



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology



Modellierung der Auswirkungen von Stress und Alterungseinflüssen auf die Häufigkeit von Mehrfachausfällen in Mittelspannungs- Kabelnetzen

Gerhard Theil
Technische Universität Wien
Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft
1040 Wien, Gußhausstraße 25
gerhard.theil@tuwien.ac.at

Problemstellung

Alterungsbedingte Zunahme der Häufigkeit von Ausfällen
in Mittelspannungs-Kabelnetzen

Auswirkungen

- Gehäuftes Auftreten von Isolationsfehlern
- Verstärkte Belastung der Komponenten durch Fehler
(Kurzschlusskräfte, Verlagerungsspannung)
- Auftreten von Folgefehlern insbesondere auf
gealterten Muffen → Mehrfachausfälle

Zahlenwerte

Netz, ca. 5000km 10-kV-Kabel, 30.000 bis 50.000 Muffen

Ausfallanzahlen	Muffen	Kabel
2-Jahresperiode:	142	
2 Folgejahre:	170	100

Hilfestellung zur Problemlösung

Anwendung von
Instrumenten zur Prognose der Entwicklung der
Einfach- und Mehrfachausfallhäufigkeiten
der Kabel unter Berücksichtigung ihrer
Vorbelastung durch Fehlerereignisse.

Elemente zur Modellierung der Entwicklung der Ausfallhäufigkeit von Betriebsmitteln

- Zeitliche Zunahme der Ausfallhäufigkeit
- Berücksichtigung des Reparaturmuffenzuwachses
- Berücksichtigung des Einflusses von Instandhaltungsmaßnahmen.
- Vorbelastung der Betriebsmittel als Funktion der Einsatzdauer (Stressmodell)
- Häufigkeit von Mehrfachausfällen als Funktion des Stressfaktors
- Zuverlässigkeitsanalyse elektrischer Energienetze (Verwendung der zuvor ermittelten Ausfallhäufigkeiten und Berücksichtigung der Einsatzdauern der Betriebsmittel)

Ermittlung der zeitlichen Entwicklung der Ausfallhäufigkeit

Erneuerungsichte $r(t)$: Erwartungswert der Anzahl von
Erneuerungen im Zeitintervall dt

$$r(t) = \sum_{\tau=0}^t rb(t-\tau) \cdot f(\tau)$$

$$rb(0) = 1 + r(0); rb(t) = r(t), t > 0$$

$f(t)$: Lebensdauerichte des Betriebsmittels
(Kabel oder Muffe)

Die Erneuerungsichte entspricht der Ausfallhäufigkeit im
Zeitintervall $dt = 1$ [a]

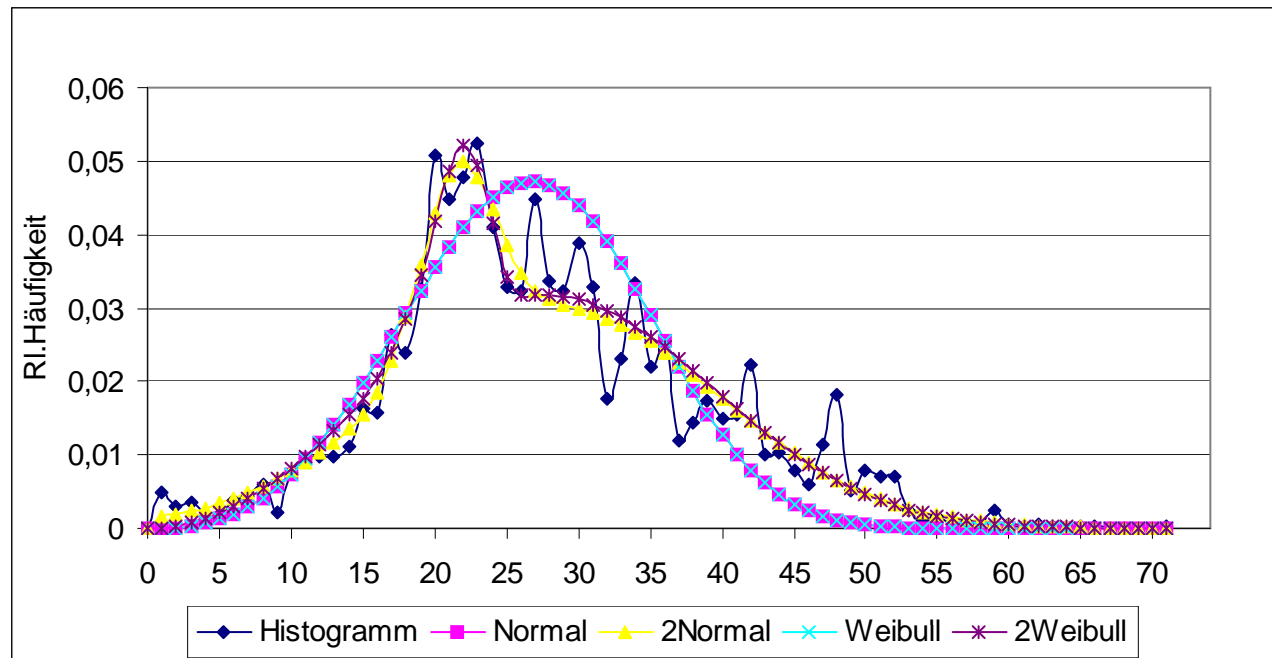
Asymptotischer Wert ($t \rightarrow \infty$):

$$r(\infty) = 1/E(t)$$

$E(t)$: Lebensdauererwartungswert

Ermittlung der Lebensdauererverteilung aus dem Lebensdauerhistogramm

(durch Parameterestimation)



Lebensdauerhistogramm und Lebensdauerdichtefunktionen für 20kV Holzmasten

Modellierung von zeitlich aufeinanderfolgender Erstinbetriebnahme

Errichtungsdichte $e(t)$:

Anzahl der Betriebsmittel in Jahr t bezogen auf die am Ende des Errichtungs-
(Beobachtungs-) Zeitraums vorliegende Betriebsmittellanzahl

