

Karl-Heinz Weck

1. Einführung

Der Zusammenhang zwischen der Isolationsbemessung und der Isolationsdiagnose oder gar mit der Werterhaltung von Transformatoren, dem Thema dieses Symposiums, ist auch für den Fachmann durchaus nicht offensichtlich. Insbesondere aus der Sicht des Herstellers geschieht die Isolationsbemessung oft ausschließlich nach bestimmten genormten Prüfvorschriften und den darin festgelegten Bemessungsspannungen (Nenn-Stehspannungen). Die diesen Vorschriften zugrundeliegenden Anforderungen aus dem Energieversorgungsnetz sind dem Entwicklungsingenieur meist nicht mehr bewußt.

Im Grundsatz ist diese Verfahrensweise nicht korrekt. Dies wird deutlich aus der Definition der für die Isolationsbemessung zuständigen Isolationskoordination nach DIN VDE 0111 (Abschnitt 35, [1]) :

"Isolationskoordination umfaßt die Auswahl der Isolationspegel von Betriebsmitteln und deren Anwendung unter Berücksichtigung der Spannungen, die in einem Netz, für das das Betriebsmittel vorgesehen ist, auftreten können. Es werden die Eigenschaften der verfügbaren Überspannungs-Schutzeinrichtungen und die auftretenden Überspannungsbeanspruchungen so berücksichtigt, daß die Wahrscheinlichkeit eines Schadens an der Isolation eines Betriebsmittels oder die Beeinträchtigung des Betriebs auf ein wirtschaftlich und betriebsmäßig vertretbares Maß reduziert werden."

Diese Definition beinhaltet drei Grundsätze :

1. Die Isolation muß den im Netz auftretenden Überspannungsbeanspruchungen mit ausreichend hoher Wahrscheinlichkeit ohne Schaden standhalten. Diese Forderung gilt nicht nur für das Betriebsmittel im Neuzustand, sondern auch nach längerer Betriebszeit, also für das gealterte Gerät. Der Wert des Betriebsmittels für den Anwender sinkt, wenn die Schadenswahrscheinlichkeit ansteigt. Es hat seinen Wert verloren, wenn diese unannehmbar hoch ist.

2. Bei der Festlegung der Schadenswahrscheinlichkeit müssen betriebliche und ökonomische Gesichtspunkte, heute auch in steigendem Maße mögliche Auswirkungen eines Schadens auf die Umwelt, gegeneinander abgewägt werden. Dieser Grundsatz beinhaltet die Tatsache, daß man die Wahrscheinlichkeit eines Schadens durch drastische Überdimensionierung der Isolation praktisch zu null machen könnte, daß diese Maßnahme jedoch wirtschaftlich und teilweise auch betriebsmäßig nicht vertretbar ist. Hier ist also ein Optimum zu finden.
3. Der Isolationspegel, d.h. die Bemessungsspannungen, sind aus den genormten Werten so auszuwählen und die Prüfvorschriften sind so auszuarbeiten, daß die Grundsätze 1. und 2. erfüllt sind.

Die Verfahrensweisen, nach denen die Isolation eines Geräts bemessen wird und nach denen sie nach Fertigstellung eines Geräts schlußendlich geprüft wird, sind also lediglich praktische Hilfsmittel zur Erfüllung der tatsächlichen Anforderung, daß das Gerät im Netzbetrieb erfolgreich zu arbeiten hat. Selbstverständlich erfüllen die heute in der Bundesrepublik Deutschland geltenden Vorschriften wegen der langjährigen Erfahrungen mit dem Betrieb so gefertigter Geräte diese Anforderungen. Wenn man jedoch von der üblichen Auswahl der Geräte abweicht oder wenn das Energieversorgungsnetz nicht den üblichen Netzen entspricht, dann muß man sich daran erinnern, daß die Isolationsbemessung nach einer Vorschrift lediglich ein Hilfsmittel ist.

2. Prinzipien der Isolationskoordination

Grundlage für die Isolationskoordination sind die im Netz auftretenden Spannungsbeanspruchungen. Spannungsbeanspruchungen im Netz sind die Betriebsspannung und Überspannungen. Die Höhe dieser Überspannungen hängt ab vom Betrieb des Netzes, z.B. Art der Sternpunktterdung oder der Wiederschaltung vom Schutzpegel der eingesetzten Überspannungsableiter und der Häufigkeit, mit der sie auftreten.

Während der Betrieb des Netzes und der eingesetzte Überspannungsschutz leicht zu spezifizieren sind, bietet die Festlegung einer Häufigkeit, mit der eine bestimmte Überspannungsamplitude auftreten darf, meist Schwierigkeiten. Hilfe hierzu bietet die Schadensstatistik, z.B. die der VDEW, und die Akzeptanz der ermittelten Schadensraten. In der Bundesrepublik Deutschland sind Schadensraten von 0,25 % pro Jahr

gerade noch akzeptierbar. Wenn die Schadensraten höher werden, wird man versuchen, den Grund hierfür festzustellen und Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Diese Rate bedeutet, daß unter 400 Geräten pro Jahr eines mit einer Überspannung beansprucht werden darf, die über seinem Stehvermögen liegt. Gleichbedeutend mit diesem ist, daß jedes der 400 Geräte einmal in 400 Jahren diese Überspannung erfährt. Selbstverständlich gilt die so gefundene, zulässige Häufigkeit von 1 in 400 Jahren nicht generell für alle Betriebsmittel. Sie hängt vom Wert des Geräts und den Folgen eines Schadens ab. Für einige Betriebsmittel, z.B. für Isolatoren, kann man durchaus höhere Werte tolerieren, während man für andere, z.B. für Hochleistungstransformatoren, durchaus niedrigere Werte anstrebt. Die gegebene Zahl ist lediglich ein geeigneter Mittelwert für die hier angestellten, grundsätzlichen Betrachtungen.

In der Isolationskoordination werden Spannungsbeanspruchungen nicht nach ihrer Herkunft sondern nach ihrer Dauer eingeteilt. Ein Überblick über diese Einteilung ist in Bild 1 gegeben [2]. Die Höhe der Überspannungen entspricht den Leiter-Erde-Werten, wie sie in einem 380-kV-Netz mit einer Häufigkeit von 1 pro 400 Jahren zu erwarten sind. Es ergeben sich 4 Bereiche :

- I : Die Betriebsspannung, die dauernd am Betriebsmittel liegt.
Ihre Amplitude ist per Definition 1 p.u.
- II : Zeitweilige Spannungserhöhungen sind Überspannungen mit Betriebsfrequenz oder mit Frequenzen nahe der Betriebsfrequenz. Sie dauern zwischen 20 ms und 2 s, in Netzen mit Erdschlußlöschung bis zu 3 Stunden. Sie entstehen durch Erdkurzschlüsse, Erdschlüsse oder durch Resonanzvorgänge.
- III : Schaltüberspannungen sind Überspannungen mit einer Dauer zwischen einigen 100 μ s und 20 ms. Sie entstehen durch Schalt-handlungen, Erdkurzschlüsse oder Erdschlüsse.
- IV : Blitzüberspannungen liegen zwischen 0,1 μ s und einigen 100 μ s. Sie steigen zu kürzeren Zeiten aufgrund des Abstandes zwischen Betriebsmittel und Überspannungsableiter hin an. Blitzüberspannungen entstehen durch Blitzeinschläge aber auch durch Schalt-handlungen in Schaltanlagen.

Zu noch kürzeren Zeiten unter $0,1 \mu\text{s}$ hin liegen noch die in SF_6 -Schaltanlagen auftretenden sehr schnellen Schaltüberspannungen, auf deren nähere Behandlung jedoch hier verzichtet werden muß. Es sei noch angemerkt, daß alle Spannungsbeanspruchungen unabhängig von der Betriebsspannungsebene auftreten, d.h. daß auch in der Mittelspannung Schaltüberspannungen zu beachten sind.

Die in der Einleitung als 1. Grundsatz aufgestellte Forderung ist erfüllt, wenn die Stehspannung der Isolation für die verschiedenen Spannungsformen im gesamten Zeitdauerbereich über diesen Spannungsbeanspruchungen liegt. Die Ermittlung der Stehspannung für alle diese im Netz vorkommenden Spannungsformen ist jedoch aus wirtschaftlichen Gründen nicht möglich und eine Reihe von Vereinfachungen sind in die Isolationskoordination eingeführt worden.

1. Vereinfachung.

Anstelle der Spannungsbeanspruchungen im Netz treten genormte Prüfspannungen.

Die 1-min-Wechselspannung ist stellvertretend für zeitweilige Spannungserhöhungen und für die Betriebsspannung, wenn eine besondere Langzeitprüfung nicht gefordert ist.

Die Schaltstoßspannung $250/2500 \mu\text{s}$ ist stellvertretend für die Schaltüberspannungen und die Blitzstoßspannung $1,2/50 \mu\text{s}$ ist stellvertretend für die Blitzüberspannungen.

