

Zuverlässigkeits- und Risikoabschätzung von elektrischen Betriebsmitteln

Dr. Christof Sumeder, Prof. Dr. Michael Muhr

Technische Universität Graz
Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement
Inffeldgasse 18, 8010 Graz, nachname@hspt.tu-graz.ac.at

Kurzfassung: Die Zuverlässigkeit von elektrischen Betriebsmitteln ist einerseits vom technischen Zustand und andererseits vom Einsatz und der Belastung abhängig, die Zustandsbewertung nimmt daher eine zentrale Rolle ein. Grundlage der Zustandsbewertung sind die Ergebnisse der technischen Diagnostik, Betriebsmitteldaten und der Grad der Auslastung. Für einen sicheren Betrieb ist neben der Zuverlässigkeit auch das Risiko abzuschätzen. Der Begriff Risiko kann unterteilt werden in technisches, wirtschaftliches und rechtliches Risiko. Um die Zuverlässigkeit und das Risiko abzuschätzen können statistische Berechnungsmethoden eingesetzt werden. Grundlage dazu ist die Kenntnis über die Ausfallwahrscheinlichkeit, die aus Fehlerstatistiken oder praktischen Versuchsdurchführungen gewonnen werden kann. Unter Anwendung von Alterungs- und Lebensdauermodellen ist eine Abschätzung der Restlebensdauer möglich, wobei zwischen verschiedenen Belastungsarten sowie einfach- und multistress Alterung unterschieden wird.

Keywords: Ausfall, Bewertung, Lebensdauer, Risiko, Zustand, Zuverlässigkeit

1. Einleitung

Der sichere Betrieb von elektrischen Betriebsmitteln mit den Aspekten einer hohen Zuverlässigkeit und Effizienz, einer niedrigen Ausfallwahrscheinlichkeit sowie geringen Instandhaltungskosten wird durch den Gerätezustand entscheidend geprägt. Bei der Betrachtung von Fehlerstatistiken kann eine sehr prägnante Aussage getätigt werden, der Fehleranteil des elektrischen Isolationssystems nimmt einen nicht zu vernachlässigenden Anteil ein. Der Betriebsmittelzustand und die Zuverlässigkeit von elektrischen Isolationssystemen werden in entscheidendem Maße durch das Alterungsverhalten beschrieben. Der allgemein formulierte Begriff „Alterung“ wird in einer unlängst veröffentlichten Norm [1] erneut definiert und beschreibt die Veränderung bzw. den Einfluss von einem oder mehreren Belastungsfaktoren auf die Betriebsmittel. Alterung wird demgemäß entweder intrinsische oder extrinsische Phänomene verursacht, wobei zumeist die äußeren Einwirkungen die dominante Rolle einnehmen. Belastungen, die Alterung verursachen, werden durch die so genannte TEAM- Belastungsarten unterteilt werden. TEAM ist eine Abkürzung, die für thermisch, elektrisch, umwelt (ambient) und mechanisch steht. Auch die elektrische Alterung kann den extrinsischen Phänomenen zugeordnet werden, da sie zumeist in Verbindung mit erhöhte Feldstärken an Inhomogenitäten stehen. In Abhängigkeit der Belastungsstärke und deren Zusammenwirken ist das elektrische Isolationssystem diesen Belastungen ausgesetzt. Die beschriebenen Alterungsmechanismen verursachen eine Abnahme des Betriebsmittelzustandes, wobei definitionsgemäß zwischen der so genannten „Degradation“, bei der eine temporäre Verschlechterung des Zustandes zu verstehen ist und der „Deterioration“, die wiederum eine permanente Veränderung impliziert, unterschieden wird.

