



Diagnosemessungen und statistische Analyse

Restlebensdauer von Mittelspannungskabeln zuverlässig vorhersagen

Mit einem durchgängigen Workflow von der Kabeldiagnose bis zur Auswertung bietet die Baur GmbH Asset-Managern eine Lösung, mit der sie den Zustand von Mittelspannungskabeln diagnostizieren können. Abgerundet wird dies nun durch die statistische Prognose der Kabellebensdauer. Das Wissen um die verbleibende Nutzungszeit ermöglicht es, Ersatzinvestitionen genauer zu planen und oft um einige Jahre zu verzögern.

Für Asset-Manager wird es immer schwieriger, Verteilnetze mit den gegebenen Budgets instand zu halten. Viele Mittelspannungskabel wurden vor etlichen Jahrzehnten verlegt und sind nun in einem Alter, wo Ausfälle wahrscheinlicher werden. Dazu kommt eine andere, heute oft stärkere Belastung des Netzes durch eine größere Auslastung – verursacht durch Mehrverbrauch oder dezentrale Stromeinspeisung.

Zustandsorientierte statt intervallgesteuerter Instandhaltung

Unter diesen Bedingungen kosteneffizient eine hohe Verfügbarkeit und wenig Ausfälle des Mittelspannungs-

netzes sicherzustellen, gelingt nur auf Basis einer Kabelzustandsbewertung. Sie ermöglicht es, Investition in Reparaturen und Ersatzinvestitionen nicht aufgrund des Alters (**Bild 1**), sondern auf Basis des tatsächlichen Alterungszustands zu planen (**Bild 2**). Andernfalls würden schneller als erwartet gealterte Kabel zu Netzausfällen führen oder noch intakte Kabel früher als nötig getauscht – beides ergäbe ein ungünstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis.

Zur Zustandsbewertung von Mittelspannungskabeln haben sich zwei Diagnosemethoden etabliert: die Teilentladungs- und die Verlustfaktormessung (auch $\tan-\delta$ -Messung genannt). Die Teil-

entladungsmessung ist ein lokales Verfahren. Mit ihr lassen sich beispielsweise Defekte an Garnituren oder lokale Teilentladungen in einer beschädigten Kunststoffisolierung und eine unzureichende Papiermasse-Isolierung erkennen. Die Messung liefert außer den Werten der Teilentladung auch die Entfernung zur Störstelle und vereinfacht so das Auffinden der zu beobachtenden oder zu reparierenden Stellen.

Verlustfaktor gibt Anhaltspunkte für tatsächliche Alterung

Die Verlustfaktormessung, deren Auswertung im Folgenden im Mittelpunkt steht, ist ein zerstörungsfreies Verfah-

ren zur Bewertung der gesamten gemessenen Kabelstrecke. Sie liefert Hinweise auf Water Trees (durch Wasser geschädigte Isolierung an kunststoffisolierten Kabeln) sowie auf Störstellen in der Isolierung von Papiermassenkabeln, auf Feuchtigkeit in Garnituren und auf mögliche Teilentladungen. Da der Verlustfaktor mit Zunahme der Water Trees in der Isolierung steigt, ist der Wert ein Indiz für die Güte der Isolierungswirkung. Bei neuen Kabeln ist der Verlustfaktor nahe Null, mit zunehmender Alterung steigt dieser Wert durch die genannten Einflüsse von Feuchtigkeit in der Kunststoffisolierung an.

Schon bei der Verlustfaktormessung lassen sich Rückschlüsse auf den Zustand des Kabels ziehen. Mit der Baur-Software 4.0 können Anwender standardisierte oder selbst definierte Diagnosesequenzen nutzen und noch während der Messzyklen die ersten Auswertungen vornehmen. Aufgrund einheitlicher Messzyklen und der Vergleichbarkeit der Ergebnisse erhalten Asset-Manager eine objektive Zustandsbewertung des Kabelnetzes. Das gibt ihnen eine gute Entscheidungsgrundlage für die Instandhaltungsplanung.