Die Ermittlung der Stehspannungen einer Isolation erfolgt mit diesen genormten Spannungsformen im Neuzustand des Betriebsmittels in der Regel als Typenprüfung an einem Exemplar oder an einem repräsentativen Teil eines solchen Exemplars. Die Stehspannungen des tatsächlich eingesetzten Geräts können insbesondere nach längerer Betriebszeit durchaus unter dem in der Typenprüfung ermittelten oder nachgewiesenen Wert liegen. Hieraus folgt die

2. Vereinfachung.

Zur Abdeckung einer möglichen Abweichung zwischen den Stehspannungen in einer Typenprüfung und nach längerem Betrieb wird ein Sicherheitsfaktor auf die für den Netzbetrieb notwendigen Stehspannungen angewendet. In der Regel beträgt dieser Faktor 1,15.

Die so ermittelten, in der Typenprüfung anzuwendenden Stehspannungen sind in Bild 2 als Quadrate eingetragen. Welche der so gefundenen Spannungswerte für die Isolationsbemessung maßgebend ist, hängt vom Isolationstyp ab.

Typ_A : Isolationen, die eine flache Stehspannungscharacteristik haben.

Typische Beispiele sind die SF₆-Isolation und kleinere Luftabstände. Hierfür ist die geforderte Blitzstoßspannung bemessend. Die verbleibenden Stehspannungen sind hierdurch abgedeckt.

Typ_B : Isolationen, die im Kurzzeitbereich ähnlich dem Typ A sind, für die längeren Zeiten jedoch einen weiteren Abfall der Festigkeit aufweisen. Zu diesem Typ gehört die in diesem Symposium besonders interessierende Ölpapierisolation von Transformatoren, aber auch andere flüssige oder feste Isolationen. Sie sind, soweit es die Leiter-Erde-Spannung betrifft, durch die geforderte Blitzstoßspannung bemessen.

Typ_C : Isolationen, die im Schaltspannungsbereich ein ausgesprochenes Minimum aufweisen. Zu diesem Typ gehört ausschließlich der große Luftabstand. Für ihn ist die geforderte Schaltstoßspannung bemessend.

Aus dem Verlauf der Kurven ist ersichtlich, daß es für eine einwandfreie Bemessung der Isolationen Typ A und Typ B, die eine stetig mit der Beanspruchungsdauer abfallende Stehspannung besitzen, eine Bemessung mit Blitzstoßspannung und Wechselspannung ausreicht. Hierzu ist es allerdings nötig, die 1-min-Wechselspannung so zu erhöhen, daß die geforderte Steh-Schaltstoßspannung in jedem Fall sichergestellt ist. Daraus folgt die

3. Vereinfachung.

Für Betriebsmittel bis 245 kV ist eine Bemessung nach den geforderten Werten für die Blitzstoßspannungen und für die 1-min-Wechselspannung ausreichend. Für höhere Betriebsspannungen ist für große Luftstrecken eine Bemessung nach der geforderten Steh-Schaltstoßspannung erforderlich.

Schlußendlich sei der Vollständigkeit halber die letzte Vereinfachung erwähnt :

4. Vereinfachung.

Im Spannungsbereich bis 245 kV, in dem keine besondere Stehspannung der Isolation zwischen den Phasen festgelegt ist, haben die Leiter-Erde-Stehspannungen auch die höheren Spannungsbeanspruchungen zwischen den Leitern abzudecken.

Erst nach Durchlaufen der aufgeführten vier Vereinfachungen erreicht man ausgehend von den Spannungsbeanspruchungen im Netz die in den Vorschriften festgelegten Bemessungsspannungen. Die Möglichkeiten einer falschen Einschätzung des Isolationsverhaltens sind durchaus gegeben, und zumindest zeitweise sollten die vielen gemachten Vereinfachungen in Erinnerung gerufen werden.

3. Isolationsminderung und ihre Bedeutung

Unter einer Isolationsminderung muß man jede Absenkung der Stehspannung eines Geräts unter seine Bemessungsspannung (Nenn-Stehspannung) zählen. Bild 3 zeigt schematisch die beiden möglichen Arten der Isolationsminderung mit der Zeit :

Fertigungsstreuung

Bei einigen Betriebsmitteln muß man bereits zu Beginn des Betriebs damit rechnen, daß seine Stehspannung unter der Bemessungsspannung liegt. Gründe hierfür können Streuungen in den eingesetzten Materialien oder Bauteilen oder eine rein statistisch begründbare Absenkung sein, wenn in der Typenprüfung nicht das gesamte sondern nur ein Teil des Geräts geprüft wird. Typische Beispiele sind fabrikfertige Mittelspannungsanlagen oder SF₆-Schaltanlagen.

Zur Verdeutlichung zeigt Bild 4 die an etwa 100 Mittelspannungs-Schaltanlagen vor der Inbetriebnahme vor Ort ermittelte Steh-Blitzstoßspannung als Summenhäufigkeit [3]. Die Bemessungs-Blitzstoßspannung beträgt 125 kV; etwa 30 % aller Anlagen weisen diesen Wert auch vor Ort auf. Statistisch begründbar ist eine Absenkung um 5 % von diesem Wert, also auf 119 kV. Etwa 50 % aller Ergebnisse liegen unter diesem Wert, für diese Anlagen müssen also zusätzlich Streuungen der Materialien und der Bauteilqualität angenommen werden.

Alterung

Grundsätzlich muß bei allen flüssigen und festen Isolierstoffen mit einer Alterung, d.h. mit einem Absinken der Stehspannung mit der Betriebszeit gerechnet werden. Die Ursachen für die Alterung sind durch die Art der Isolation und deren Einsatzort gegeben. Die Auswirkungen und somit auch die Bedeutung der Alterung hängen davon ab, ob die Isolation regenerierbar oder nicht regenerierbar ist, d.h. ob die Isolationsfestigkeit durch bestimmte Maßnahmen vollständig oder zumindest ausreichend wieder hergestellt werden kann.

Isoliergase altern ohne zusätzliche Entladungsvorgänge nicht. Freiluftisolationen können durch Fremdschichtablagerungen und die bei Feuchtigkeit einsetzenden Oberflächenentladungen altern. Die keramische Isolation ist durch Reinigen regenerierbar. Bei Kunststoffisolatoren können die Entladungen die Oberfläche zerstören. Solche Isolationen sind nur beim Einsatz geeigneter Kunststoffe, z.B. Silikonkautschuk, regenerierbar.

Flüssige und feste Isolationen altern, wobei die durch das Arrhenius-Gesetz beschriebene Temperaturabhängigkeit nur einen der Einflußfaktoren darstellt [4]. Andere Faktoren, wie die durch Teilentladungen erzeugten physikalischen oder chemischen Zersetzungen oder auch die Alterung von Polyäthylen-Isolationen in Kabeln, sind in dieser Gesetzmäßigkeit nicht berücksichtigt. Grundsätzlich sind alle festen Isolationen nicht regenerierbar. Flüssige Isolationen, wie das in diesem Symposium besonders interessierende Transformatorenöl, sind durch Austausch regenerierbar, solange die festen Anteile wie Papier oder Konstruktionsteile nicht beeinträchtigt sind.

Eine Verminderung der Isolationsfestigkeit bedeutet zunächst nicht, daß ein Betriebsmittel für den Netzbetrieb untauglich wird. Es bedeutet lediglich, daß die Wahrscheinlichkeit ansteigt, bei einer Überspannung durchzuschlagen, d.h. das Fehlerrisiko steigt an. Dieser Anstieg hängt wiederum von der Wahrscheinlichkeit ab, mit der eine Überspannung mit bestimmter Amplitude im Netz auftritt. Bild 5 zeigt als Beispiel die Häufigkeit von Blitzüberspannungen in 20-kV-Schaltanlagen, die an Holzmast-Freileitungen angeschlossen sind [3].

Mit ausreichend guter Näherung kann man annehmen, daß die angeschlossene Mittelspannungsanlage einen Fehler aufweisen wird, wenn die Überspannung die Steh-Blitzstoßspannung überschreitet. Dies bedeutet, daß eine Anlage mit einer Steh-Blitzstoßspannung gleich dem Bemessungswert von 125 kV einmal in 1000 Jahren eine Überspannung größer als diesen Wert erfährt, d.h. diese Anlage hat ein Fehlerrisiko von 1 in 1000 Jahren. Eine Anlage mit einer um den in Abschnitt 2 erwähnten Sicherheitsfaktor von 1,15 erniedrigten Steh-Blitzstoßspannung von 109 kV hat ein Fehlerrisiko von 1/300 Jahren und selbst eine Anlage mit 95 kV hat noch ein Fehlerrisiko von 1 in 150 Jahren.