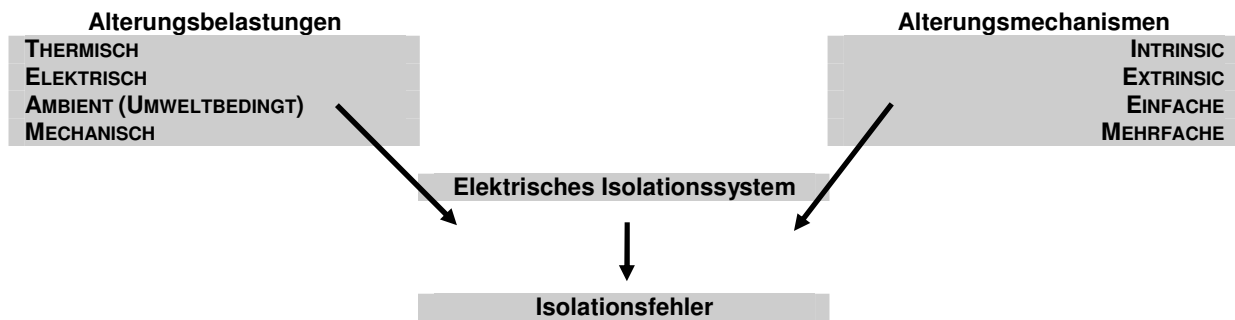


Abbildung 1: Alterungsverhalten von elektrischen Isolationssystemen

Die Geschwindigkeit der Alterung hängt wie in Abbildung 1 dargestellt von unterschiedlichen Faktoren ab. Die Belastungsarten (TEAM) stehen den Belastungsmechanismen gegenüber, wobei diese wiederum einfachen oder mehrfachen Ursprungs sein können. Es wurden verschiedene Modelle für die Bewertung des Zustandes und die Bestimmung der Restlebensdauer von Betriebsmitteln entworfen, einen möglichen Ansatz für die systematische Vorgangsweise zur Zustands- und Lebensdauerfeststellung wird in folgendem Ablaufdiagramm der Abbildung 2 dargestellt. Der Zustand elektrischer Isolationssysteme ist unter Berücksichtigung der Betriebs- und Maschinendaten, der Ergebnisse der technischen Diagnostik und Instandhaltung, der Einschätzung des Betriebspersonals, eventueller technischer Untersuchungen sowie der Eigenschaften des elektrischen Isolationssystems zu bestimmen. Unter Berücksichtigung von elektrischen Festigkeitstests und Ausfallsstatistiken sollte eine Abgrenzung der Restlebensdauer möglich sein. Aufgrund dieser vorliegenden Informationen kann eine Risikoanalyse gemacht werden, wobei neben dem technischen Risiko auch das wirtschaftliche und juristische Risiko Berücksichtigung finden sollte. Unter Zuhilfenahme dieser Aspekte sollte eine Entscheidungshilfe über den weiteren Betrieb oder die Erneuerung von Betriebsmitteln oder Komponenten gefällt werden können.

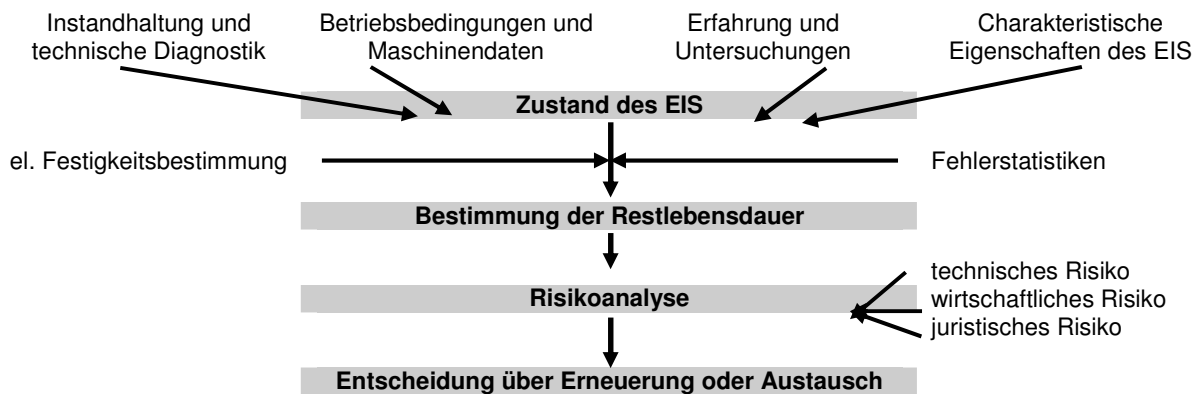


Abbildung 2: Bestimmung der Restlebensdauer und Risikoabschätzung

2. Alterung und Lebensdauermodelle

2.1 Elektrische Alterung

Jedes Betriebsmittel unterliegt im normalen Betrieb verschiedenen Belastungsarten, wofür jeweilig geeignete mathematische Modelle entwickelt wurden. Beispielsweise wird für die elektrische Belastung ein Alterungsgesetz angewendet, welches die physikalischen Phänomene von Teilentladungen, Kriechströmen, Treeing, Elektrolyse, Grenzflächenerscheinungen, Temperaturerhöhung infolge dielektrischer Verluste und Raumladungen einschließt. Es handelt sich dabei um einen empirisch gefundenen Zusammenhang, der diese Alterungsvorgänge in engen Grenzen beschreibt. Das so

