

	Bewertung und Kennzeichnung von elektrischen Isoliersystemen (IEC 60505:1999) Deutsche Fassung EN 60505:2000	DIN EN 60505
VDE	Diese Norm ist zugleich eine VDE-Bestimmung im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Vorstand beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter nebenstehenden Nummern in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der etz Elektrotechnische Zeitschrift bekannt gegeben worden.	Klassifikation VDE 0302 Teil 1
Diese Norm enthält die deutsche Übersetzung der Internationalen Norm IEC 60505		
ICS 29.080.30 Evaluation and qualification of electrical insulation systems (IEC 60505:1999); German version EN 60505:2000 Evaluation et qualification des systèmes d'isolation électrique (CEI 60505:1999); Version allemande EN 60505:2000 Die Europäische Norm EN 60505:2000 hat den Status einer Deutschen Norm. Beginn der Gültigkeit Die EN 60505 wurde am 2000-01-01 angenommen. Ersatz für DIN VDE 0302-1 (VDE 0302 Teil 1):1986-09 Fortsetzung Seite 2 und 33 Seiten EN Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE (DKE)		

Nationales Vorwort

Für die vorliegende Norm ist das nationale Arbeitsgremium K 183 „Elektrische Isoliersysteme (EIS)“ der Deutschen Elektrotechnischen Kommission im DIN und VDE (DKE) zuständig.

Norm-Inhalt war veröffentlicht als E DIN IEC 98/67/CDV (VDE 0302 Teil 1):1998-12.

Änderungen

Gegenüber **DIN VDE 0302-1 (VDE 0302 Teil 1):1986-09** wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- Die internationalen Festlegungen der IEC 60505:1999 wurden unverändert übernommen.
- Der ursprüngliche Inhalt wurde grundlegend überarbeitet und gestrafft.

Frühere Ausgaben

DIN VDE 0302-1 (VDE 0302 Teil 1):1986-09

Nationaler Anhang NA (informativ)

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

Der Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ist nachstehend wiedergegeben. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Norm waren die angegebenen Ausgaben gültig.

IEC hat 1997 die Benummerung der IEC-Publikationen geändert. Zu den bisher verwendeten Normnummern wird jeweils 60000 addiert. So ist zum Beispiel aus IEC 68 nun IEC 60068 geworden.

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
Reihe EN 60216	Reihe IEC 60216	Reihe DIN EN 60216 (VDE 0304)	Reihe VDE 0304
–	IEC 60216-3	–	–
–	IEC 60493-1:1974	–	–
–	IEC 60727-1:1982	DIN VDE 0302-4 (VDE 0302 Teil 4):1988-06	VDE 0302 Teil 4
–	IEC 60727-2:1993	–	–
–	IEC 61356:1995	–	–

Literaturhinweise

DIN VDE 0302-4 (VDE 0302 Teil 4), *Isoliersysteme elektrischer Betriebsmittel – Elektrische Lebensdauer – Allgemeines Bewertungsverfahren; Identisch mit IEC 60727-1:1982 (Report).*

EUROPÄISCHE NORM
EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE

EN 60505

Januar 2000

ICS 29.080.30

Deutsche Fassung

Bewertung und Kennzeichnung von elektrischen Isoliersystemen
(IEC 60505:1999)

Evaluation and qualification of electrical
insulation systems
(IEC 60505:1999)

Evaluation et qualification des systèmes
d'isolation électrique
(CEI 60505:1999)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 2000-01-01 angenommen.

Die CENELEC-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist.

Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Zentralsekretariat oder bei jedem CENELEC-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CENELEC-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Zentralsekretariat mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CENELEC-Mitglieder sind die nationalen elektrotechnischen Komitees von Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Luxemburg, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweden, der Schweiz, Spanien, der Tschechischen Republik und dem Vereinigten Königreich.