Bei Betriebsmitteln, bei denen die Isolationsminderung ausschließlich auf Fertigungsstreuung beruht, ist die Sachlage also eindeutig. Das Fehlerrisiko wird gegenüber

dem angestrebten Wert erhöht, wenn die zu Betriebsbeginn tatsächlich vorhandene Stehspannung den in der Isolationskoordination zugrundegelegten Wert unterschreitet.

Bei Betriebsmitteln, bei denen die Isolationsfestigkeit zusätzlich der Alterung unterworfen ist, steigt das Schadensrisiko mit der Betriebszeit an. Mit der angenommenen Wiederkehrrate der Überspannungen nach Bild 6, wie sie im 380-kV-Netz durchaus zutreffend sein kann, und einem ebenfalls angenommenen Absinken der Steh-Blitzstoßspannung mit der Betriebszeit nach Bild 7a ergibt sich der in Bild 7b, Kurve 1, dargestellte Anstieg des Fehlerrisikos. Da bei der Isolationskoordination der Sicherheitsfaktor von 1,15 angewendet wurde, ist das Fehlerrisiko zu Beginn des Betriebs kleiner als 1 in 400 Jahren. Es steigt dann an und erreicht den Bemessungswert etwa nach 7 Jahren, zu der Zeit, zu der die Steh-Blitzstoßspannung auf 1240 kV abgesunken ist, d.h. auf die Bemessungsspannung von 1425 kV geteilt durch den Sicherheitsfaktor 1,15.

Für die Beurteilung des mit der Betriebszeit ansteigenden Fehlerrisikos dient das mittlere Risiko in Bild 7b, Kurve 2. Es erreicht den Bemessungswert von 1 in 400 Jahren erst nach 12 Jahren, d.h. nach 12 Jahren hat die Isolation die gleiche Fehlerwahrscheinlichkeit wie eine mit dem konstanten Risiko von 1 in 400 Jahren. Erst dann steigt die Fehlerwahrscheinlichkeit an und erreicht nach dreißig Jahren einen mittleren Wert von 1 in 100 Jahren. Die Fehlerrate eines so alternden Geräts wäre 1 %, also etwa 4 mal so hoch wie der angestrebte Wert.

4. Isolationsdiagnose

Der Begriff der Isolationsdiagnose ist eine Abkürzung der eigentlich korrekten Bezeichnung Isolationszustandsdiagnose, also der Isolationszustands-Bestimmung oder -Erkennung. Zu ihr zählen alle Verfahren, die die Trennung in "betriebstaugliche" und "nicht betriebstaugliche" Isolationen ermöglichen, wobei entsprechend den vorangegangenen Abschnitten eine Isolation als betriebstauglich angesehen wird, wenn sie das angestrebte Fehlerrisiko im Betrieb garantiert. Hierzu sind zwei Bedingungen zu erfüllen :

- a) Die Isolation muß zu Beginn des Betriebs betriebstauglich sein. Ihre Stehspannungen dürfen nicht unter den in der Isolationskoordination angesetzten Werten liegen und das Verhalten der Isolation darf nicht Anlaß zu einer schnelleren Alterung geben, als dies dem verwendeten Isolationsmedium zugebilligt wird.

Zur Isolationsdiagnose dienen die Stückprüfungen.

- b) Die Isolation muß auch nach längerer Betriebszeit betriebstauglich bleiben. Die Stehspannungen dürfen nicht unzulässig weit unter die im Neuzustand vorhandenen Werte abgesunken sein und es dürfen in der Isolation keine neuen Vorgänge eingesetzt haben, die Anlaß zu einer schnelleren Alterung geben als erwartet.

Die Notwendigkeit einer Isolationsdiagnose hängt von dem erwarteten Alterungsgrad einer Isolation und der Bedeutung des Betriebsmittels ab. Die Eignung der Verfahren ist bestimmt durch die Isolationsart.

Die in der Bedingung a) aufgeführte Stückprüfung ist die Mindest-Isolationsdiagnose, die an einem Betriebsmittel durchgeführt wird. Der Umfang dieser Prüfungen hängt von der erwarteten Fertigungsstreuung, dem Anschaffungswert, der Auswirkung eines Isolationsfehlers und den Reparaturkosten und -zeiten eines Betriebsmittels ab. Anhand ausgewählter Beispiele zeigt Tabelle 1, wie sich diese Gesichtspunkte in den heute geltenden Prüfvorschriften niedergeschlagen haben.

Für Isolatoren rechtfertigt keiner der genannten Faktoren eine Stückprüfung. Die für die Isolationsfestigkeit allein entscheidenden geometrischen Abmessungen werden in einer Stichprobenprüfung überprüft [5].

Bei Mittelspannungs-Kunststoffkabeln ist zwar der Anschaffungswert (einschließlich Verlegekosten) hoch, jedoch sind die Auswirkungen eines Fehlers örtlich begrenzt und der Fehler vergleichsweise schnell repariert. Da im Isolierstoff vorhandene Teilentladungen jedoch sehr schnell zu einem Fehler der Isolation führen würden, d.h. der Isolierstoff schneller als erwartet altern würde, wird das Kabel auf Teilentladungsfreiheit geprüft [6].

Bei SF₆-Schaltanlagen ist die Fertigungsstreuung als sehr hoch angesetzt, da ein großer Teil der Fertigstellung vor Ort geschehen kann. Die festgeschriebenen Wechselspannungs- und Teilentladungsprüfungen werden an Transporteinheiten durchgeführt. Die eigentliche Stückprüfung geschieht vor Ort [7]. Die hierin liegende Problematik der isolationskoordinationsgerechten Auswahl der Prüfspannungsart und -höhe ist allgemein bekannt und noch nicht voll ausdiskutiert.

Höchstspannungstransformatoren werden in so geringer Stückzahl gefertigt, daß man von einer Fertigungsstreuung eigentlich nicht sprechen kann. Sie wurde hier als Mittel eingesetzt, um deutlich zu machen, daß dieser Punkt für die Auswahl

der Stückprüfungen nicht allein entscheidend ist. Alle anderen Faktoren sind sehr hoch. Folgerichtig sind die elektrischen Stückprüfungen gleich den Typenprüfungen, mit Ausnahme der Erwärmungsprüfung, deren Gültigkeit durch die Messung der Kurzschluß- und der Leerlaufverluste überprüft wird [8]. Man ist demnach bestrebt, bei Höchstspannungstransformatoren Fertigungsstreuungen auszuschließen und so den Betrieb mit einem Isolationszustand zu beginnen, der die vollen Bemessungsspannungen aufweist und aufgrund der nachgewiesenen Teilentladungsfreiheit keine beschleunigte Alterung erwarten läßt. Die in Bild 7a zu Beginn der Betriebszeit eingesetzte Bemessungs-Blitzstoßspannung entspricht somit den tatsächlichen Gegebenheiten.

Eine Isolationsdiagnose während des Betriebs ist nur dann vom Anwender akzeptierbar, wenn die Isolation regenerierbar, d.h. eine im Sinne der Isolationskoordination ausreichende Stehspannung wiederherstellbar ist und wenn das Auffangen der erwarteten Alterung durch eine hohe Stückprüfungsspannung zu einer unwirtschaftlichen Überdimensionierung führen würde. Ein typisches Beispiel ist der hier behandelte Großtransformator, in früherer Zeit auch Strom- und Spannungswandler, bei denen der Diagnose auch die Therapie durch Ölaustausch folgen konnte.

Hin und wieder wird eine Isolationsdiagnose auch dann notwendig, wenn ein Betriebsmittel durch einen Vorgang altert, der bei seinem Einsatz ins Netz nicht bekannt war. Als Beispiele seien hier die Alterung von Kunststoffkabeln durch Wasserbäumchen oder die chemische Zerstörung der Metalloxidableiter durch innere Teilentladungen angeführt. Hier kann die Isolation nicht regeneriert und die ursprüngliche Isolationsfestigkeit nur durch Austausch des Betriebsmittels wiederhergestellt werden. Solche Vorgänge sind unerwünscht und Diagnoseverfahren werden nur solange benötigt, wie sich diese Betriebsmittel im Netz befinden.

Die Bedeutung der Isolationsdiagnose und der daraus folgenden Therapie für die Isolationskoordination sei am Beispiel in Bild 7 verdeutlicht. Zur Erzielung eines über eine angenommene Lebensdauer von 30 Jahren geltenden Fehlerrisikos von 1/400 Jahren stehen zwei Alternativen zur Verfügung :

- Alternative 1 :

Die Isolation wird so hoch bemessen und stückgeprüft, daß sich trotz Alterung das gewünschte mittlere Fehlerrisiko ergibt (Bild 8).

- Alternative 2 :

Die Isolation wird regeneriert, wenn das mittlere Fehlerrisiko den Wert von 1/400 Jahren überschreitet (Bild 9). Dabei ist angenommen, daß sich die Isolation so regenerieren läßt, daß 95 % der Bemessungs-Blitzstoßspannung wieder erreicht werden.