genannte Modell des negativen Exponenten (Inverse Power Law) wird zumeist für den Zusammenhang zwischen elektrischer Belastung und Lebensdauer herangezogen. Die Lebensdauer kann als Geradengleichung in Abhängigkeit der elektrischen Feldstärke in einem doppelt logarithmischen Maßstab dargestellt werden, oder anders ausgedrückt als Potenzfunktion im linearen Maßstab. Die Steigung der Geraden bestimmt dabei die Geschwindigkeit der Alterungsmechanismen.

$$L \approx E^{-nt} \quad (1)$$

| | |
|---|----------------------------|
| L | ... Lebensdauer |
| E | ... elektrische Feldstärke |
| t | ... Zeit |
| n | ... Lebensdauerexponent |

2.2 Thermische Alterung

Ein weiterer wichtiger Zusammenhang ist durch die Abhängigkeit des Betriebsmittelzustandes von der Temperatur gegeben, der durch die Vorgänge der thermischen Alterung bestimmt wird. Die thermische Alterung wird durch die Vorgänge fortschreitender chemischer und physikalischer Veränderung infolge Abbaureaktionen, Polymerisation, Depolymerisation, Diffusion sowie thermomechanischer Wirkungen durch Kräfte infolge thermischer Expansion und/oder Kontraktion hervorgerufen. Für die mathematische Formulierung der thermischen Alterung kann die Arrhenius Gleichung herangezogen werden. Die Arrhenius Gleichung kann so interpretiert werden, dass chemische Prozesse in gleich bleibenden Zeitintervallen in selben Prozentsätzen ablaufen. Diese Gesetzmäßigkeit impliziert eine exponentielle Alterungsgeschwindigkeit, d.h. eine Geradengleichung in einfachlogarithmischer Darstellung.

$$L \approx A \cdot e^{(-E/kt)} \quad (2)$$

| | |
|---|-----------------------------|
| L | ... Lebensdauer |
| A | ... Konstante |
| E | ... Aktivierungsenergie |
| k | ... Boltzmann Konstante |
| t | ... Absolute Temperatur [K] |