CENELEC

Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung
European Committee for Electrotechnical Standardization
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

Zentralsekretariat: rue de Stassart 35, B-1050 Brüssel

Vorwort

Der Text des Schriftstücks 98/85/FDIS, zukünftige 2. Ausgabe von IEC 60505, ausgearbeitet von dem IEC TC 98 „Electrical insulation systems (EIS)“, wurde der IEC-CENELEC Parallelen Abstimmung unterworfen und von CENELEC am 2000-01-01 als EN 60505 angenommen.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem die EN auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss (dop): 2000-10-01
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die der EN entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2003-01-01

Anhänge, die als „normativ“ bezeichnet sind, gehören zum Norminhalt.

Anhänge, die als „informativ“ bezeichnet sind, enthalten nur Informationen.

In dieser Norm ist Anhang ZA normativ und sind die Anhänge A und B informativ.

Der Anhang ZA wurde von CENELEC hinzugefügt.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 60505:1999 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm angenommen.

In der offiziellen Fassung ist unter „Literaturhinweise“ zu der aufgelisteten Norm die nachstehende Anmerkung einzutragen:

IEC 60085 ANMERKUNG Harmonisiert als HD 566 S1:1990 (nicht modifiziert).

Inhalt

	Seite
Einleitung	4
1 Anwendungsbereich	4
2 Normative Verweisungen	4
3 Begriffe und Definitionen	5
3.1 Allgemeine Begriffe	5
3.2 Begriffe mit Bezug zu Betriebsbeanspruchungen und Alterung	5
3.3 Begriffe mit Bezug zur Prüfung	6
4 Alterung – Allgemeines	7
5 Entwurf von Bewertungsverfahren	10
5.1 Bausteine zum Entwurf von Bewertungsverfahren	10
5.2 Gültigkeit vorhandener Bewertungsverfahren	11
6 Funktionsbewertungsverfahren zur Kennzeichnung von EIS	11
6.1 Allgemeine Überlegungen	11
6.2 Drei Arten von Bewertungsverfahren	11
6.3 Praktische Erwägungen	12
7 Funktionale Alterungsprüfungen	13
7.1 Prüflinge	13
7.2 Prüfbedingungen	14
7.3 Bestimmung der EIS-Lebensdauer	14
8 Alterung	15
8.1 Allgemeines	15
8.2 Die Ermittlung von Alterungsmechanismen	15
8.3 Beschleunigte Alterung	15
8.4 Höhe der Beanspruchungen	17
8.5 Dauer und Anzahl der Unterzyklen	17
8.6 Alterungsunterzyklus	18
9 Konditionierung vor der Diagnose	18
10 Diagnosen	18
10.1 Diagnoseprüfungen – Schlusskriterien	18
10.2 Besondere zusätzliche Prüfungen	19
11 Auswertung der Daten	19
11.1 Allgemeines	19
11.2 Betriebserfahrungen	19
11.3 Elektrische Daten	19
11.4 Thermische Daten	19
11.5 Mechanische Daten	19
11.6 Umgebungsdaten	19
11.7 Mehrfaktorendaten	19
12 Prüfbericht	19
13 Schlüssel zur EIS-Kennzeichnung	20
Anhang A (informativ) Kontrolllisten	21
Anhang B (informativ) Flussdiagramme	24
Literaturverzeichnis	32
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen	33

Einleitung

Die betriebliche Lebensdauer elektrischer Ausrüstungen ist in vielen Fällen durch die Lebensdauer ihrer elektrischen Isoliersysteme (EIS) bestimmt. Die Lebensdauer eines EIS kann durch thermische, elektrische, umweltbedingte und mechanische Beanspruchungen beeinflusst werden, die einzeln oder kombiniert einwirken.

Beabsichtigte, geschätzte oder erwiesene Betriebslebensdauern sind wesentliche Kennwerte zur Beschreibung der Lebensdauer von elektrischen Isoliersystemen. In den frühen Tagen der Elektrotechnik waren Lebensdauerzahlenwerte sehr unbestimmt. Die begrenzte Lebensdauer der Isolierung unter thermischer Beanspruchung war einer der ersten Hinweise für den Vorgang der Alterung im Betrieb. Mit zunehmender Erfahrung wurde die Notwendigkeit erkannt, unter den Materialien, die für die Herstellungsverfahren zur Verfügung standen, besonders geeignete auszuwählen, um die geforderte Betriebslebensdauer zu erreichen und die thermische Belastbarkeit der elektrischen Ausrüstung berechnen zu können.