Beide Alternativen sind von der Isolationskoordination her gesehen gleich. Sie erfüllen das vorgegebene Fehlerrisiko. Für die Isolationsbemessung sind sie jedoch sehr unterschiedlich. Bei gleichem Alterungsverhalten muß die Isolation bei der Alternative 1 für eine Bemessungs-Blitzstoßspannung von 1720 kV ausgelegt werden, wogegen für die Alternative 2 ein Wert von 1425 kV ausreicht. Das Betriebsmittel nach Alternative 1 ist also um 21 % höher zu dimensionieren als das der Alternative 2.

Mit dem in der Regel in der Isolationskoordination angewendeten Sicherheitsfaktor von 1,15 ist ein Alterungsgrad, wie er in diesen Beispielen gewählt ist, nicht abgedeckt. Geräte, bei denen eine solche Alterung möglich ist, müssen demnach auf den Alterungsgrad hin überprüft werden. Bei Großtransformatoren ist dies übliche Praxis [9]. Mit der Ölgasanalyse steht ein Mittel zur Verfügung, das zumindest eine Abschätzung des Alterungsgrades erlaubt. Inwieweit quantitative Aussagen über die verbleibenden Stehspannungen über den gesamten in Abschnitt 2 dargestellten zeitlichen Bereich der Spannungsbeanspruchungen gemacht werden können, bleibt diskussionswürdig.

5. Zusammenfassung

Durch die Verfahren der Isolationskoordination werden die Bemessungsspannungen so festgelegt, daß die Isolationsfestigkeiten über den im Betrieb mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auftretenden Spannungsbeanspruchungen liegt. Unbekannte Faktoren werden durch einen Sicherheitsfaktor abgedeckt, wobei in der Regel ein Wert von 1,15 angewendet wird.

Isolationsminderungen gegenüber den in der Typenprüfung nachgewiesenen Bemessungsspannungen können durch Fertigungsstreuungen oder durch Alterung auftreten. Die Auswirkungen der Isolationsminderung auf die Betriebssicherheit eines Geräts können durch eine geeignete Isolationsdiagnose eingeschränkt werden. Verfahren

zur Überprüfung der Fertigung sind die in den Vorschriften festgelegten Stückprüfungen. Die Überprüfung der Alterung geschieht durch Isolationsüberwachung im Betrieb. Für verschiedene Geräte, bei denen Isolationsfehler einen längeren Betriebsausfall mit hohen Kosten verursachen, sind Überwachungsverfahren in Gebrauch. Beispiele hierzu sind Generatoren und Großtransformatoren. Die Erfahrungen mit der Anwendung der eingesetzten Verfahren sind gut, doch fehlt in vielen Fällen ein Zusammenhang zwischen der überwachten Größe und der für die Isolationskoordination und die Isolationsbemessung maßgebenden Stehspannungen. Bei Kenntnis dieses Zusammenhangs wäre die Entscheidung einer Isolationsregenerierung leichter.

Betriebsmittel	Fertigungs- streuung	Anschaffungs- wert	Auswirkungen eines Isolations- fehlers	Reparaturkosten und -zeiten	Elektrische Stückprüfungen
Isolatoren	niedrig	niedrig	gering	keine	keine
Mittelspannungs- kunststoffkabel	niedrig	hoch	mittel	mittel	Wechselspannung Teilentladung
SF ₆ -Schaltanlagen	sehr hoch	hoch	hoch	hoch	Wechselspannung Teilentladung Vor Ort
Höchstspannungs- transformatoren	mittel	sehr hoch	sehr groß	sehr hoch	Wechselspannung Schaltstoßspannung Blitzstoßspannung Teilentladung Kurzschlußverluste Leerlaufverluste

Tabelle 1 : Beispiele von Stückprüfungsanforderungen und deren Begründung

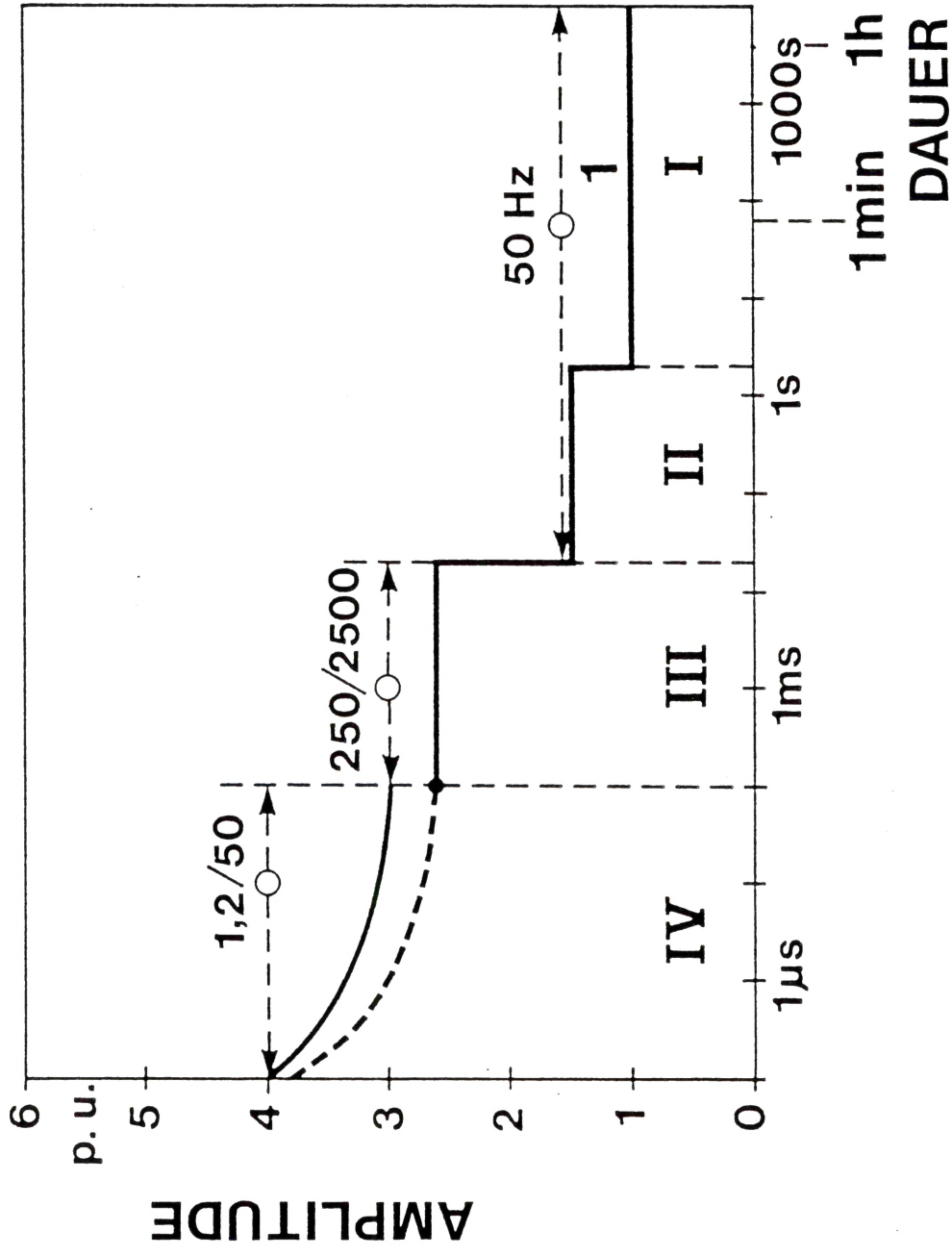


Bild 1: Amplituden-Dauer Kennlinie der Spannungsbeanspruchungen im Netz am Beispiel eines 380-kV-Netzes.