$$\sum_{i=0}^{e_{max}} e(i) = 1$$

e_{max} Letztes Errichtungsjahr

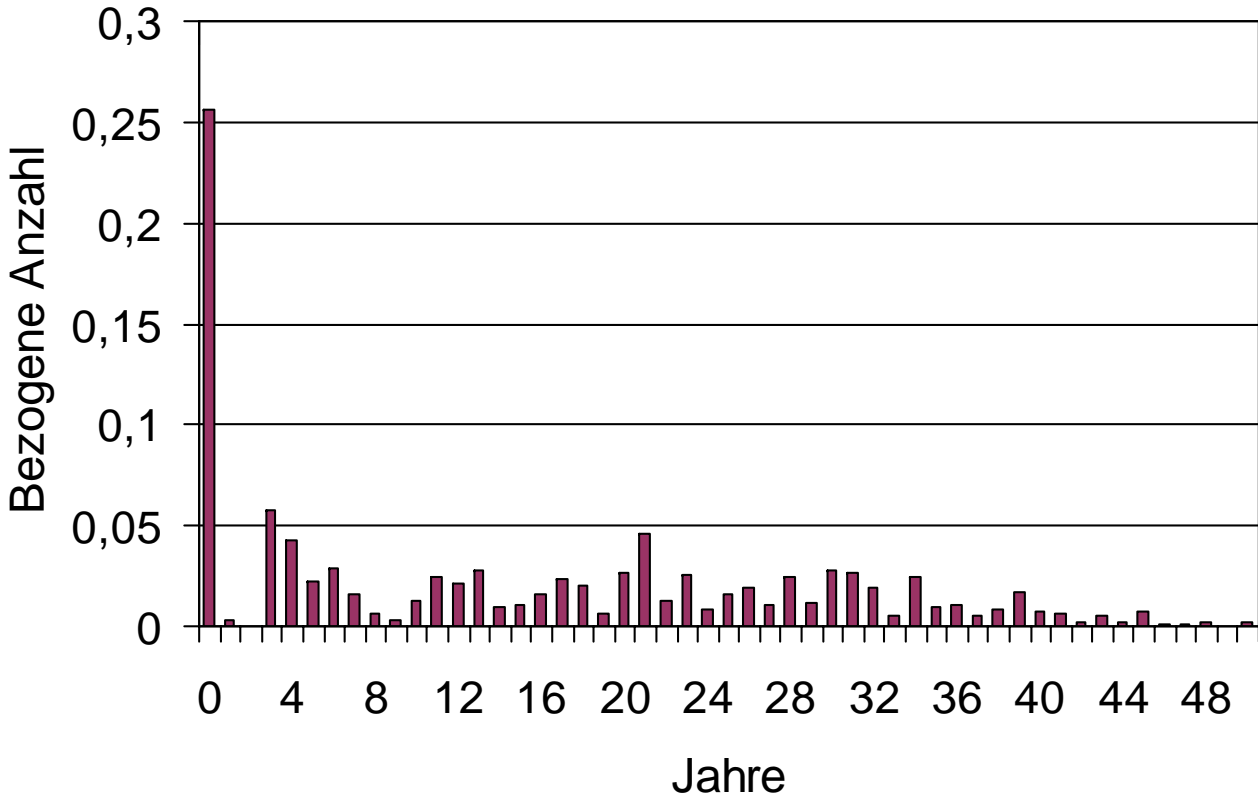
Erneuerungsdichte:

$$rk(t) = \sum_{\tau=1}^t re(t-\tau) \cdot f(t-\tau, \tau)$$

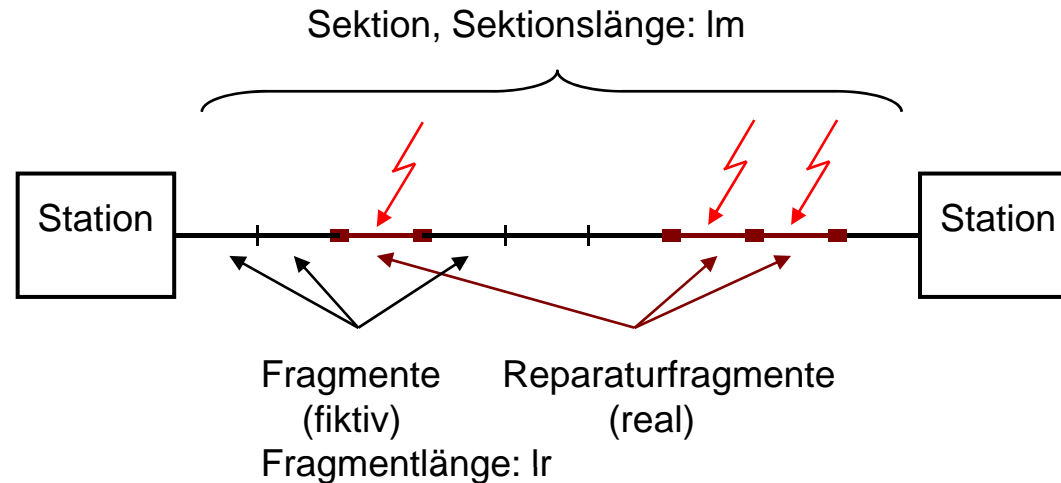
$$re(0) = e(0) / [1 - f(0,0)]$$

$$re(t) = \frac{1}{1 - f(t,0)} \cdot [e(t) + \sum_{\tau=1}^t f(t-\tau, \tau) \cdot re(t-\tau)], \quad t > 0, \quad e(t) = 0 \text{ für } t > e_{max}$$

Errichtungsfunktion für 20-kV-Betriebsmittel



Modellierung der zeitlichen Entwicklung des Reparaturmuffenzuwachses



Reparaturmuffenzuwachs:

$$n_m(t) = rb(0) \cdot f(t)_{Frag} \cdot nr \cdot q(t)$$

$$rb(0) \approx 1$$

- $f(t)_{Frag}$ Lebensdauerdichte des Kabelfragments
- nr Anzahl der (fiktiven) Fragmente der Kabelsektion
- $q(t)$ Verhältnis Reparaturmuffen- zu Reparaturfragmentanzahl (0..2)

Gesamte Ausfallhäufigkeit der Kabelsektion

$$r_{sm}(t) = r_{Frag}(t) \cdot nr + r_m(t) \cdot N_m(tl_{\max})$$

$$N_m(tl_{\max}) = \sum_{j=0}^{tl_{\max}} n_m(j)$$

$r_{Frag}(t)$ Erneuerungsdichte (Ausfallhäufigkeit) eines Kabelfragments

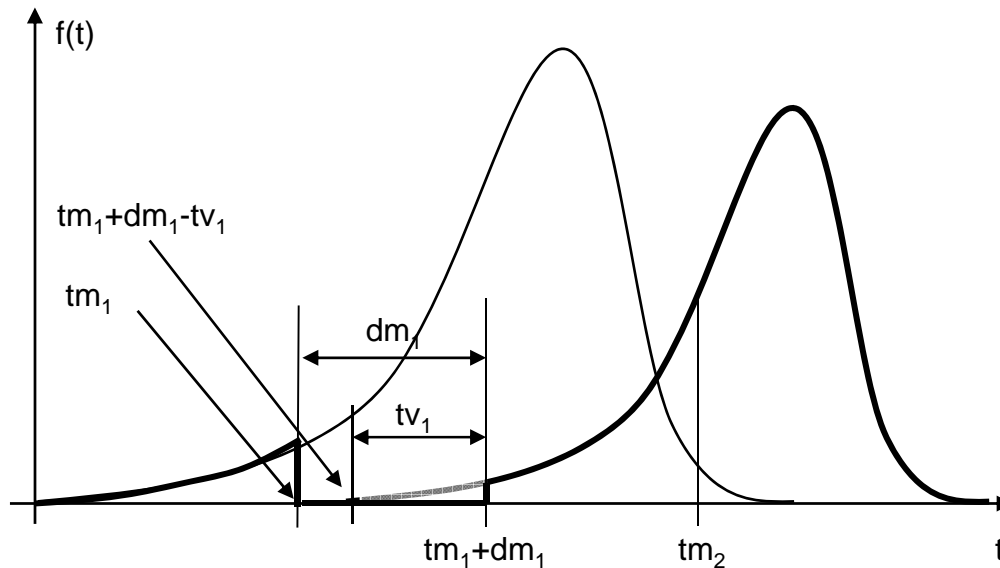
$r_m(t)$ Erneuerungsdichte (Ausfallhäufigkeit) einer Muffe

nr Anzahl der (fiktiven) Fragmente der Kabelsektion

$N_m(tl_{\max})$ Maximal mögliche Reparaturmuffenanzahl in der Kabelsektion

tl_{\max} Maximale Lebensdauer des Kabels (für welche dessen Lebensdauerdichtefunktion definiert ist).