IEC 60085 (1957) normte eine Anzahl von Maximal-Temperaturwerten und stellte eine Liste von Isoliermaterialien in Verbindung mit diesen Temperaturen (Klassen) auf, die bei Anwendung in Isoliersystemen eine „wirtschaftliche Lebensdauer der Isolierung in einem weiten Bereich von Apparaten gewährleisten“ würden.

Dies war ein deutlicher Versuch, Isoliersysteme auf der Grundlage von (Betriebs-)Erfahrungen zu bewerten und die Kennzeichnung der Lebensdauer eines Isoliersystems in Zeitwerten vorzunehmen. Die Grenzen dieses ausschließlich auf thermische Beanspruchung zugeschnittenen Vorgehens wurden erkannt, und ein verbessertes Lebensdauerkonzept wurde gefordert. Diese Forderung und die Unmöglichkeit, die Materiallisten in IEC 60085 in einer Zeit zu benutzen, in der sich viele neue produzierte synthetische Materialien nicht klar einordnen ließen, führte zu einer weltweiten Bemühung, die Lage zu verbessern. Dies führte zur Erarbeitung der gegenwärtigen Norm, die als Leitfaden für Geräteverantwortliche Technische Komitees der IEC (ETC) dient, um sie in die Lage zu versetzen, angemessene Normen und technische Dokumente zu entwickeln.

Die beabsichtigte Lebensdauer zu bestimmen, ist eine grundlegende Aufgabe, wenn man ein EIS entwickelt und entwirft. Die geschätzte Lebensdauer eines EIS muss aus mehreren Gründen ermittelt werden:

- für Typprüfungen bei Einführung eines neuen EIS in die Fertigung,
- für die Qualitätsüberwachung der Fertigung und
- zur Abschätzung der Restlebensdauer bei Instandhaltungsmaßnahmen.

1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm bildet die Grundlage zur Abschätzung der Alterung Elektrischer Isoliersysteme (EIS) unter Bedingungen elektrischer, thermischer, mechanischer, Umwelt- oder Mehrfaktoren-Beanspruchungen.

Sie legt die Grundsätze und Verfahren fest, die bei der Entwicklung von Funktionsprüfungen und Bewertungsverfahren für EIS zur Ermittlung der Betriebslebensdauer eines speziellen Isoliersystems beachtet werden sollten.

Diese Norm ist für alle Technischen IEC-Komitees geeignet, die für Geräte (ETC), die ein elektrisches Isoliersystem enthalten, zuständig sind.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden normativen Dokumente enthalten Festlegungen, die durch Verweisung in diesem Text Bestandteil dieser Internationalen Norm sind. Bei datierten Verweisungen gelten spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen nicht. Anwender dieser Internationalen Norm werden jedoch gebeten, die Möglichkeit zu prüfen, die jeweils neuesten Ausgaben der nachfolgend angegebenen normativen Dokumente anzuwenden. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen normativen Dokuments. Mitglieder von ISO und IEC führen Verzeichnisse der gültigen Internationalen Normen.

IEC 60216 (alle Teile), *Determination of thermal endurance of solid organic materials*

IEC 60216-3, *Determination of thermal endurance of solid organic materials – Part 3: Instructions for calculating thermal endurance characteristics¹⁾*

IEC 60493-1, *Guide for the statistical analysis of ageing test data – Part 1: Methods based on mean values of normally distributed test results*

IEC 60727-1, *Evaluation of electrical endurance of electrical insulation systems – Part 1: General considerations and evaluation procedures based on normal distributions*

IEC 60727-2, *Evaluation of electrical endurance of electrical insulation systems – Part 2: Evaluation procedures based on extreme-value distributions*

IEC 61356, *Functional evaluation of electrical insulation systems – Principles for test procedures when comparative testing is not feasible*

1) Zu veröffentlichen.