○: Representative Prüf-Spannungsbeanspruchungen

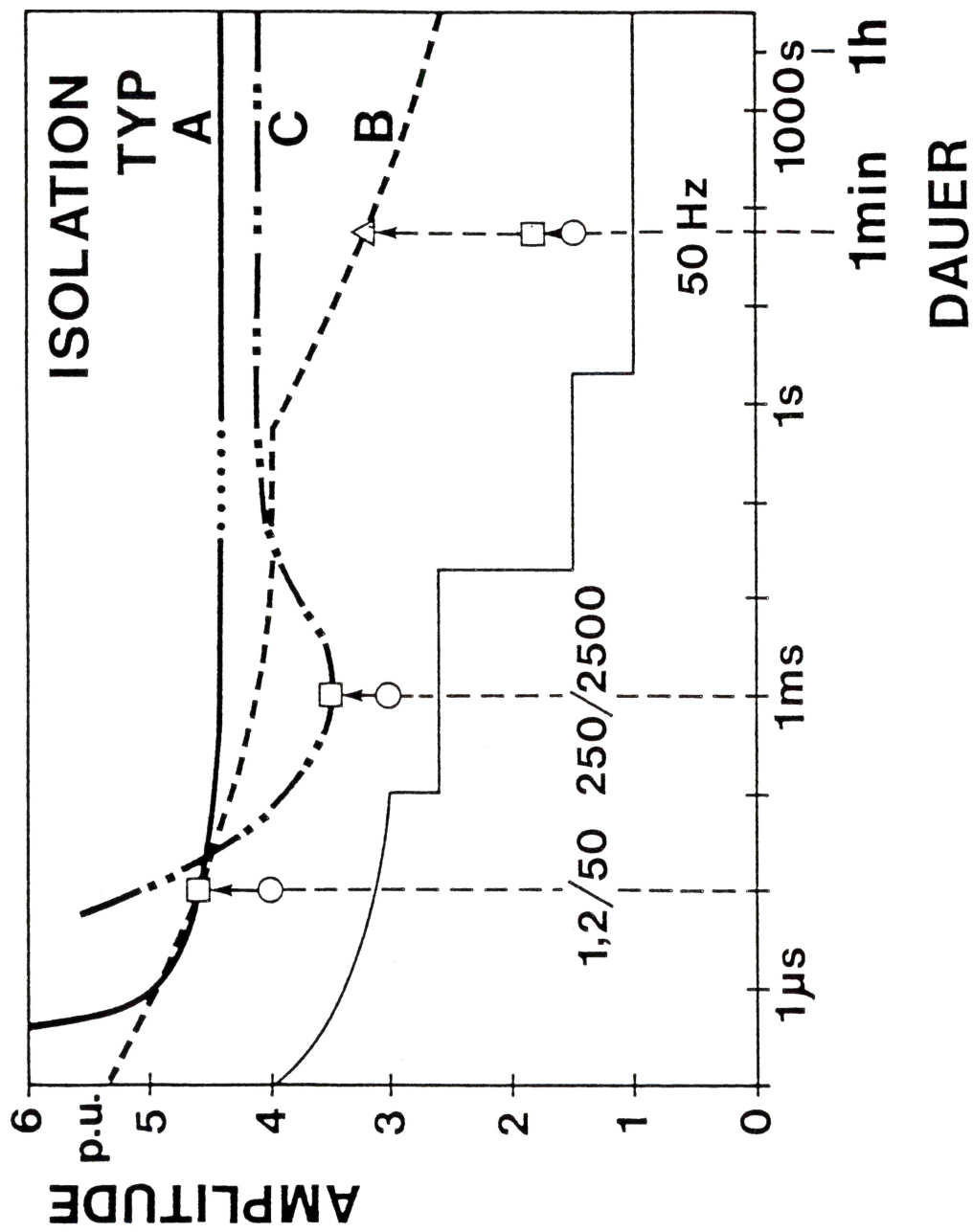


Bild 2 : Stehspannungs-Dauer Kennlinien der Isolation

○ : Representative Prüfspannungsbeanspruchung

□,△ : Notwendige Stehspannungen eines Betriebsmittels

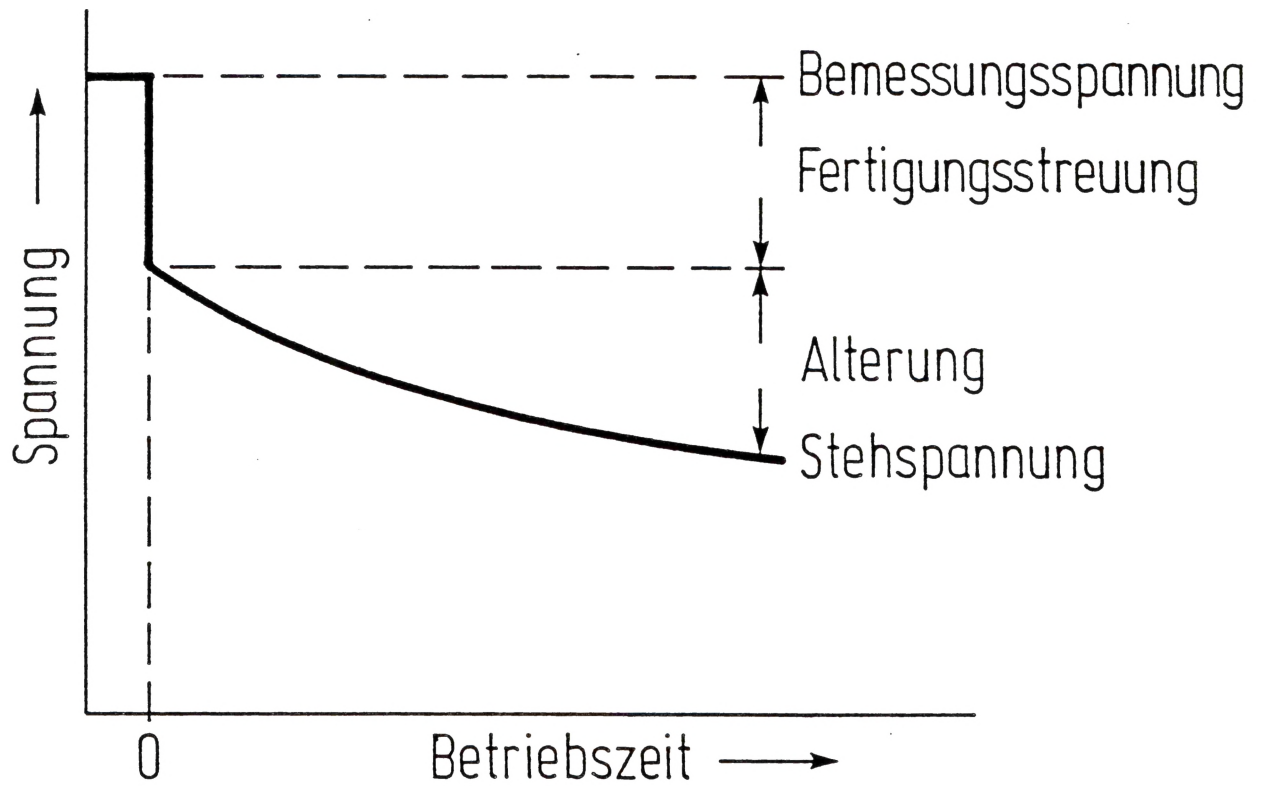


Bild 3 : Schematische Darstellung der Isolationsminderung mit der Betriebszeit

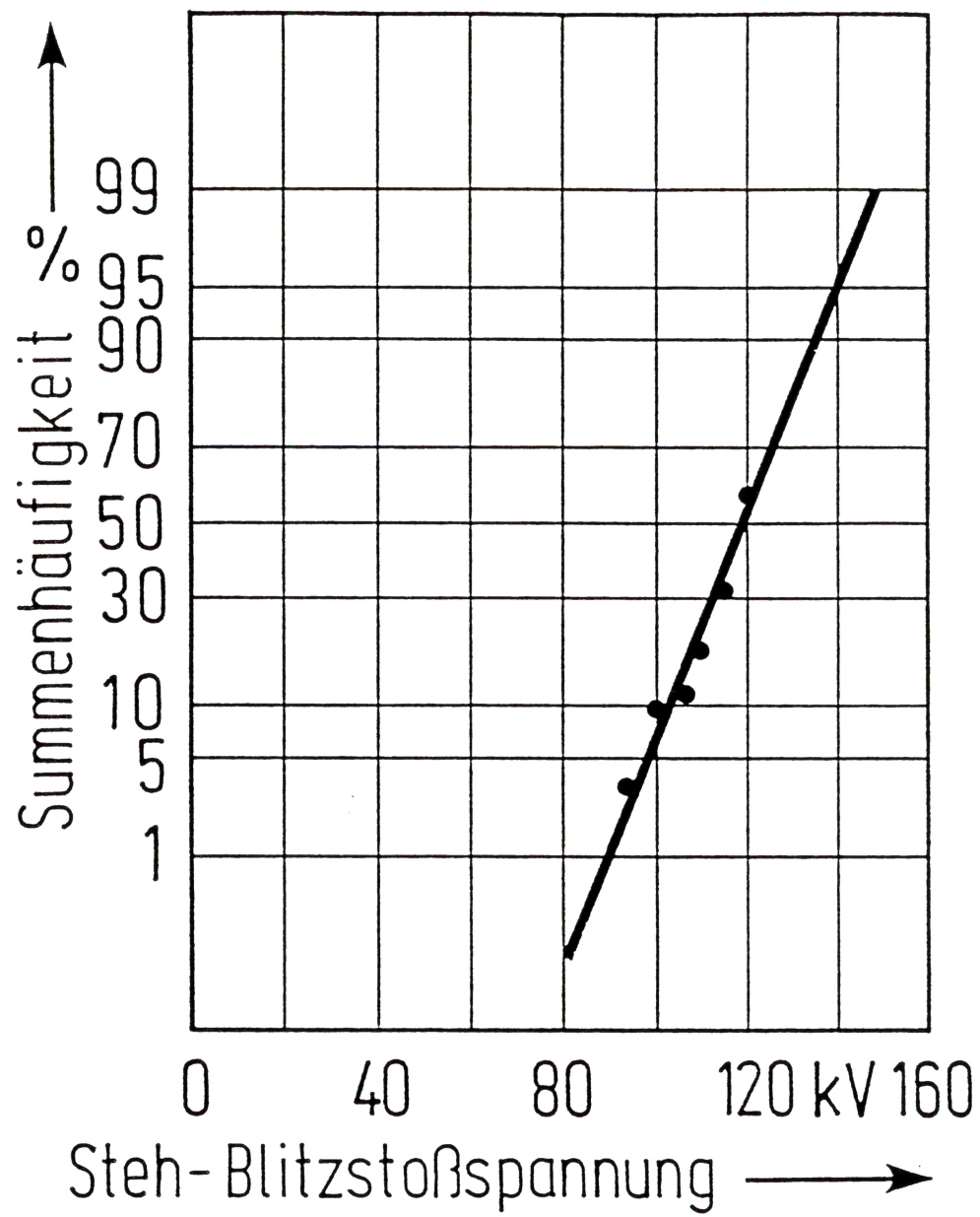


Bild 4 : Summenhäufigkeit der Steh-Blitzstoßspannung von 24-kV-Schaltanlagen im Neuzustand [3].