Statistische Prognose der Restlebensdauer

Mit der neuen Stand-alone-Software Stalex lassen sich die Messergebnisse vor allem für kunststoffisolierte Kabel weitergehend auswerten (Bild 3). Stalex wird von Baur exklusiv vertrieben und ist eine gemeinsame Entwicklung mit der Korea Electric Power Corporation (Kepco). Das Unternehmen betreibt in Südkorea ein Stromnetz, zu dem unter anderem 41000 km erdverlegte Kabel ($U_0 = 13,2 \text{ kV}$) gehören. Um die Netzinstandhaltung so kostengünstig wie möglich zu gestalten, hat sich Kepco vor rund zehn Jahren intensiv mit der Kabeldiagnose beschäftigt und gängige, damals verfügbare Verfahren verglichen. Nach dem Vergleich wählte der Netzbetreiber die Teilentladungs- und Verlustfaktormessung mit VLF-Sinus-Quellen (Very Low Frequency). Anschließend entwickelte Kepco in Zusammenarbeit mit der koreanischen Universität Mokpo eine Methode und Software, mit der sich eine Vorhersage über die verbleibende Lebensdauer erstellen lässt. Baur und Kepco haben hierfür die passende Software entwickelt, die nun unter dem Namen Stalex erhältlich ist. Sie wurde auf die Mess-

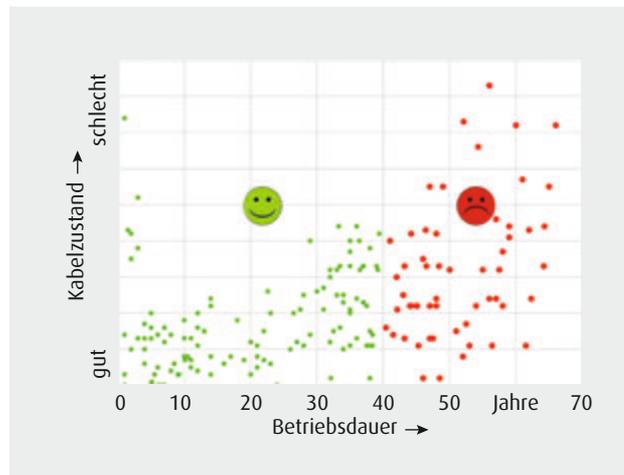


Bild 1. Eine am absoluten Alter orientierte Ersatzstrategie würde dazu führen, dass viele noch intakte Kabel (dargestellt im unteren rechten Bereich des Diagramms) ersetzt würden.

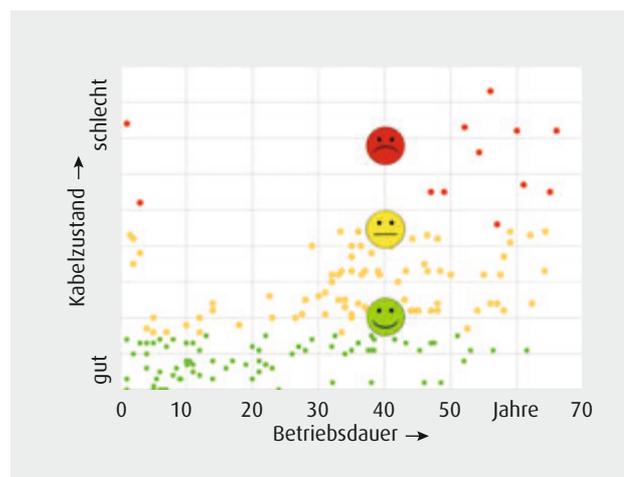


Bild 2. Bei einer zustandsorientierten Netzpflege auf Basis von Diagnosemessungen können alte intakte Kabel weiter genutzt und neuere Kabel in schlechtem Zustand rechtzeitig erkannt und ersetzt werden. Das minimiert die Kosten und steigert die Verfügbarkeit des Netzes.