3 Begriffe und Definitionen

Für die Anwendung dieser Internationalen Norm gelten die folgenden Begriffe und Definitionen:

3.1 Allgemeine Begriffe

3.1.1

elektrisches Isoliersystem (EIS)

isolierende Anordnung, die ein oder mehrere Isoliermaterialien (EIM) zusammen mit zugehörigen leitenden Teilen enthält, eingesetzt in einem elektrischen Betriebsmittel

3.1.2

elektrisches Isoliermaterial (EIM)

elektrisch beanspruchte Komponente in einem EIS

3.1.3

Vergleichs-EIS

bewertetes und eingeführtes EIS, entweder mit einem bekannten Bericht über Betriebserfahrungen oder einer bekannten vergleichenden Funktionsbewertung als Grundlage

3.1.4

Prüflings-EIS

EIS, bei dem zur Bewertung seine Leistungsfähigkeit im Betrieb (elektrisch, thermisch, unter Umgebungsbedingungen oder bei Mehrfaktoren-Beanspruchung) bestimmt wird

3.1.5

beabsichtigte Lebensdauer

dem EIS beim Entwurf zugedachte Lebensdauer unter Betriebsbedingungen

3.1.6

geschätzte Lebensdauer

erwartete Betriebslebensdauer abgeleitet aus Betriebserfahrungen oder/und aus Ergebnissen von Prüfungen, ausgeführt in Übereinstimmung mit geeigneten Bewertungsverfahren, wie es von der verantwortlichen Organisation oder dem zuständigen Technischen Komitee bestimmt wurde

3.1.7

Bewertung

Festsetzung der Beziehungen zwischen Betriebsanforderungen und Lebensdauerwerten, die aus Betriebserfahrungen oder aus Ergebnissen von Funktionsprüfungen abgeleitet wurden

3.2 Begriffe mit Bezug zu Betriebsbeanspruchungen und Alterung

3.2.1

„Alterungs“-Beanspruchung

Einwirkung elektrischer, thermischer, mechanischer oder umweltbedingter Natur, die Eigenschaftsänderungen hervorrufen kann

3.2.2

Einflussfaktor

Beanspruchung, hervorgerufen durch Bedingungen des Betriebes, der Umwelt oder durch Prüfung, welche die Lebensdauer eines EIS beeinflusst

3.2.3

Betriebsbedingungen

Kombination von Einflussfaktoren und Leistung, die bei einer speziellen Anwendung eines elektrischen Betriebsmittels zu erwarten sind

3.2.4

Referenz-Betriebsbedingungen

Betriebsbedingungen des Betriebsmittels, auf die sich die Prüfbedingungen des Verfahrens der Funktionsprüfung beziehen

3.2.5

Betriebsanforderungen

festgelegte Einflussfaktoren, beabsichtigte Lebensdauer und Betriebsart eines elektrischen Betriebsmittels

3.2.6

Betriebserfahrungen

quantitativer und/oder qualitativer Bericht über den Betrieb, mit oder ohne Ausfall eines EIS

3.2.7

Alterung

irreversible Änderung von Eigenschaften eines EIS infolge der Einwirkung eines oder mehrerer Einflussfaktoren

ANMERKUNG Einige Änderungen (z. B. hydrolytische Änderungen) können teilweise reversibel sein, wenn sich die Umgebungsbedingungen ändern.

3.2.8

Alterungsfaktor

Einflussfaktor, der Alterung verursacht

3.2.9

intrinsische Alterung (stofflich bedingte Alterung)

irreversible Änderungen von Grundeigenschaften eines EIS durch Einwirkung von Alterungsfaktoren

3.2.10

extrinsische Alterung (Fehlstellen-bedingte Alterung)

Auftreten irreversibler Eigenschaftsänderungen von EIS durch die Wirkung von Alterungsfaktoren auf unbeabsichtigt eingebrachte Fehler in einem EIS

3.2.11

Wechselwirkung

Änderungen von Art oder Geschwindigkeit der Alterung, hervorgerufen durch das Zusammenwirken von zwei oder mehr Einflussfaktoren verglichen mit ihrer Alterungswirkung, wenn sie einzeln auf getrennte Objekte einwirken

3.2.12

direkte Wechselwirkung

Wechselwirkung zwischen gleichzeitig einwirkenden Einflussfaktoren, die sich von derjenigen bei aufeinander folgender Einwirkung unterscheidet

ANMERKUNG Nicht alle Faktoren, die direkte Wechselwirkung hervorrufen, sind notwendigerweise Alterungsfaktoren.