Bemessungs-Blitzstoßspannung : 125 kV

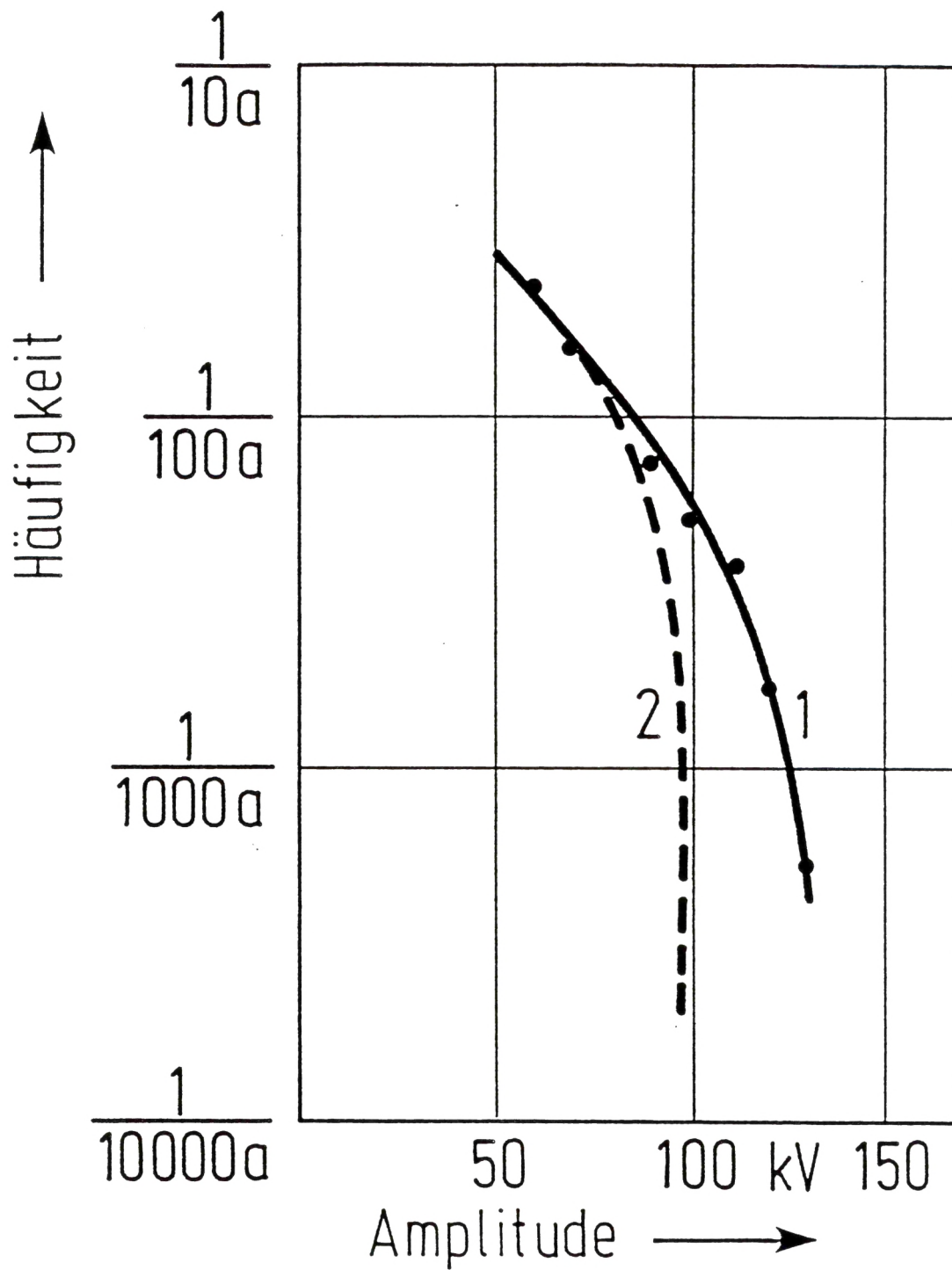


Bild 5 : Häufigkeit von Blitzüberspannungen in 24-kV-Schaltanlagen [3].

- 1 : Holzmastleitung-Bleimantelkabel $l = 250$ m
oder Kunststoffkabel
- 2 : Holzmastleitung-Bleimantelkabel $l = 2000$ m
oder Stahlmastleitung

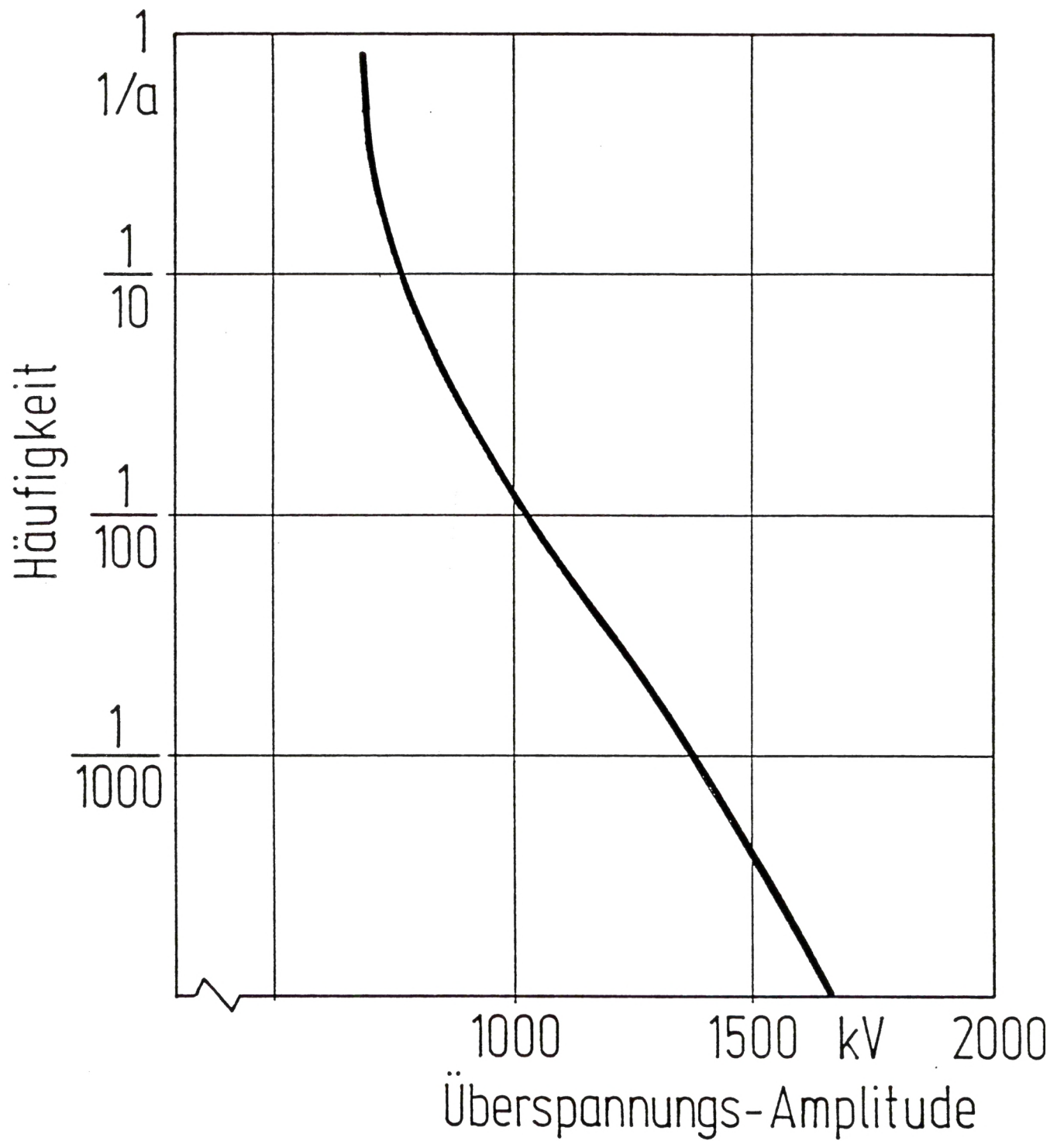


Bild 6 : Häufigkeit von Überspannungen an einem 380-kV-Transformator
(Beispiel)