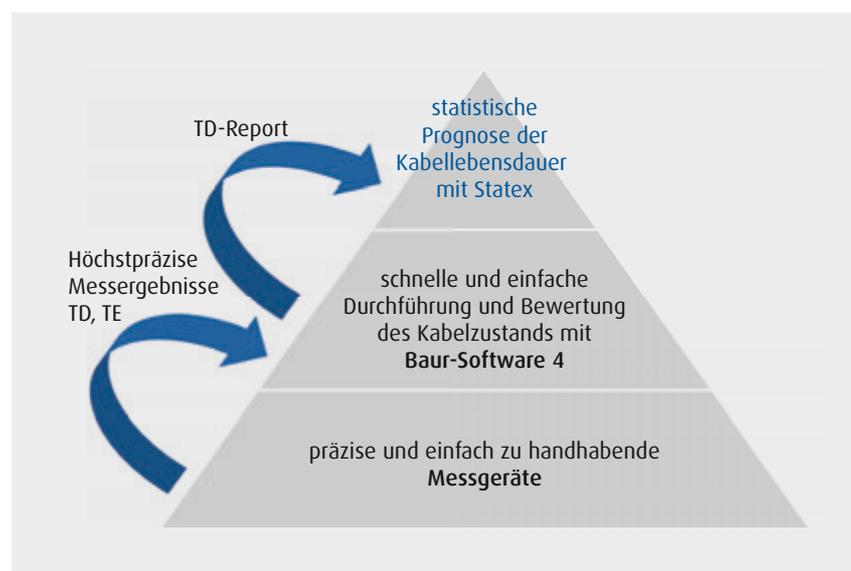


Bild 3. Mit der neuen Software Stalex lässt sich aus den Werten der Verlustfaktormessung eine Vorhersage der Restlebensdauer von Mittelspannungskabeln ableiten.

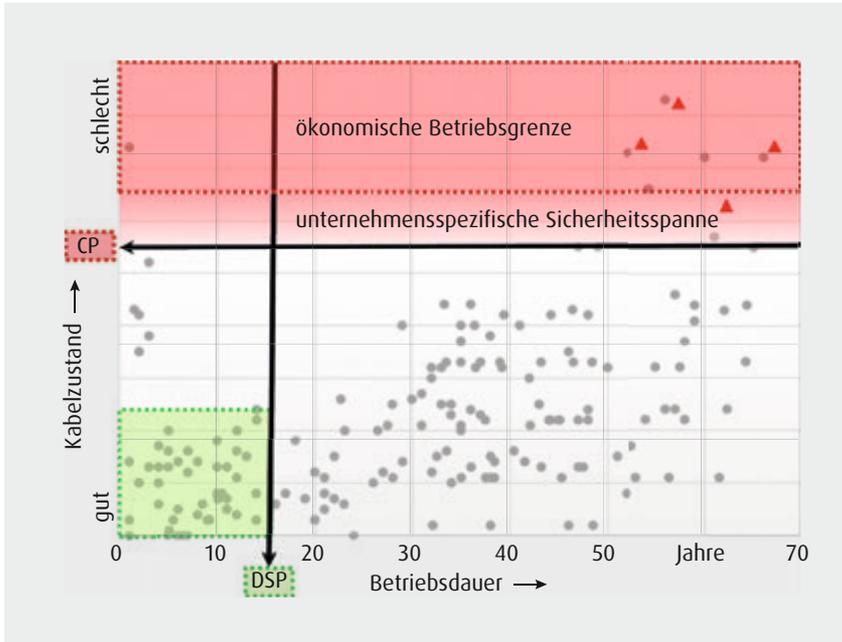


Bild 4. Typischerweise beginnt der Alterungsprozess bei VPE-Kabeln erst nach mehr als zehn Jahren, wenn die Antioxidantien in der Kabelisolierung ausgegast sind und sich die ersten Water Trees bilden.