3.2.13

indirekte Wechselwirkung

Wechselwirkung, die zwischen gleichzeitig wirkenden Einflussfaktoren auftritt, aber unverändert bei aufeinander folgender Anwendung bleibt

3.3 Begriffe mit Bezug zur Prüfung

3.3.1

Funktionsprüfung

Verfahren zur Erlangung von Informationen über die Eignung eines EIS unter vorgegebenen Bedingungen

3.3.2

Prüfling

Stück einer (elektrischen) Ausrüstung, eine Nachbildung (Modell) einer Ausrüstung, ein Bauteil oder Teil einer Ausrüstung, die das EIS enthalten, zur Verwendung bei einer Funktionsprüfung

3.3.3

beschleunigte Alterung

Ergebnis der Erhöhung des Pegels und/oder der Frequenz der Anwendung der Einflussfaktoren über die normalen Werte des Betriebes hinaus

3.3.4

beschleunigte Prüfung

Funktionsprüfung unter Anwendung beschleunigter Alterung zur Abkürzung der Prüfzeit

3.3.5

Konditionieren vor der Diagnose

Anwendung einer veränderlichen oder festen Beanspruchung auf ein EIS vor einer diagnostischen Prüfung

3.3.6

diagnostischer Faktor

veränderliche oder feste Beanspruchung, die auf ein EIS angewendet wird, um den Grad der Alterung zu ermitteln

3.3.7**diagnostische Prüfung**

periodische Anwendung eines vorgegebenen Pegels eines diagnostischen Faktors auf einen Prüfling zur Feststellung, ob das Schlusskriterium erreicht worden ist

3.3.8**Schlusskriterium**

ausgewählter Wert einer Eigenschaft oder ihrer Änderung, der das Ende der EIS-Lebensdauer in einer Funktionsprüfung bestimmt

3.3.9**„Prüfungs“-Zyklus**

eine Zeitspanne für die periodisch wiederholbare Anwendung eines oder mehrerer Einflussfaktoren, aufeinander folgend oder gleichzeitig, und von diagnostischen Faktoren auf ein EIS

3.3.10**Unterzyklen**

bestimmte Abschnitte des ganzen Zyklus zur Anwendung von Einflussfaktoren und diagnostischen Faktoren.

3.3.11**Überwachungstest**

dauernde Anwendung und Messung eines diagnostischen Faktors mit einer bestimmten Stärke auf einen Prüfling, um die Alterung zu bestimmen

4 Alterung – Allgemeines

Alterung ist definiert als irreversible Änderung von Eigenschaften eines EIS als Folge der Einwirkung eines oder mehrerer Einflussfaktoren. Alterungsbeanspruchungen können entweder intrinsische oder extrinsische Alterung bewirken. In den meisten EIS herrscht extrinsische Alterung vor, weil sie in der Praxis einige Fehlstellen und Verunreinigungen enthalten. Bild 1 gibt schematisch den grundlegenden Ablauf wieder.