Wartungsmodell



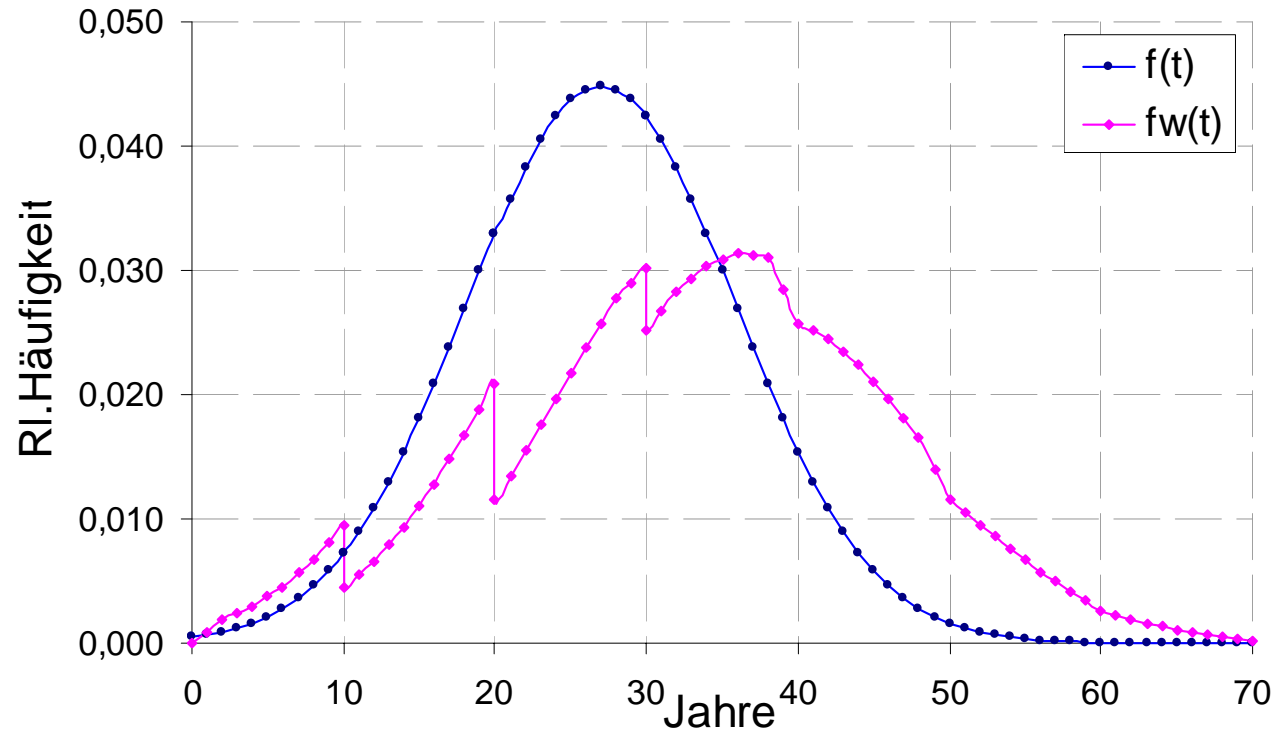
$f(t)$ Lebensdauerdichte

tm Wartungszeitpunkt

dm Wartungsdauer

tv Zeitverschiebung zur Modellierung irreversibler
Zustandsverschlechterung

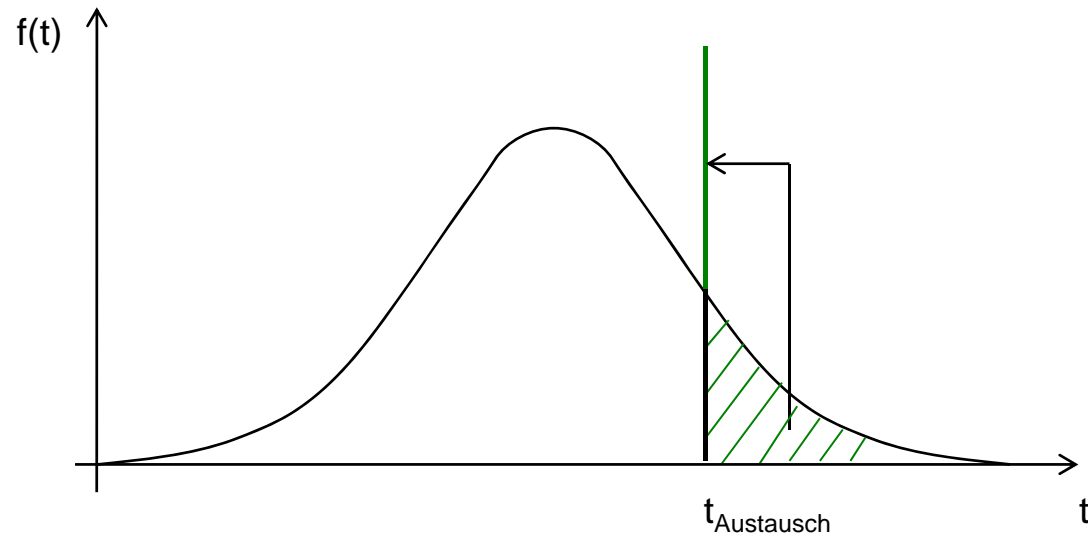
Wartungsmodell, Anwendungsbeispiel



Nach erster Wartung Zeitverschiebung = 5 Jahre,
danach alle 10 Jahre um 6 Jahre vergrößert

Austauschmodell

Nadelförmige Austauschfunktion
(Austausch zu fix vorgegebenen Zeitpunkten)



Die Austauschfunktion begrenzt die Spannweite der Lebensdauerichte

Aufspaltung der Lebensdauer- und Erneuerungsichte in je einen Anteil für Ausfall (I) und Austausch (ex):

$$f(t) = f_l(t) + f_{ex}(t)$$

$$r(t) = r_l(t) + r_{ex}(t)$$

Modellierung der Vorbelastung

Stressfaktor des Betriebsmittels k als Folge einer Fehlereinwirkung durch Betriebsmittel i:

$$S_{i,k}(t) = \sum_{j=beg}^t h_i(j - e_i) \cdot [c_I \cdot I_{i,k}(j) + c_U \cdot U_{i,k}(j)] \cdot sh(t - j)$$

beg	Beginn des Beobachtungszeitraums
t	Ende des Beobachtungszeitraums
$h_i(j - e_i)$	Ausfallhäufigkeit von Betriebsmittel i, welche zum Zeitpunkt j gültig ist.
e_i	Erstinbetriebnahmezeitpunkt des Betriebsmittels i
$I_{i,k}(j)$	Kurzschlussstrom(wirkung) auf Betriebsmittel k als Folge des Fehlers auf Betriebsmittel i zum Zeitpunkt j
$U_{i,k}(j)$	Spannungswirkung auf Betriebsmittel k als Folge des Fehlers auf Betriebsmittel i zum Zeitpunkt j
c_I, c_U	Wichtungsfaktoren für Strom- und Spannungswirkungen
$sh(t - j)$	Selbsteilungsfaktor für Fehler, deren Eintritt zum Zeitpunkt t (t - j) Jahre zurückliegt