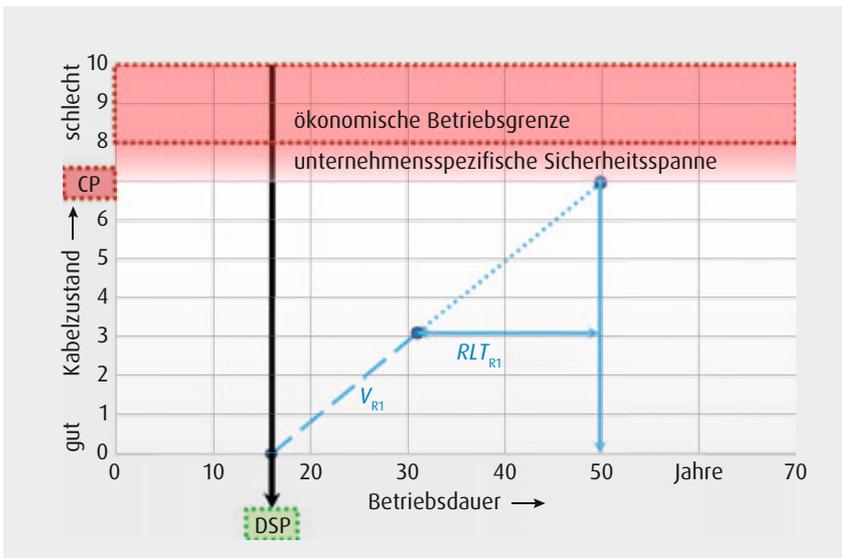


Bild 5. Die Software Statex kann anhand der tan-δ-Messwerte den Alterungsindex errechnen und die Restlebensdauer des Kabels prognostizieren.

werte zigtausender kunststoffisolierter Kabel angewendet. Bis heute sind rund 90 000 Messergebnisse eingeflossen.

Alterungsindex aus den Messwerten errechnen

Für die Berechnung der Restlebensdauer eines VPE-Kabels sind drei Aspekte wesentlich:

- wann setzt die Alterung der Kabel ein
- wie schnell schreitet die Alterung fort
- ab welchem Zustand wird das Kabel als kritisch eingestuft.

Um herauszufinden, ab wann bei Kunststoffisolierungen die Alterung einsetzt (Bild 4), hat das Kepco Research Institute Analysen durchgeführt. Für die Kabel bei Kepco lag der Degradation Starting

Point (DSP) im Durchschnitt bei rund 13 Jahren.

Der Alterungsindex des gemessenen Kabels ergibt sich aus

$$R = \sqrt{(TD_{norm}^2 + DTD_{norm}^2 + TD_{skirt}^2)}$$

Dabei ist TD_{norm} der Wert des $\tan \delta$ und DTD_{norm} die Abweichung (Delta) des $\tan \delta$. TD_{skirt} sagt aus, wie stabil sich der Verlustfaktor über mehrere Messwerte eines Messzyklus verhält, denn bei Kabeln mit Isolationsverlusten gibt es Vorboten. Zum Beispiel kann der konstante Anstieg oder Abfall des $\tan \delta$ -Werts oder seine Fluktuation innerhalb einer Spannungsstufe auf den Grad der Alterung hinweisen.

Zum Bestimmen von TD_{skirt} wird eine virtuelle Linie zwischen dem größten und kleinsten Wert des $\tan \delta$ aus acht aufeinanderfolgenden Messungen gezogen. Ein linearer (ansteigender) Trend bei den Messwerten deutet auf eine Änderung der dielektrischen Verluste der Kabelisolierung hin, ein abfallender oder nichtlinearer Trend hingegen ist in der Regel ein Indiz für Feuchtigkeit oder elektrische Entladungen in einer oder mehreren Garnituren.