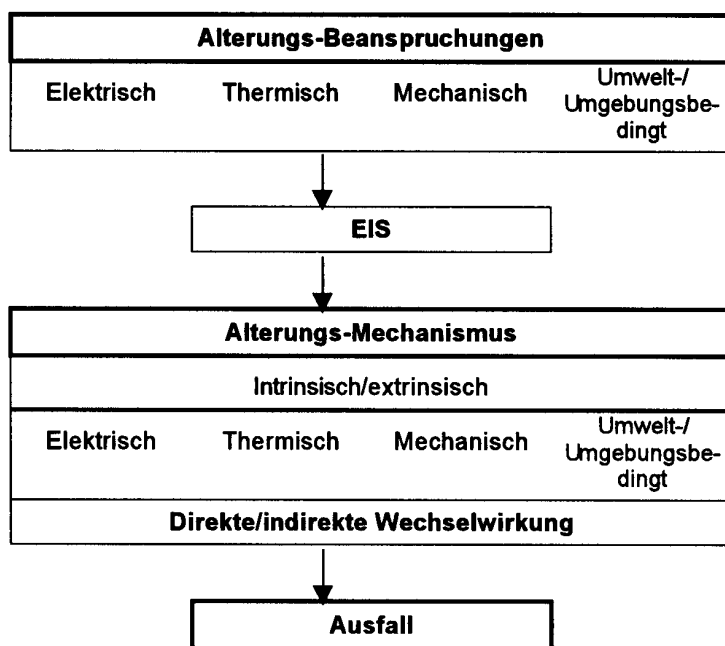


Bild 1 – Alterung eines EIS

Art und Umfang von Verunreinigungen und/oder das Ausmaß von Fehlstellen in einem EIS werden in vielen Arten elektrischer Apparate deutlich deren Betriebsverhalten bestimmen. Grundsätzlich wird das Betriebsverhalten des Betriebsmittels um so besser sein, je weniger und weniger schwer wiegende Verunreinigungen und/oder Fehlstellen das EIS enthält. Um zu vermeiden, dass man irreführende Ergebnisse aus Funktionsprüfungen erhält, sollte ein Prüflings-EIS möglichst den vollen Umfang an Verunreinigungen und/oder Fehlstellen enthalten, die im tatsächlich im Betrieb benutzten EIS zu erwarten sind.

Die Alterungsfaktoren bewirken elektrische, thermische, mechanische und umweltbedingte Alterungsmechanismen, die gegebenenfalls zum Ausfall führen. Während der Alterung können angewandte Beanspruchungen, die anfangs das EIS nicht angreifen, zu Alterungsfaktoren werden und damit die Geschwindigkeit des Abbaues verändern.

Wenn Alterung durch einen Alterungsfaktor bestimmt wird, wird dies Einzelfaktor-Alterung genannt. Mehrfaktoren-Alterung tritt auf, wenn mehr als ein Alterungsfaktor wesentlich das Betriebsverhalten des EIS bestimmt. Alterungsfaktoren können synergistisch wirken, das heißt, es können direkte Wechselwirkungen zwischen den Beanspruchungen auftreten. Diese können positiv oder negativ sein.

Die Alterung eines praktischen EIS kann kompliziert sein, und ein Ausfall ist gewöhnlich durch ein Zusammenwirken von Alterungsmechanismen verursacht, selbst dann, wenn nur ein bestimmender Alterungsfaktor, z. B. bei Einzelfaktoralterung, vorhanden ist.

Sofern Erfahrung oder vorhandene Kenntnisse über das Betriebsverhalten eines speziellen EIS begrenzt ist, muss das Technische Ausrüstungskomitee entscheiden, ob Einzel- oder Mehrfaktoren-Prüfverfahren für ihre spezielle Ausrüstung oder Gerät angemessen ist.

Im Idealfall sollten in Funktionsprüfungen alle im Betrieb auftretenden Alterungsmechanismen nachgebildet werden. Oft ist dies praktisch schwer zu erreichen, weil die Bedingungen, unter denen ein bestimmter Alterungsmechanismus wirksam ist, nicht vollständig bekannt sein oder verstanden werden kann. Verschiedene Alterungsmechanismen können entweder gleichzeitig oder aufeinander folgend auftreten.

Angenommen z. B., dass ein EIS elektrischen (E), thermischen (T), mechanischen (M) und Umweltbeanspruchungen (A) ausgesetzt ist, wie Bild 2 zeigt: Anfangs, bei Schritt A, findet elektrische Alterung statt, die eine Zunahme der dielektrischen Verluste bewirkt und eine oder mehrere Temperaturerhöhungen in der Isolierung hervorruft. In diesen Bereichen erhöhter Temperaturen werden Umwelt- und thermische Beanspruchungen zu Alterungsfaktoren und beschleunigen die chemischen Veränderungen in der Isolierung (Schritt B). Die chemischen Veränderungen können dann eine Zu- oder Abnahme der gesamten Alterungsgeschwindigkeit bewirken; eine Verringerung ist in Bild 3 dargestellt. Sobald die mechanischen Eigenschaften der angegriffenen Isolierung auf einen von den mechanischen Beanspruchungen abhängigen kritischen Wert abgenommen haben, werden örtliche Brüche verursacht (Schritt C). Folglich werden, sobald die Brüche eine kritische Größe erreichen, Teilentladungen auftreten und gegebenenfalls zum vollständigen Ausfall führen (Schritt D). Somit verläuft die Alterung, wie in Bild 3 gezeigt, nicht linear mit der Zeit.

