestellt ist. Kennziffern stellen eine vereinfachte Auswahl der insgesamt möglichen dar, die beispielhaft als Indikatoren ausgewählt werden können.

Darüber hinaus können noch weitere Kennzahlen herangezogen werden.

7.1 Technischer Bereich

- altersabhängige Fehlerwahrscheinlichkeit
- Störungsverhalten in der Vergangenheit

7.2 wirtschaftlicher Bereich

- Restlebensdauer
- Kosten einer Störungsbehebung (Reparatur- bzw. Ersatzkosten)

7.3 Soziologischer Bereich

- Personensicherheit
- Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben

8 Dokumentation

Die Anlagenstruktur des Verteilernetzes der KNG ist im GIS und im SAP erfasst. Im GIS ist das Verteilernetz topologisch, in der Lage geografisch und schematisch als Linienobjekt erfasst. Durch die dreiphasige VLF-Prüfung, $\tan \delta$ - und Teilentladungsprüfung an Mittelspannungskabeln ist nun eine dreiphasige Dokumentation erforderlich. Aus diesem Grund ist zukünftig im GIS ein dreiphasiger Schemaplan für die KDS erforderlich. In diesem dreiphasigen Schemaplan werden dann alle Messdaten, die sich daraus ergebenden Zustände, Störungsereignisse und Sachdaten erfasst. Die Umsetzung erfolgt 2020.

8.1 Zustandsmonitor

Der technische Zustand der KDS wird ab 2020 im GIS oder in einer Web-Applikation visuell mit einem Ampelsystem dargestellt (Abbildung 12). Die Zustände aller noch nicht gemessenen KDS werden nach Vorliegen einer statistisch belastbaren Stichprobe aus der Grundgesamtheit der gemessenen KDS mit einem Predictive Maintenance Modell analytisch vorhergesagt.

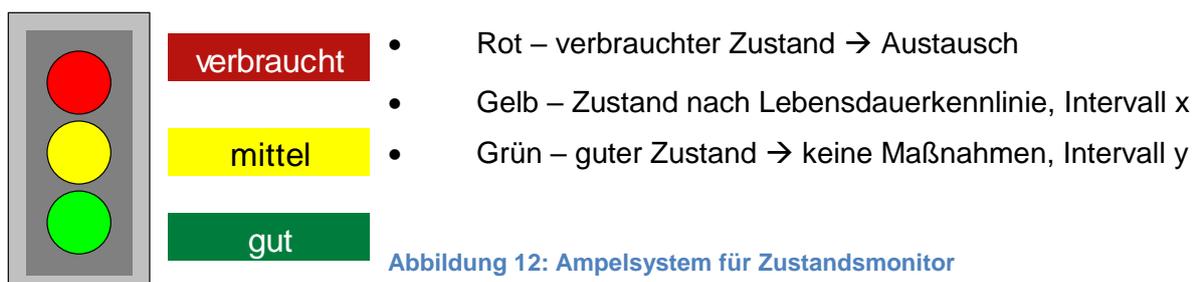


Abbildung 12: Ampelsystem für Zustandsmonitor

9 Zusammenfassung

Mit dem Übergang von einer ereignisorientierten hin zu einer zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie gewinnt die KNG schrittweise einen Überblick über den tatsächlichen bzw. vorhergesagten Zustand von Mittelspannungskabeln. Mit diesen Erkenntnissen kann das klassische Alterungsmodell sukzessive durch die tatsächlich zu erwartenden Restlebensdauern kompensiert bzw. ergänzt werden. Die KNG erwartet sich mit dieser Strategie die mittel- und langfristigen Ersatzmaßnahmen budgetär pro aktiv planen zu können.

10 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Neier Tobias von der Firma Baur bedanken, der die KNG äußerst engagiert unterstützt hat und in den zahlreichen Workshops mit wertvollen Anregungen zur erfolgreichen Umsetzung eines Mittelspannungskabel-Diagnosemanagementsystems in der KNG beigetragen hat. Weiters darf ich meinen Autorenkollegen meine aufrichtige Wertschätzung ausdrücken, die in der Umsetzung dieses Projektes eine fachliche und persönliche Herausforderung gefunden haben. Last but not least gilt ein ganz besonderer Dank der Geschäftsführung der KNG-Kärnten Netz GmbH, die stets konstruktive und motivierende Begleiter waren und sind.

11 Referenz

- Prentice, R. L., Williams, B. J., Peterson, A. V. (1981), "On the regression analysis of multivariate failure time data", *Biometrika*, 68(2), S. 373–379.
- Tibshirani, R. J. (1997). The Lasso Method for Variable Selection in the Cox Model. *Statistics in Medicine*, 16, S. 385–395.
- Edward L. Kaplan & Paul Meier: Individual Nonparametric Estimation from Incomplete Observations. *Journal of the American Statistical Association*, 53(282) (1958), S. 457–481