Restlebensdauer bestimmen mit nur einer tan-δ-Messung

Der Alterungsindex R lässt sich bereits anhand einer Verlustfaktormessung berechnen (Bild 5). Bei Wiederholungsmessungen an demselben Kabel bezieht die Statistik-Software die neuen Ergebnisse ein und präzisiert die Prognose (Bild 6). Aus dem Alterungsindex und dem tatsächlichen Alter minus des DSP lässt sich die Alterungsgeschwindigkeit errechnen und somit die Zeitspanne bis zum Erreichen eines kritischen Punkts. Anwender haben die Möglichkeit, den kritischen Punkt im Life Time Wizard der Software für jeden Kabeltyp selbst zu definieren und so einen individuellen Sicherheitszuschlag einfließen zu lassen. Auch der DSP kann vorgegeben werden. Neben der zu erwartenden Restlebensdauer liefert die Software auch Empfehlungen, wann die nächste Kabeldiagnose stattfinden sollte oder für wann Instandhaltungsarbeiten oder der Ersatz des Kabels einzuplanen sind.

Ergänzend liefert Statex für das oder die gemessenen Kabel eine dreidimensionale Darstellung der Messwerte (Bild 7). In dieser 3-D-Darstellung können Anwender zum Vergleich weitere eigene Messwerte oder in Statex hinterlegte Ergebnisse von Kepco einblen-

den lassen und den Zustand der Kabel untereinander vergleichen.

Zuverlässigere Vorhersagen für die Restlebensdauer

Bei Kepco kommt Statex schon seit einigen Jahren zum Einsatz. Durch die Software konnten etliche Investitionen verschoben werden, denn die gemessenen Kabel befanden sich im Durchschnitt in einem besseren Zustand als aufgrund des Alters zu vermuten gewesen wäre. Bei den gemessenen älteren Kabeln lag die Zahl der Fehler je km sogar niedriger als bei Kabeln, die den DSP (hier: 13 Jahre) noch nicht erreicht haben. Hätte Kepco Ersatzinvestitionen anhand der Verlustfaktormessung und der Auswertung nach IEEE 400.2 geplant, wären von den 15000 gemessenen Kabelkilometern 255 reif für den Austausch gewesen. Mit Statex ließ sich jedoch errechnen, dass nur 54 Kabelkilometer dringend zu ersetzen sind. Gegenüber den IEEE-Kriterien ergab sich im Mittel eine rund elf Jahre längere Restlebensdauer.

Verschiedene Software-Versionen

Mit Statex steht die Vorhersage der Restlebensdauer Baur-Kunden exklusiv zur Verfügung. Statex ist mit verschiedenen Lizenzmodellen erhältlich:

- Statex Core ermöglicht die Pflege und Überwachung von Kabeldaten in der Datenbank und das Verwalten der Kabeldaten. Außerdem lassen sich mit der Core-Version der Alterungsindex R berechnen, eine Zustandsanalyse durchführen, eine 3-D-Grafik erstellen und Berichte anfertigen.
- Statex Pro bietet ergänzend die Funktion zur Ermittlung der statistischen Restlebensdauer. In der Pro-Version enthalten ist ein Life Time Wizard, in dem Anwender einen individuellen DSP (den Startpunkt des Alterungsprozesses) und einen auf eigenen Erfahrungen basierenden Critical Point eingeben können. Mit der Software-Lizenz erwirbt der Kunde eine zweitägige Vor-Ort-Schulung zur Einführung und einen weiteren Zweitageskurs zur Vertiefung der Kenntnisse. Durch eine Zusatzlizenz können weitere Mitarbeiter auf die Datenbank von Statex Pro zugreifen. Allerdings ist der Life Time Wizard nur durch einen User konfigurierbar, wodurch die Konsistenz der Daten gesichert wird.