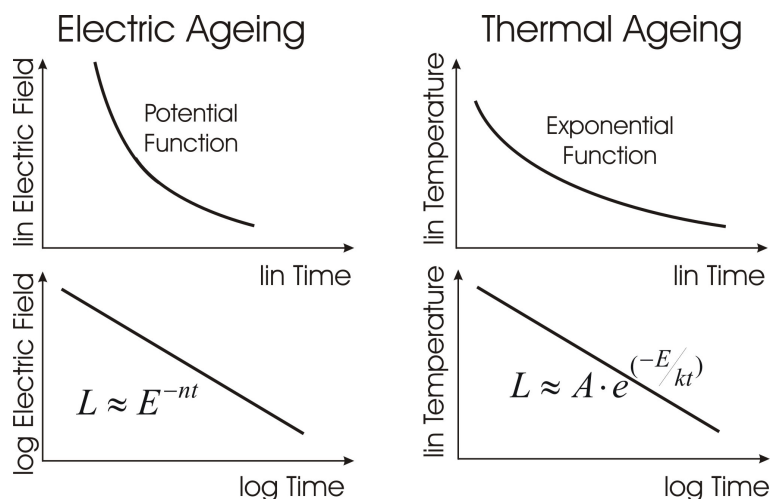


Abbildung 3: Inverse Power Law und Arrhenius Gesetz

Die graphische Darstellung der zuvor erläuterten Alterungsmodelle ist in Abbildung 3 graphisch in unterschiedlichen Maßstäben dargestellt. Ebenso wie für die elektrische und thermische Alterung wurden für andere Alterungsmechanismen Modelle entworfen, die an dieser Stelle nicht näher diskutiert werden sollen. Für die Anwendung von Lebensdauermodellen zur Bestimmung der Restlebensdauer ist es zumeist erforderlich einen Grenzwert, ab/bis zu dem die beschriebenen Mechanismen wirken, einzuführen. Dieses Erfordernis kann durch ein einfaches Beispiel erklärt werden: Teilentladungen treten erst ab einer gewissen Einsatzfeldstärke auf, ab der die Alterungsgeschwindigkeit entscheidend beeinflusst wird, unterhalb der Einsatzfeldstärke würde so gut wie keine elektrische Alterung feststellbar sein. Das Inverse Power Law ist daher nur innerhalb gewisser Grenzen gültig, es sollte daher ein Grenzwert und ein Toleranzband definiert werden innerhalb dessen das beschriebene Modell Gültigkeit besitzt.

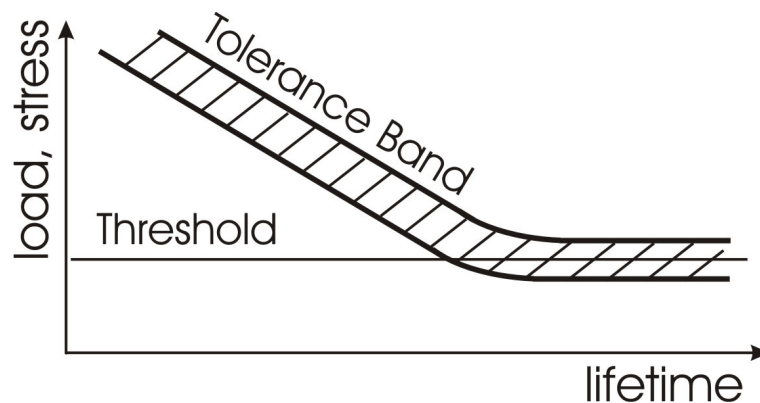


Abbildung 4: Lebensdauermodell, Grenzwert und Toleranzband

2.3 Multistress Alterung

Multistress Alterung bedeutet eine Belastung eines Betriebsmittels mit mehreren gleichzeitig auftretenden Einflussfaktoren. Die Erfahrung hat gezeigt, dass der Grad und die Rate der Alterung, insbesondere der des Isoliersystems, sowohl von den chemischen und den physikalischen Eigenschaften als auch von den Charakteren der auftretenden Belastungen sowie von dem Erzeugungsprozess und der Kombination der verwendeten Materialien und der vorliegenden Belastung abhängen. Für eine Abschätzung der Lebensdauer von Betriebsmitteln und Isoliermaterialien werden Alterungsversuche durchgeführt, die neben der elektrischen gleichzeitig thermische und in manchen Fällen auch mechanische Beanspruchungen einwirken lassen. In den meisten Fällen führen die Wechselwirkungen zwischen einzelnen Einflussfaktoren zu einem beschleunigten Fortschreiten der Alterung.

Zur Bewertung von Alterungsversuchen mit Multistressbelastung, müssen Gesichtspunkte wie folgend aufgeführt berücksichtigt werden:

- Materialart und Geschichte der Probenvorbereitung,
- Dauer und Häufigkeit der auferlegten Belastung,
- Art und Stärke der von den Belastungen hervorgerufenen Alterung,
- Wechselseitige Veränderungen von Eigenschaften,
- Betriebsmittelart, Betriebsmittelkonstruktion und Betriebsbedingungen,

- konkurrierende und kooperierende Einflüsse von chemischen und physikalischen Prozessen während Belastungen,
- Grenzflächen- und Volumeneffekte,
- Mikroskopische und Makroskopische Phänomene

Erst durch diese näher gehenden Betrachtungen können Modelle und Zusammenhänge zwischen der resultierenden Alterung und den Einflussfaktoren gebildet werden.