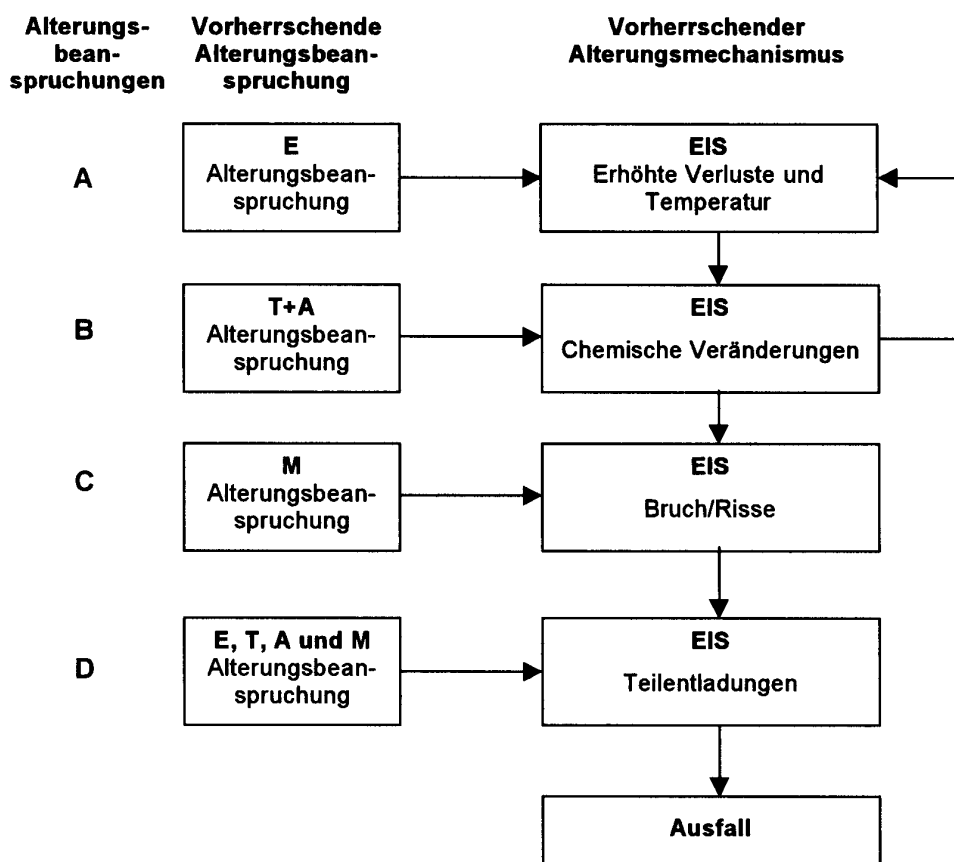


Bild 2 – Beispiel möglicher Alterungsmechanismen als Funktion der Zeit

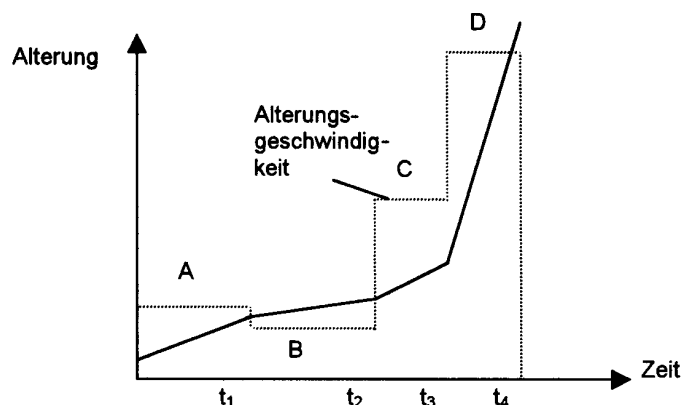


Bild 3 – Alterung als Funktion der Zeit nach Bild 2

Alternativ könnten die chemischen Veränderungen im Schritt B, wie in Bild 4 gezeigt, die dielektrischen Verluste weiter erhöhen und zu einer steilen Zunahme der