Modellierung der Vorbelastung, Stressfaktoren

Gesamter Stressfaktor des Betriebsmittels k als Folge der Fehlerwirkungen aller nb Betriebsmittel des betrachteten Netzes

$$S_k(t) = \sum_{i=1}^{nb} S_{i,k}(t)$$

Stressfaktormatrix:

Ein Element (i,k) der Matrix ist ein Maß für die „Wahrscheinlichkeit“, dass Betriebsmittel k als Folge der im Laufe seiner Einsatzdauer akkumulierten Stresseinwirkungen (S_k) sowie der Wirkung eines auf Betriebsmittel i auftretenden Fehlers ausfällt.

$$Sm_{i,k}(t) = [c_I \cdot I_{i,k}(t) + c_U \cdot U_{i,k}(t)] \cdot S_k(t) \cdot rb_k$$

rb_k Faktor zur Berücksichtigung der Empfindlichkeit des Betriebsmittels bezüglich Fehlerwirkungen, welche von anderen Betriebsmitteln stammen

Ermittlung der Häufigkeit von Mehrfachausfällen

Klassischer Ansatz für abhängige Zweifachausfälle

$$h_{2,i,k} = h_{1,i} \cdot l_k \cdot pe_{i,k} \cdot l_i$$

$h_{1,i}$ Häufigkeit des Auftretens eines Erstereignisses auf Betriebsmittel i

pe_{ik} Bedingte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines weiteren Ereignisses auf Betriebsmittel k

l_i, l_k Längen der Betriebsmittel i und k; 1 bei Betriebsmitteln ohne relevante Längendimension

Ansatz für stressbedingte Zweifachausfälle

$$h_{2,i,k}(t) = ch \cdot Sm_{i,k}(t) \cdot l_i \cdot l_k$$

ch Kalibrierungsfaktor

Ermittlung der Häufigkeit von Mehrfachausfällen

Ermittlung des Kalibrierungsfaktors

Die Summe über die berechneten Häufigkeiten aller möglichen Zweifachausfallereignisse muss die Anzahl der beobachteten Ereignisse ergeben.

Für Jahr i folgt:

$$\sum_{i=1}^{nb} \sum_{k=1}^{nb} h_{2,ik}(t) = ch \cdot \sum_{i=1}^{nb} \sum_{k=1}^{nb} Sm_{i,k}(t) \cdot l_i \cdot l_k = nb_2(t)$$

$nb_2(t)$ Anzahl der beobachteten Zweifachausfälle im Jahr t

$$ch = nb_2(t) / \left[\sum_{i=1}^{nb} \sum_{k=1}^{nb} Sm_{i,k}(t) \cdot l_i \cdot l_k \right]$$

Prognose der Häufigkeit von Mehrfachausfällen

Für Prognosejahr tpr :

$$h_{2,i,k}(tpr) = ch \cdot Sm_{i,k}(tpr) \cdot l_i \cdot l_k$$

Kalibrierungsfaktor ch wird wie oben für das Gegenwartsjahr t ermittelt

Anwendung für Mittelspannungsnetz

Netzdaten

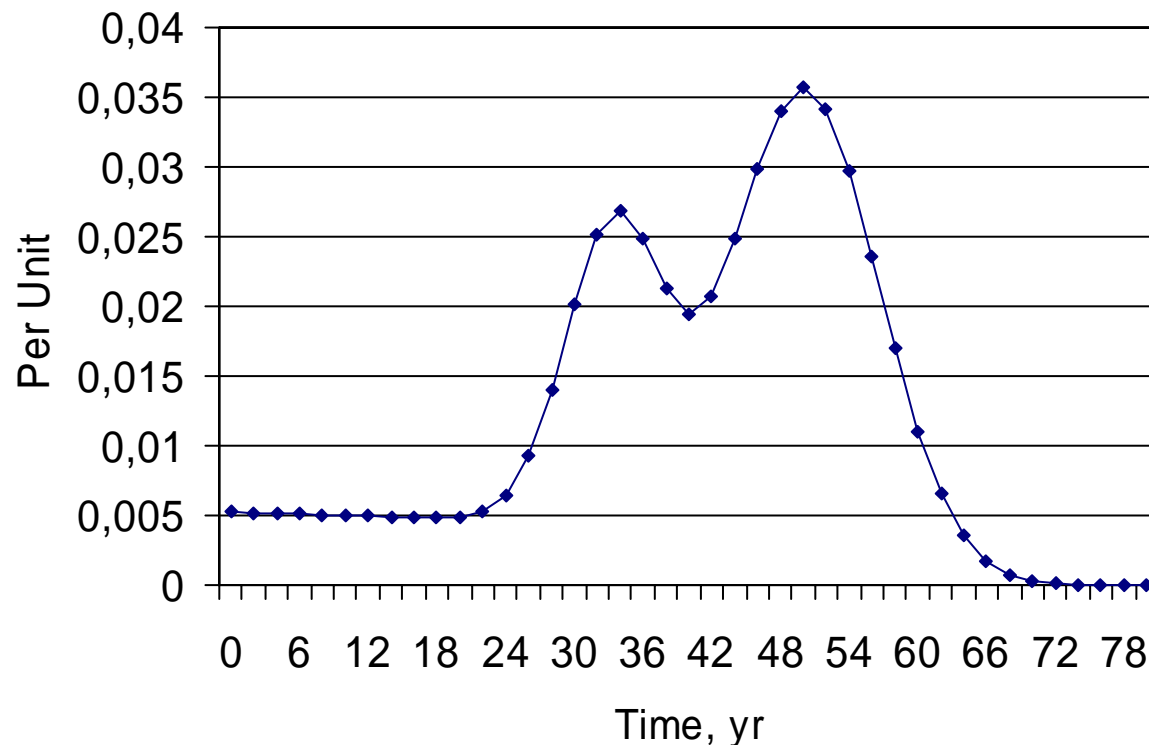
Spannungsebene: 20-kV

Anzahlen: Verbraucher: 40 aufgeteilt auf 4 Ringe, Kabelstrecken: 53,
Knoten: 164, Zweige: 225