3. Bestimmung der Restlebensdauer

Für die Bestimmung der Restlebensdauer ist die maximal zu erwartende Lebensdauer abzuschätzen, wobei vorhandenen Erfahrungswerte oder Fehlerstatistiken zu Hilfe genommen werden können. Eine wesentliche Einflussgröße auf die Lebensdauer ist der Belastungsgrad der Betriebsmittel. In Abhängigkeit der mittleren Geräteauslastung variiert die zu erwartende Lebensdauer, je höher die Belastung, umso kürzer rascher schreitet die Alterung voran. Beispielsweise hat Montsinger einen Zusammenhang für die Alterung von Papier-Öl Isoliersysteme nachgewiesen, die Lebensdauer nimmt bei einer Erhöhung der durchschnittlichen Betriebsmitteltemperatur um 8 Grad oberhalb der höchst zulässigen Betriebsmitteltemperatur um die Hälfte ab (8 K Formel). Die so genannte technische Lebensdauer wird zumeist mittels statistischen Methoden, Fehlerstatistiken und Erfahrungswerten ermittelt. Die Restlebensdauer ist durch die Differenz des aktuellen Betriebsmittelalters von der zu erwartenden Lebensdauer gegeben, Abbildung 5 zeigt die Zusammenhänge der Restlebensdauer in Abhängigkeit von der Betriebsmittelbelastung.

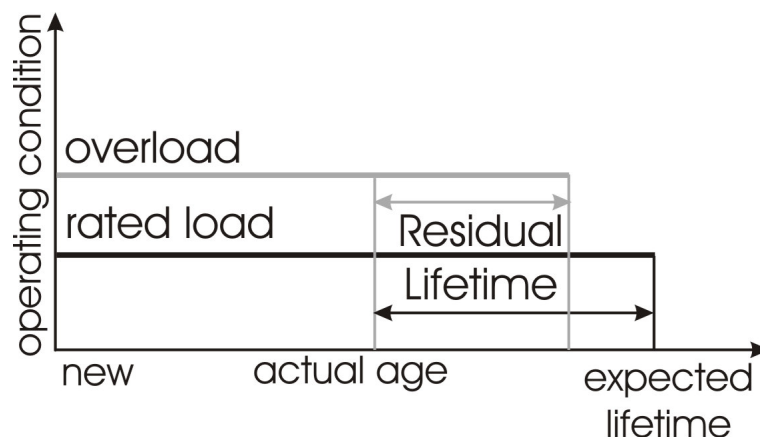


Abbildung 5: Bestimmung der Restlebensdauer

4. Lebensdauer kennlinien

Die zuvor erläuterten Zusammenhänge zwischen Belastung und Alterung können mittels so genannten Lebensdauer kennlinien ausgedrückt werden. Um eine Lebensdauer kennlinie zu ermitteln sind praktische Untersuchungen erforderlich. Der Ablauf dieser Untersuchungen erfolgt mittels Lebensdauer tests an entsprechend vielen Prüflingen. Zur Konstruktion einer Lebensdauer kennlinie sind zumindest zwei Prüfpegel erforderlich, wobei die Prüfpegel so zu wählen sind, dass die Testdauer ein repräsentatives Ergebnis liefert. Die Prüfpegel dürfen weder zu hoch noch zu niedrig angesetzt sein, im Normalfall wird zu Beginn zur Abschätzung der Prüfpegel eine Spannungssteigerungsprüfung durchgeführt. Die Abbildung 6 zeigt die Auswertung eines Lebensdauer tests in Form der zweiparametrischen Weibullverteilung. Die jeweilige mittlere elektrische Festigkeit wird anhand der

charakteristische Lebensdauer (63% Quantil) berechnet und unterhalb gibt einen Punkt in der Lebensdauerkennlinie. Die Auswertung mittels Weibullverteilung ermöglicht die Erkennung von Frühausfällen, der Weibullexponent bzw. Formfaktor (Geradensteigung der Kennlinie) sollte über 1 liegen.