Temperatur mit örtlichem Schmelzen führen. Im Schritt C führt dann der Verlust an mechanischer Festigkeit zum Ausfall. Bild 5 zeigt die Alterung als Funktion der Zeit.

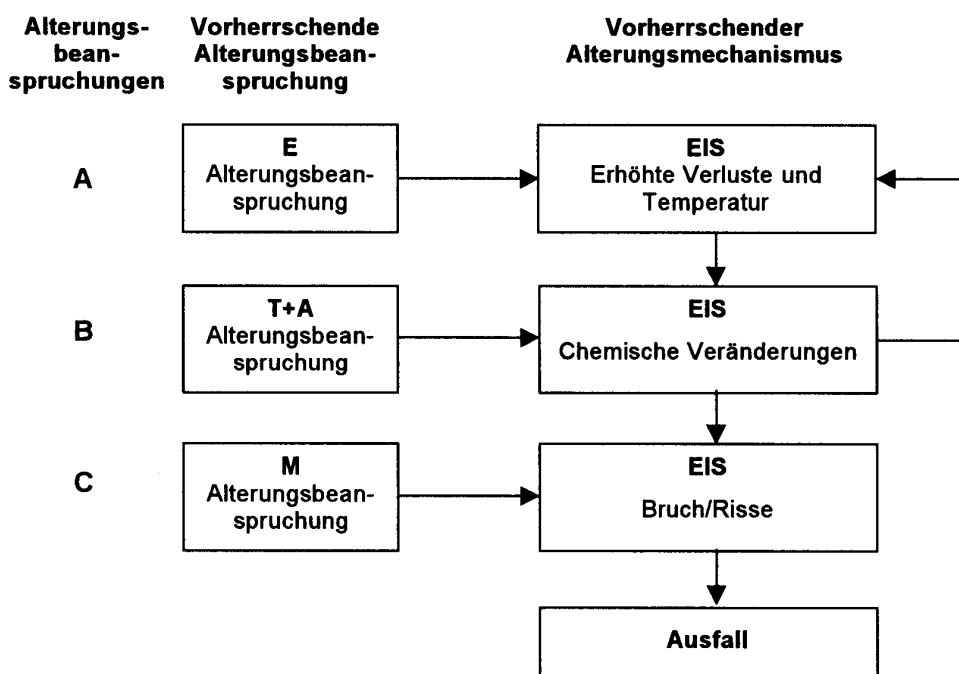


Bild 4 – Beispiel möglicher Alterungsmechanismen als Funktion der Zeit

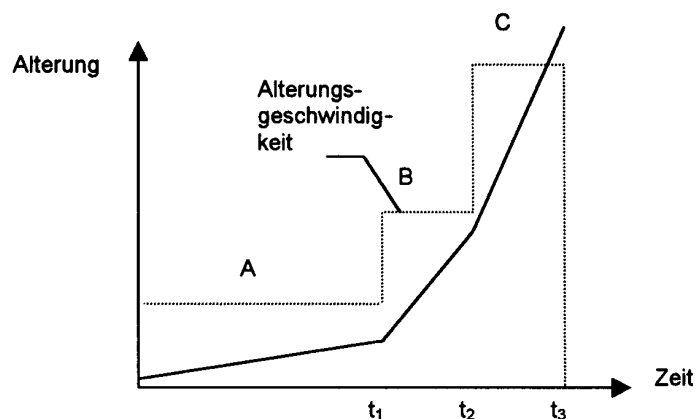


Bild 5 – Alterung als Funktion der Zeit nach Bild 4