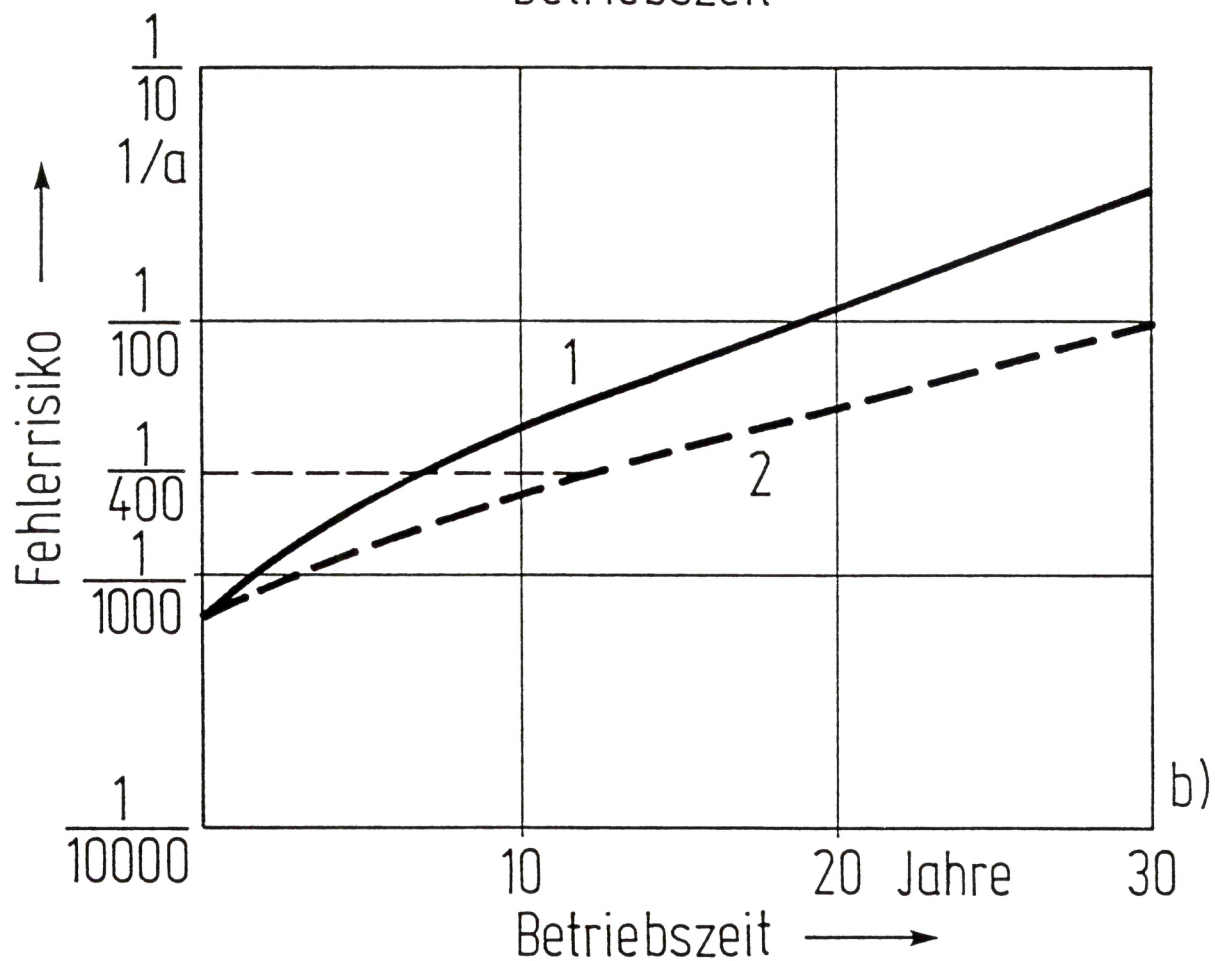
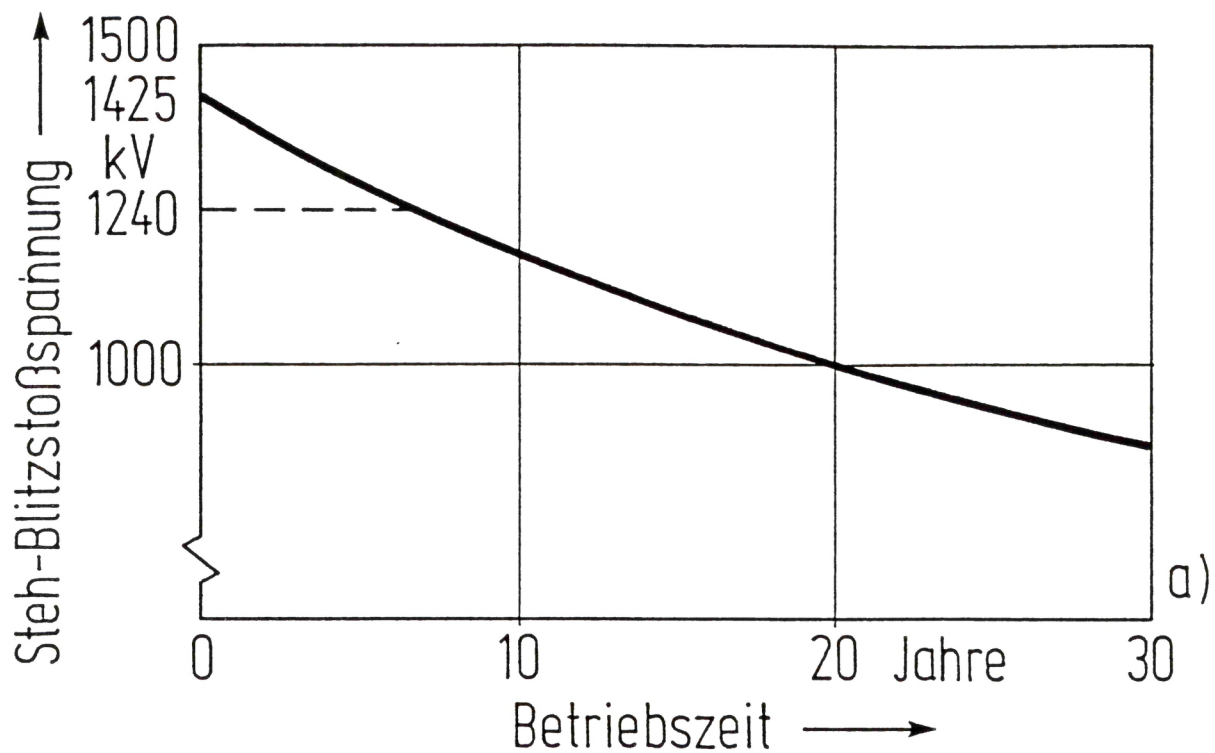


Bild 7 : Steh-Blitzstoßspannung (a) und Fehlerrisiko (b) eines Transformators mit alternder Isolation abhängig von der Betriebszeit.