Ausfalldaten

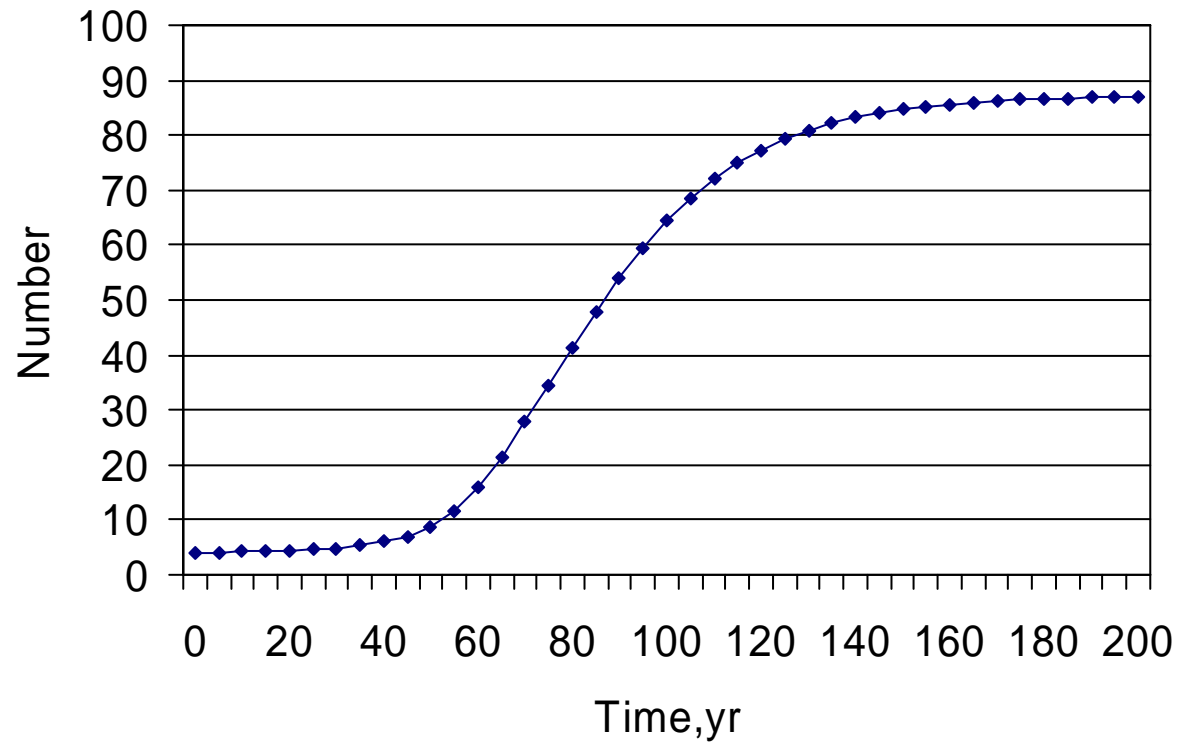
	Ausfallhäufigkeit	Ausfalldauer
20-kV-Kabel	0,027 /km.a	30 h
Mittelspannungs-Innenraum-Sammelschienen	0,001 /Feld.a	10,0 h
GIS-Sammelschienen/Feld	0,0005 /Feld.a	48,0 h
Mittelspannungs-Trenner Innenraum	0,01 /a	25,0 h
Mittelspannungs-Leistungsschalter	0,00259 /a	72,0 h
Mittel-/Niederspannungs-Transformatoren	0,01 /a	24 h
Kabel-Doppelausfälle	0,2 /a	

Lebensdauerdichtefunktion für 20-kV-Kabel mit Berücksichtigung von externen Effekten



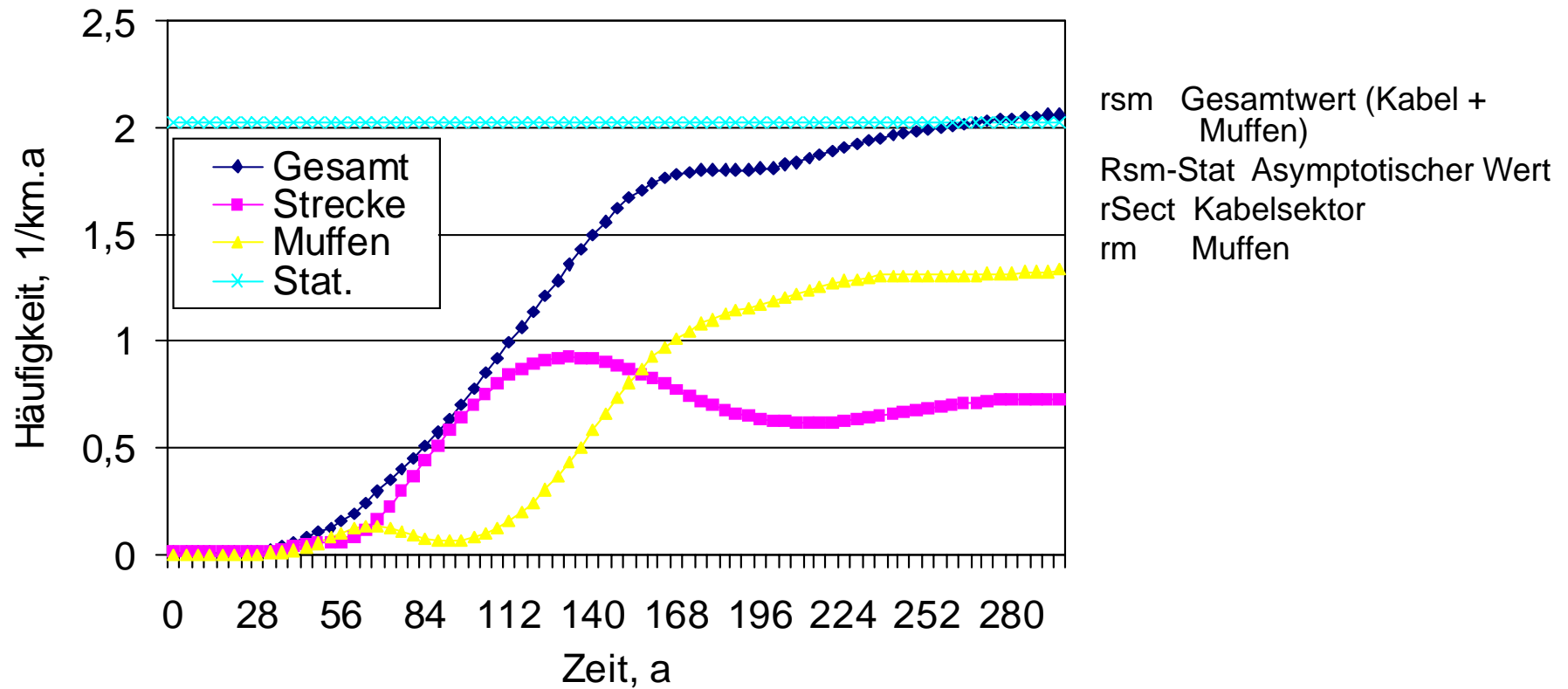
Lebensdauererwartung 40 a, Standardabweichung 14 a
Zusammengesetzt aus 2 Normalverteilungen mit
Erwartungswert/Standardabweichung: 50/6,4 und 33/4,2.
Externe Effekte: Exponentialverteilung mit Ausfallrate 0,008/(km.a)
Muffen: Normalverteilung mit Parametern: 55/11