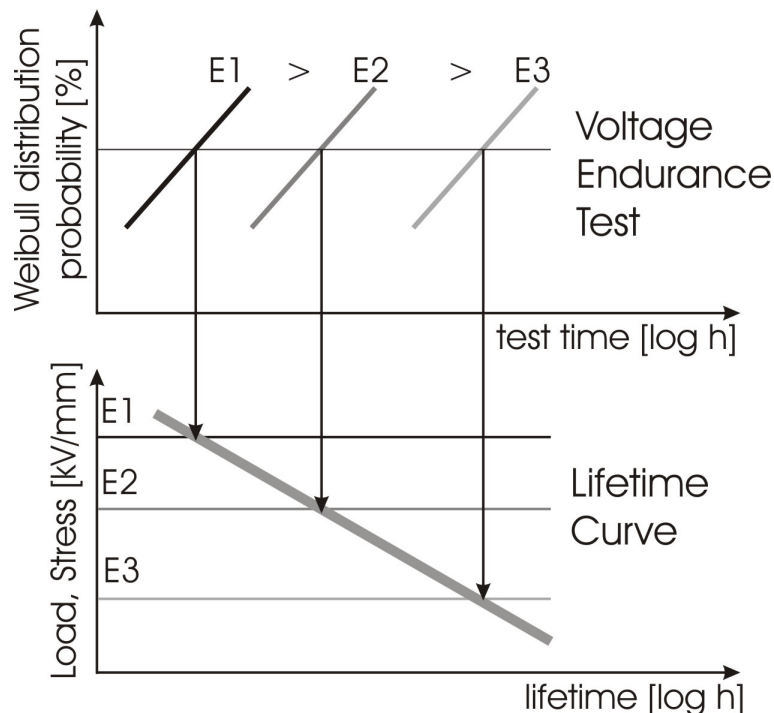


Abbildung 6: Bestimmung der Lebensdauerkennlinie

Bei der Prüfung von gealterten Betriebsmitteln sind naturgemäß Frühausfälle gegeben, die Lebensdauerkennlinie lässt sich nicht in so engen Grenzen ermitteln, wie dies bei neuen Geräten möglich ist. Durch die Betriebsbelastung unterliegt das betrachtete Isoliermedium einer Alterung, die die Restfestigkeit herabsetzt und im Extremfall zu Frühausfällen führt. Die Festigkeit eines realen Isolationssystems wird durch den schwächsten Punkt bestimmt, wodurch die Lebensdauer von gealterten Betriebsmitteln herabgesetzt wird. Durch dieses Verhalten ist die Aussagekraft in weiteren Grenzen anzugeben und daher wird die Lebensdauerkennlinie in einem breiteren Zuverlässigkeitsbereich liegen, siehe Abbildung 7.

Bei höheren Prüfpegeln kommt es naturgemäß verstärkt zu Frühausfällen, wodurch die Weibullgerade flacher verläuft, die Streuung der Messwerte nimmt daher zu. Bei niedrigeren Prüfpegeln werden sich die Schwachstellen nicht in selbigem Maß auswirken, die Steigung wird daher ähnlich steil verlaufen als wären keine Frühausfälle vorhanden. Der Vertrauensbereich der Lebensdauerkennlinie wird daher bei höheren Feldstärken geringer sein, bzw. die Aussagekraft nicht so hoch sein.