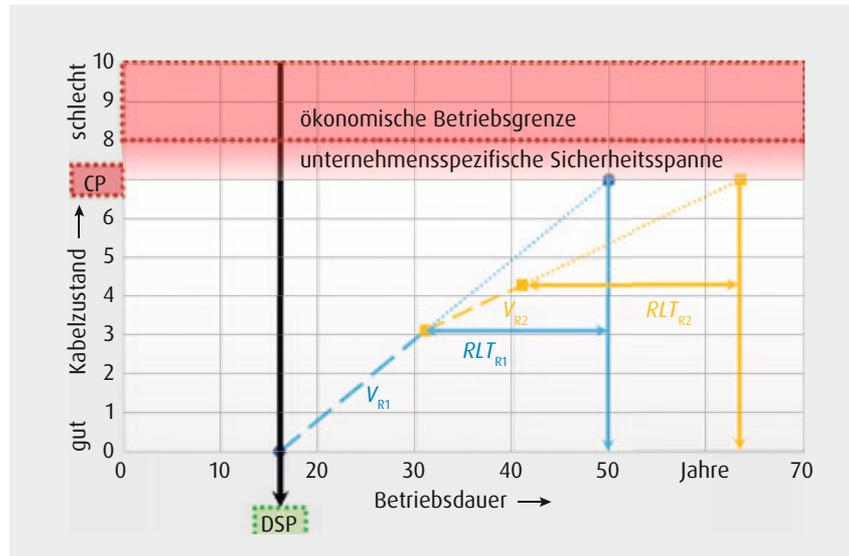


Bild 6. Bei Wiederholungsmessungen errechnet Statex die Restlebensdauer neu.

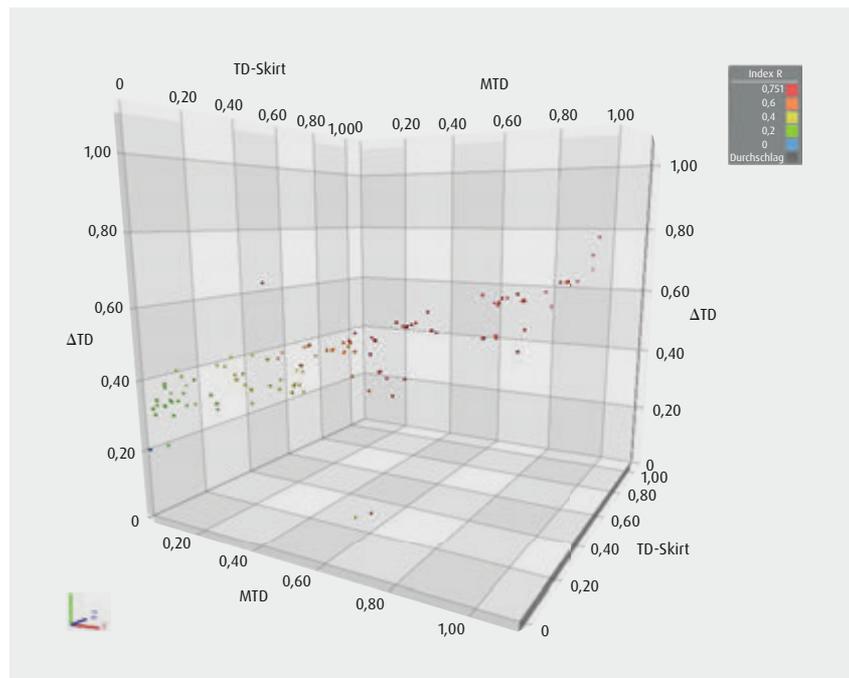


Bild 7. Darstellung des Alterungsindex R (siehe Legende) für alle gemessenen Phasen in einer dreidimensionalen Grafik. Jeder Punkt steht für den Zustand einer gemessenen Phase.

Statex liefert Informationen und Empfehlungen für Asset-Manager

Mit der Kombination aus VLF-Messtechnik, der Baur-Software zur Durchführung der Messungen und sofortigen Interpretation der Werte sowie der Software Statex zur statistischen Vorhersage der Restlebensdauer von Kabeln haben Asset-Manager Werkzeuge an der Hand, um das Verteilnetz noch kostengünstiger instandhalten zu können. Mittelspannungskabel können

mit den Ergebnissen der Statex-Software im Durchschnitt um einige Jahre länger genutzt werden, als es aufgrund ihres absoluten Alters, einer Kabelzustandsbewertung nach IEEE-Kriterien oder der Klassifizierung auf Basis der $\tan-\delta$ -Werte der Fall wäre.

- >> **Martin Jenny**,
Leitung Produktmanagement,
Baur GmbH, Sulz/Österreich
- >> headoffice@baur.at
- >> www.baur.at