Zuwachs der Muffenanzahl



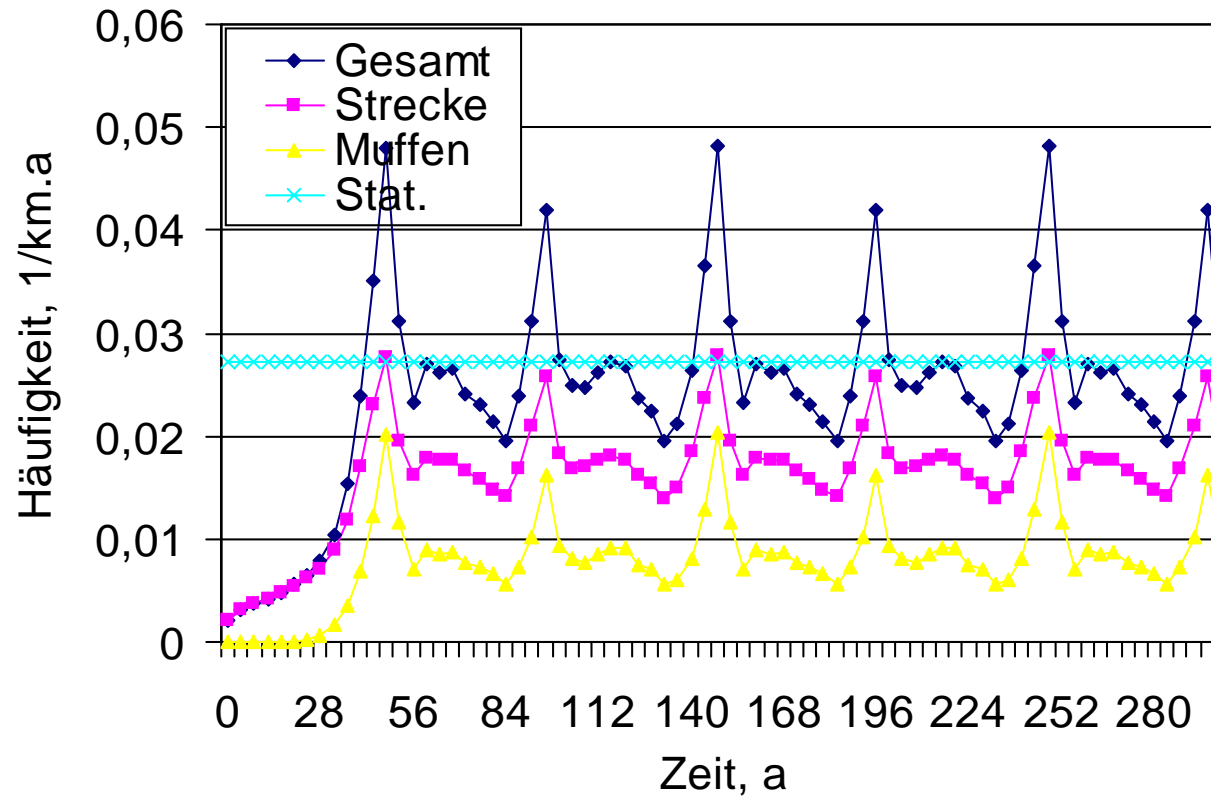
Theoretische Maximalanzahl für Sektionslänge 1km und
Fragmentlänge 10m: 100

Zeitreihen der Ausfallhäufigkeiten von Mittelspannungskabeln, kein geplanter Austausch

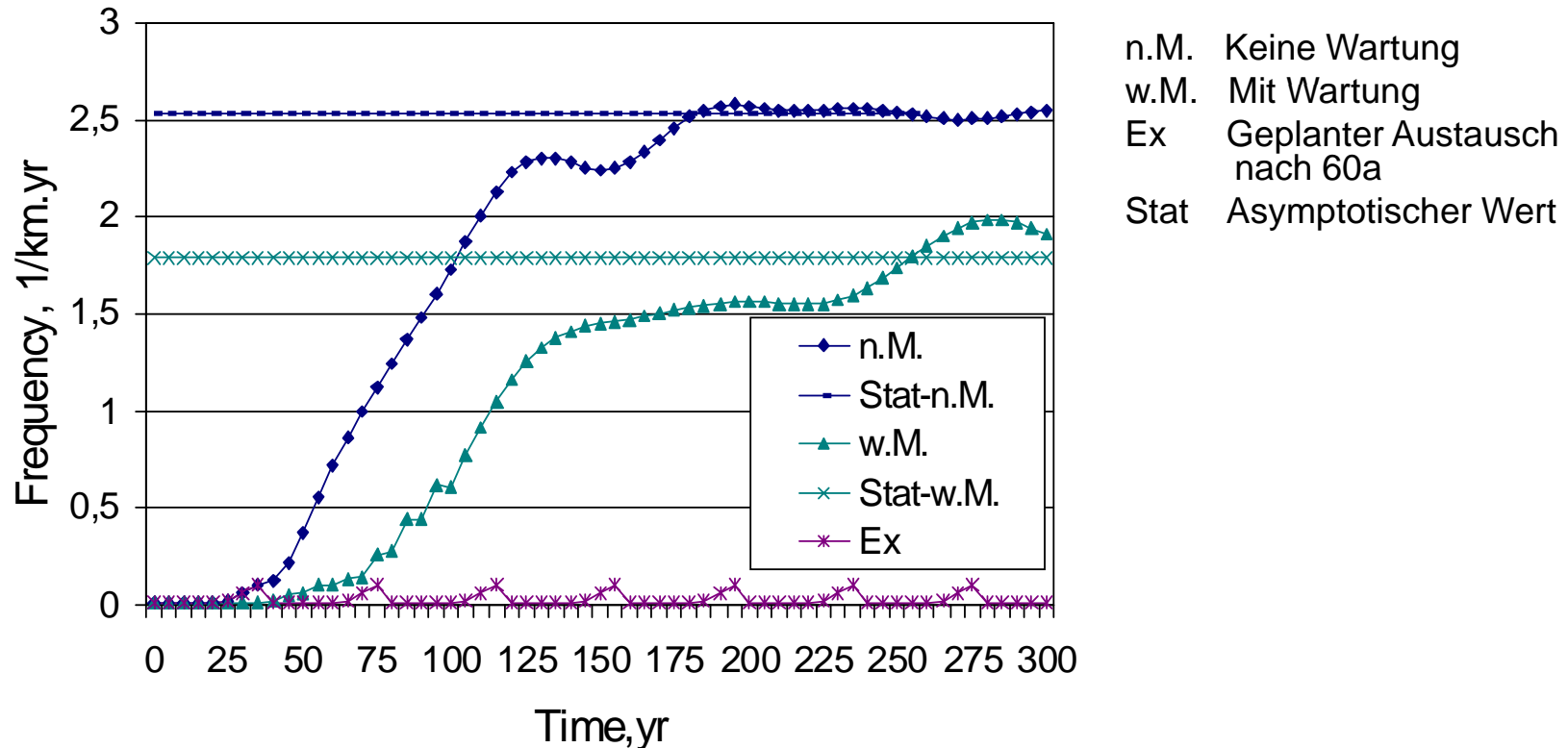


Bei Betriebsdauern von typischerweise 40 - 60 Jahren, stellt die Zunahme der Reparaturmuffenanzahl kein ernsthaftes Problem dar

Zeitreihen der Ausfallhäufigkeiten von Mittelspannungskabeln, geplanter Austausch nach 50 Jahren