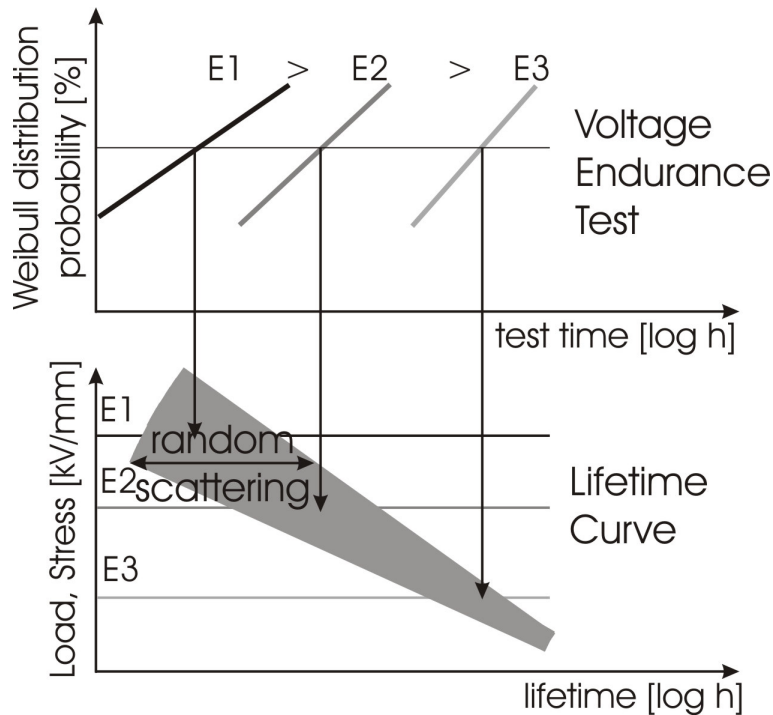


Abbildung 7: Zuverlässigkeitsbereich von Lebensdauer kennlinien

5. Risikoabschätzung

Risiko im technischen Sinne wird durch das Produkt von der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses und der daraus resultierenden Schadenshöhe definiert [2]. Dabei entspricht der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses die Ausfallswahrscheinlichkeit, die aus Fehlerstatistiken oder praktischen Versuchsdurchführungen gewonnen werden kann. Die Ausfallswahrscheinlichkeit $F(t)$ von elektrischen Betriebsmitteln hängt unmittelbar mit der Zuverlässigkeit $R(t)$ der verknüpft. Der formelle Zusammenhang ist in Gleichung 1 wiedergegeben.

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (1)$$

Die Ausfallswahrscheinlichkeit ist eine zeitlich veränderliche Größe und berücksichtigt neben den zufällig auftretenden Fehlern auch die Alterung der Betriebsmittel durch die permanente Belastung. Auch der resultierende Schaden ist eine Funktion der Zeit, da die Schadenshöhe von Eintrittszeitpunkt mit bestimmt wird. Wird die Schadenshöhe als zeitkonstant betrachtet, so ist das technische Risiko direkt von der Ausfallswahrscheinlichkeit abhängig. Das technische Risiko $\Gamma(t)$ wird durch Ausfallswahrscheinlichkeit $F(t)$ und Schadenshöhe $H(t)$ gemäß Gleichung 2 bestimmt.

$$\Gamma(t) = F(t) \cdot H(t) \quad (2)$$

Das wirtschaftliche Risiko berücksichtigt sämtliche finanziellen unmittelbaren und mittelbaren Aufwendungen, die mit einem Schadensereignis verbunden sind. Nicht immer kann ein Schaden quantifiziert werden, bedenkt man Umweltschäden, den Verlust von Kulturgütern oder sogar Menschenleben. Das juristische Risiko beinhaltet die Verpflichtungen durch gesetzliche Auflagen oder privatrechtliche Verträge, welche wiederum in Schadenshöhen formuliert werden können.

Zumeist wird für eine Risikoabschätzung die Ausfallwahrscheinlichkeit des betrachteten Betriebsmittels unter den Aspekten des technischen Zustandes, des Alters und Belastungsgrades sowie der Verfügbarkeit von Ersatz verstanden. Im Falle eines hohen technischen Risikos gilt die Entscheidung zwischen Weiterbetrieb oder Ersatz zu treffen, wobei hierfür erst in zweiter Linie die Kriterien des wirtschaftlichen und rechtlichen Risikos Bedeutung erlangen.

Zusammenfassung

Die mathematische Formulierung von Alterungsprozessen ermöglicht eine Abschätzung der Zuverlässigkeit und davon abgeleitet kann das technische Risiko bestimmt werden. Als Grundlage dient die Ausfallwahrscheinlichkeit von Betriebsmitteln, die entweder durch Fehlerstatistiken oder durch Versuche gewonnen werden kann. Unter Zuhilfenahme von Alterungsmodellen ist eine Abschätzung der Restlebensdauer möglich, wobei die Auslastung der Betriebsmittel eine zentrale Rolle einnimmt. Eine Möglichkeit Lebensdauerkurven zu ermitteln ist die statistische Auswertung von Versuchen mit kontinuierlicher Belastung mittels Weibullverteilung. Für das Alterungsverhalten einzelner Belastungsfaktoren existieren sehr gute Modelle, bei multistress Belastung sind jedoch komplexen Zusammenhänge gegeben, die nur schwer beschreibbar sind.

Literatur

[1] IEC 60505: Evaluation and Qualification of Electrical EISS

[2] B. Körbler, Zustandsbewertung von elektrischen Betriebsmitteln in der Energietechnik, Dissertation, 2004, TU Graz