- 1 : jährliches Risiko
- 2 : mittleres Risiko

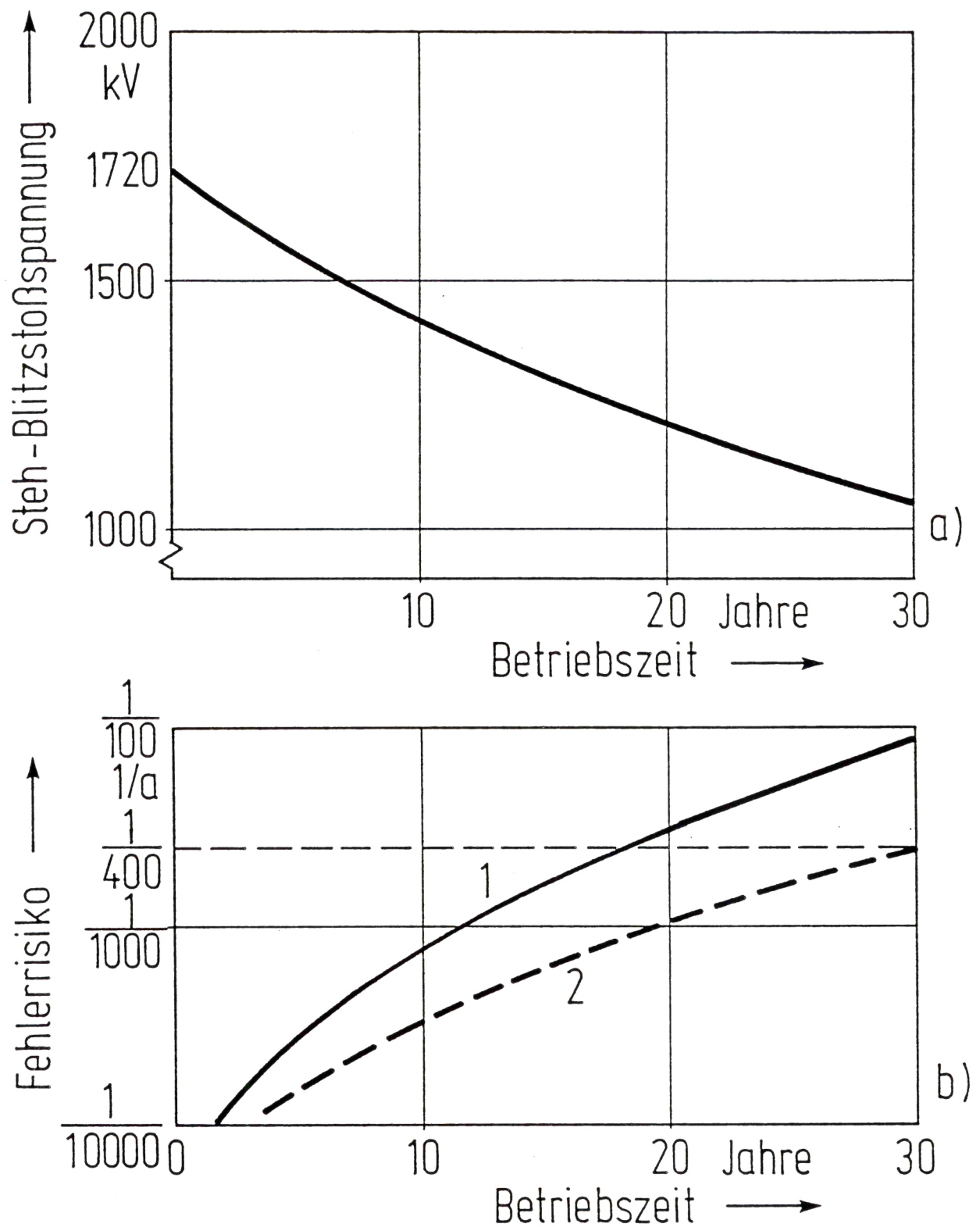


Bild 8 : Steh-Blitzstoßspannung (a) und Fehlerrisiko (b) eines Transformators mit alternder Isolation abhängig von der Betriebszeit.

Mittleres Fehlerrisiko = 1/400 Jahren in 30 Jahren

1 : Jährliches Risiko

2 : Mittleres Risiko

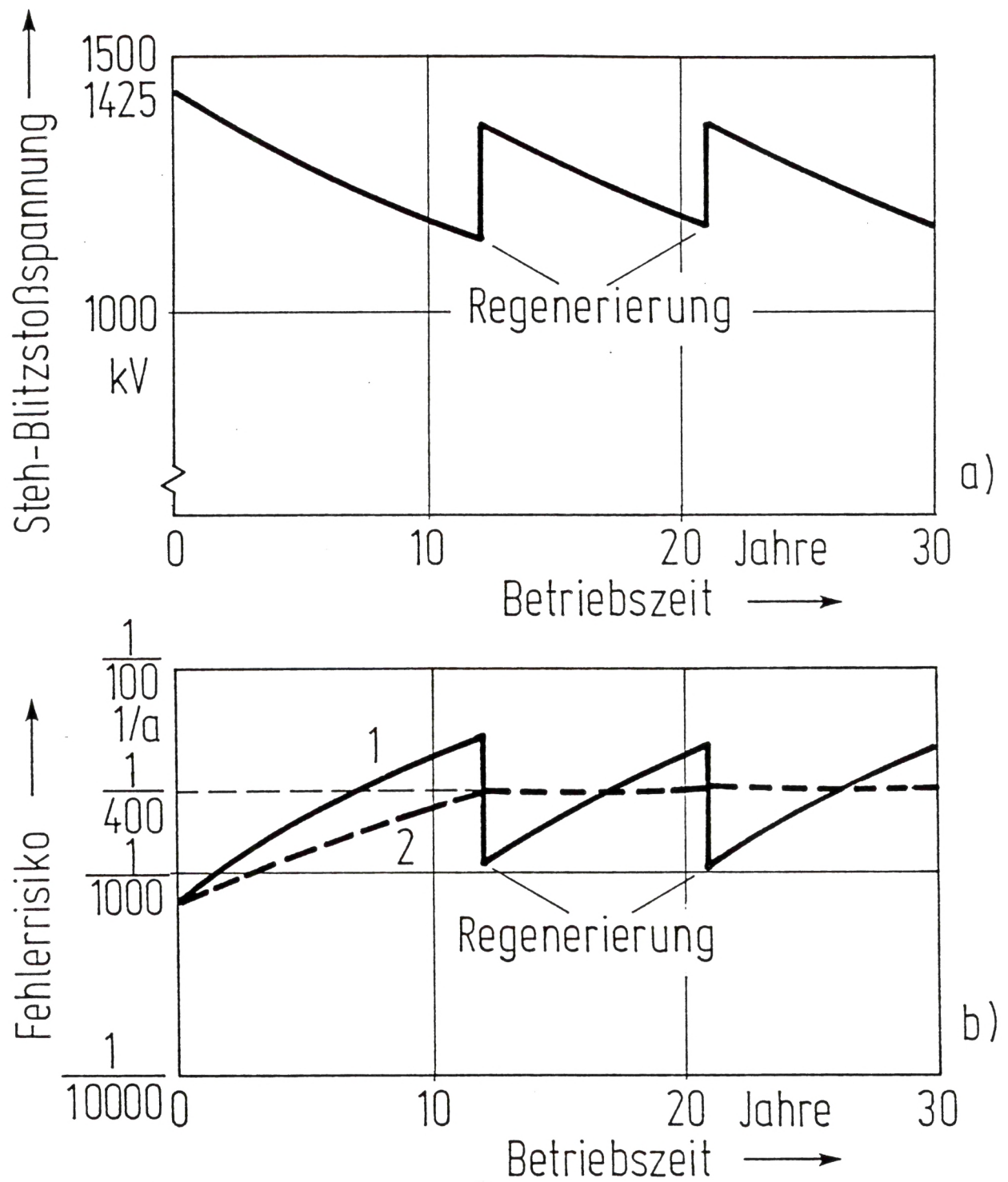


Bild 9 : Steh-Blitzstoßspannung (a) und Fehlerrisiko (b) eines Transformators mit regenerierter Isolation abhängig von der Betriebszeit.

Mittleres Fehlerrisiko = 1/400 Jahren in 30 Jahren

1 : Jährliches Risiko

2 : Mittleres Risiko

SCHRIFTTUM

- [1] DIN VDE 0111, Teil 1
Isolationskoordination für Betriebsmittel in Drehstromnetzen
über 1 kV.
Isolation Leiter gegen Erde.
- [2] K.-H. Weck
Principles and procedures of insulation co-ordination.
IEEE Proc. Vol 134, Pt C (1987) S. 145-152
- [3] W. Heiß, J. Sattler, W. Stolz
Schadensrisiko von Mittelspannungs-Schaltanlagen durch
Überspannungen bei betrieblicher Alterung der Isolation.
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 86 (1987) S. 344-350
- [4] DIN VDE 0536
Belastbarkeit von Öltransformatoren.
- [5] DIN VDE 0446
Isolatoren für Freileitungen, Fahrleitungen und
Fernmeldeleitungen.
- [6] DIN VDE 0273
Kabel mit Isolierung aus vernetztem Polyäthylen.

- [7] DIN VDE 0670
Wechselstromschaltgeräte für Spannungen über 1 kV.
Teil 8 : Gasisolierte metallgekapselte Hochspannungs-
schaltanlagen für Nennspannungen von 72,5 kV
und darüber.
- [8] DIN VDE 0532
Transformatoren und Drosselpulen.
Teil 1 : Allgemeines
Teil 3 : Isolationspegel und Spannungsprüfungen
- [9] F. Flottmeyer
Erfahrungen bei der Betriebsüberwachung von
Großtransformatoren.
ETG Fachbericht ISBN 3-8007-1127-3, 1977