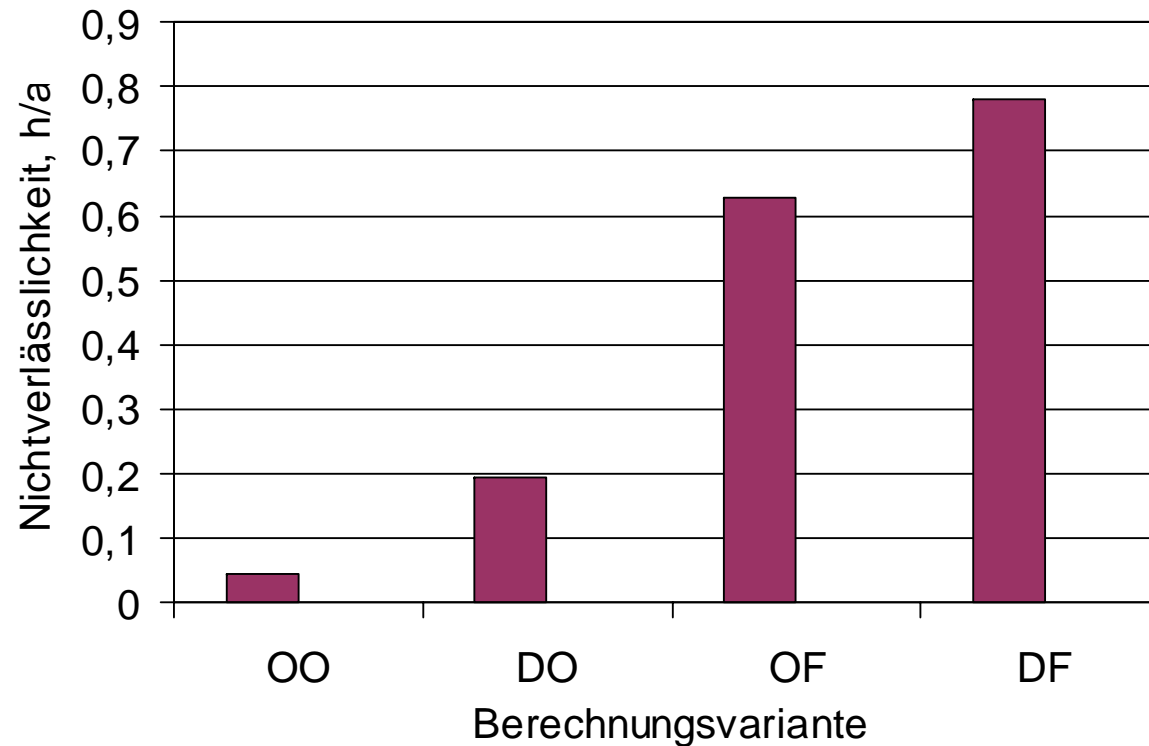


Vergleich der Effekte von Wartung und Austausch anhand der Erneuerungsichte (Kabel)



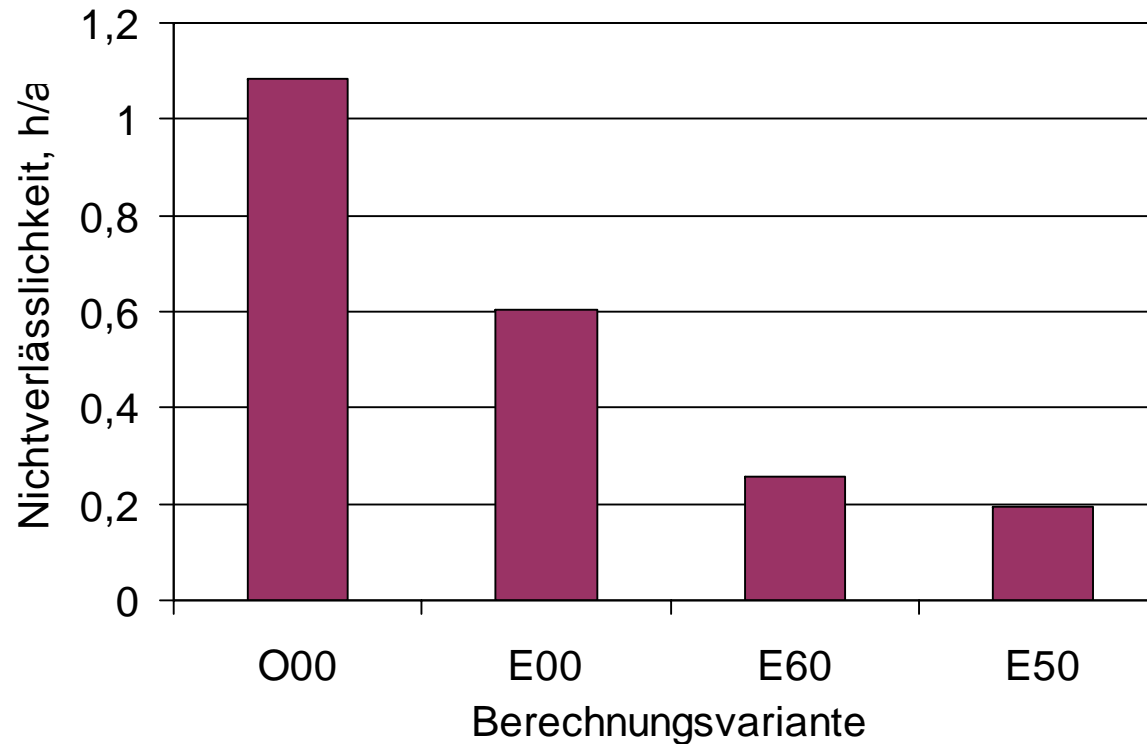
Wartung kann eine beträchtliche Reduktion der Ausfallhäufigkeit bewirken. Rechtzeitiger Austausch der Kabel ist jedoch eine wirksamere Maßnahme zur Verbesserung der Zuverlässigkeit.

Auswirkung stressbedingter Doppelausfälle auf die Energienichtverlässlichkeit eines Mittelspannungsnetzes



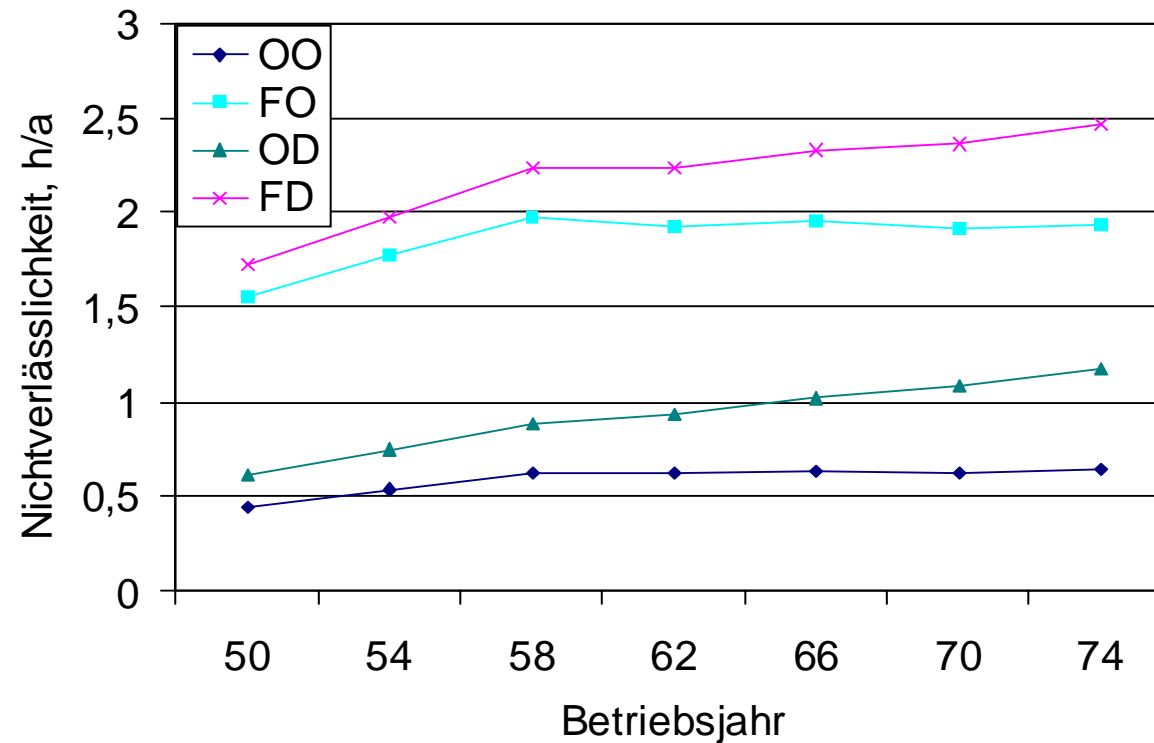
1. Symbol: O: Ohne, D: Mit stressbedingten Doppelausfällen
2. Symbol: O: Ohne, F: Mit Schaltfeldfehlern

Auswirkung von geplantem Austausch auf die Energienichtverlässlichkeit



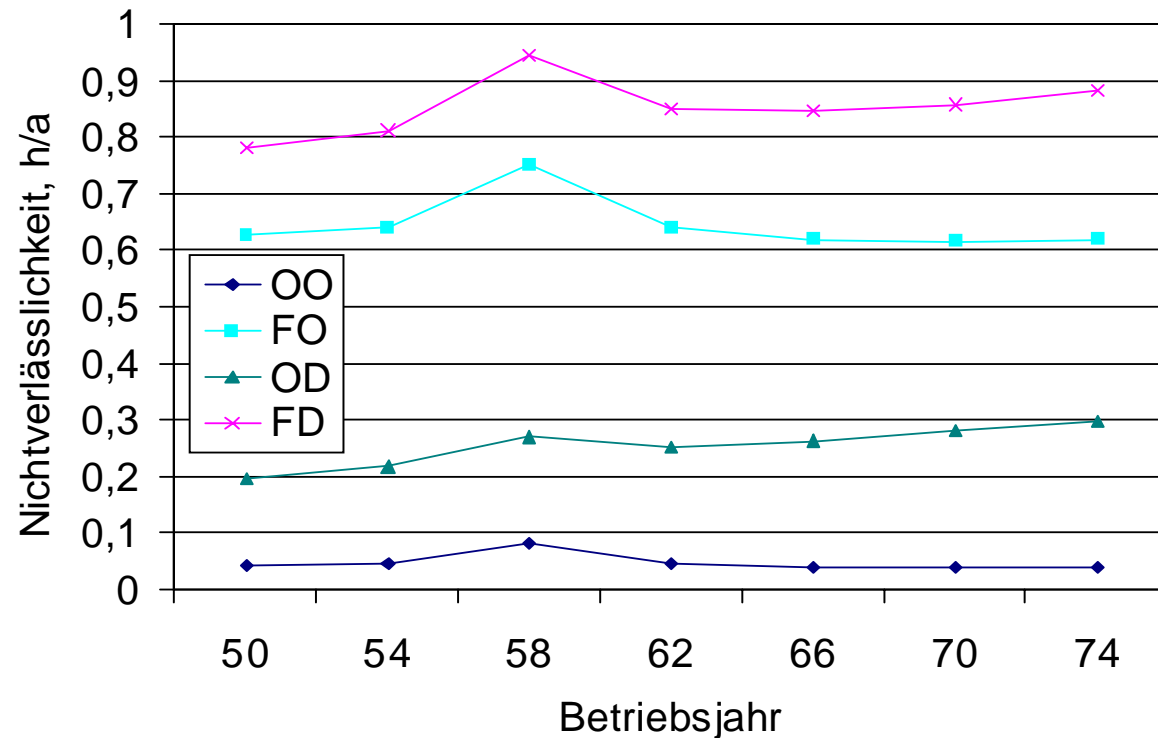
1. Symbol: O: Ohne, E: Mit Errichtungsfunktion
2. Zahl: Austauschzeitpunkt (00: kein geplanter Austausch)

Prognose der Energienichtverlässlichkeit ohne Berücksichtigung von Streckenerneuerungen



1. Symbol: O: Ohne, D: Mit stressbedingten Doppelausfällen
2. Symbol: O: Ohne, F: Mit Schaltfeldfehlern

Prognose der Energienichtverlässlichkeit mit Berücksichtigung von Streckenerneuerungen



1. Symbol: O: Ohne, D: Mit stressbedingten Doppelausfällen
2. Symbol: O: Ohne, F: Mit Schaltfeldfehlern

Schlussfolgerungen

- Die durch Alterung und Stresseinwirkung bedingte Zunahme der Häufigkeit von Einfach- und Mehrfachausfällen kann mit Hilfe entsprechender mathematischer Modelle nachgebildet werden.
- Die präsentierten Verfahren berücksichtigen die Auswirkungen von Instandhaltungsmaßnahmen (Wartung, geplanter Austausch).
- Damit steht ein Instrument zur Prognose der Effekte unterschiedlicher Instandhaltungsstrategien zur Verfügung.
- Die Verfahren basieren auf den um Instandhaltungseffekte bereinigten Lebensdauerverteilungen der Betriebsmittel, deren Ermittlung in der Praxis nicht einfach ist.
- Verzichtet man auf die Modellierung der Wechselwirkung zwischen Instandhaltung und Ausfallhäufigkeit, so werden Lebensdauerverteilungen nicht benötigt.

Schlussfolgerungen - Anwendungen

Die präsentierten Verfahren wurden zur Untersuchung eines realen 20-kV-Kabelnetzes angewandt. Die wichtigsten Resultate lauten:

- Die Ausfallhäufigkeit von Kabeln beginnt nach Überschreiten der Lebensdauererwartungswerte deutlich anzusteigen.
- Der Einfluss der Reparaturmuffenzunahme macht sich in der Zeitreihe der Erneuerungsichte mit einer Zeitverzögerung bemerkbar, welche durch die Summe aus Kabel- und Muffenlebensdauererwartungswert bestimmt wird.
- Bei Einsatzdauern einer Kabelsektion von typischerweise 40 - 60 Jahren, stellt die Zunahme der Reparaturmuffenanzahl kein ernsthaftes Problem dar
- Verzögerte Erneuerung der Betriebsmittel kann zu einem signifikanten Anstieg der Häufigkeiten von Einfach- und Mehrfachausfällen und damit zu einer unakzeptablen Verschlechterung der Versorgungszuverlässigkeit führen.
- Die effektivste Maßnahme, um einer solchen Entwicklung vorzubeugen, ist der rechtzeitige Ersatz gealterter Betriebsmittel. Der Effekt von Wartung erwies sich dagegen als wesentlich geringer.