

Analyse und Bewertung der Anforderungen an das Leistungsvermögen der Betriebsmittel im Falle von temporären Netzzuständen mit Spannungen oberhalb von U_m

Oktober 2019

**Analyse und Bewertung der Anforderungen an das
Leistungsvermögen der Betriebsmittel im Falle von
temporären Netzzuständen mit Spannungen oberhalb
von U_m**

Prof. Dr.-Ing. C. Neumann



Prof. Dr.-Ing. V. Hinrichsen



Oktober 2019

Analyse und Bewertung der Anforderungen an das Leistungsvermögen der Betriebsmittel im Falle von temporären Netzzuständen mit Spannungen oberhalb U_m

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	1
Verwendete Abkürzungen und Formelzeichen	3
Zusammenfassung.....	5
1. Einleitung	11
2. Betrieb mit Spannungen $>U_m$ aus Sicht der Vorschriften und Richtlinien	12
2.1. Begriffe und Definitionen in den VDE-Vorschriften	12
2.2. Internationale und nationale Network Codes	13
3. Randbedingungen für den Betrieb mit Spannungen $>U_m$: Betrieb bei temporären Überspannungen, Zeitdauer, kritische Situationen	15
3.1. Sichtung und Analyse der Erfahrungswerte bei Übertragungs- und Verteilnetzbetreibern	15
3.1.1. Übertragungsnetzbetreiber.....	15
3.1.2. Verteilnetzbetreiber	17
3.2. Szenarien für das Auftreten von betriebsfrequenten Spannungen $>U_m$	18
3.2.1. Zuschaltung von langen Kabelstrecken oder Hybrid-Leitungen (Szenario 1)...	19
3.2.2. Wegfall von Erzeugungseinheiten (Szenario 4).....	20
4. Grundsätzliche Auslegung von Betriebsmitteln, Prüfvorschriften und angenommene Randbedingungen.....	22
5. Mögliche Einschränkungen der Funktionalität von Betriebsmitteln bei Betrieb mit Spannungen $>U_m$	24
5.1. Freileitungen	24
5.2. Freiluft-Schaltanlagen	25
5.3. GIS-Anlagen.....	25
5.4. Schaltgeräte.....	26
5.4.1. Leistungsschalter, Schalten von Kurzschlussströmen	26
5.4.1.1. <i>Klemmenkurzschluss</i>	27
5.4.1.2. <i>Abstandskurzschluss</i>	30
5.4.1.3. <i>Teilkurzschlussströme</i>	32
5.4.2. Leistungsschalter, Schalten von kapazitiven Strömen.....	32
5.4.2.1. <i>Ausschalten von Leitungen</i>	32
5.4.2.2. <i>Einschalten von Leitungen</i>	35
5.4.3. Ausschalten von kleinen induktiven Strömen	36
5.4.3.1. <i>Stromabriss</i>	36

5.4.3.2. Überspannungen.....	37
5.4.3.3. Einschwingspannung.....	39
5.4.3.4. Wiederezündungen.....	41
5.4.4. Trennschalter.....	41
5.4.4.1. GIS-Trennschalter.....	41
5.4.4.2. Freiluft-Trennschalter.....	43
5.5. Transformatoren.....	43
5.6. Drosselspulen.....	45
5.7. Strom- und Spannungswandler.....	45
5.7.1. Genauigkeit.....	45
5.7.2. Kippschwingungen.....	45
5.8. Überspannungsableiter.....	48
5.9. Kabelanlagen.....	49
5.10. Zusammenfassende Bewertung.....	50
6. Einfluss von Spannungen $> U_m$ auf das Langzeit- und Alterungsverhalten abhängig von Dauer und Häufigkeit des Auftretens.....	54
6.1. Szenario 1: Zweimal pro Woche für jeweils 30 min Beanspruchung mit einer zeitweiligen Überspannung von $1,05 \cdot U_m$ über eine Betriebszeit von 40 Jahren.....	54
6.1.1. Freileitungen.....	54
6.1.2. Freileiluft-Schaltanlagen.....	54
6.1.3. Schaltgeräte.....	54
6.1.4. GIS-Schaltanlagen.....	55
6.1.5. Strom- und Spannungswandler.....	57
6.1.6. Leistungstransformatoren.....	57
6.1.7. Überspannungsableiter.....	60
6.1.8. Kabelanlagen.....	60
6.2. Zusammenfassende Bewertung der Lebensdauer von Betriebsmitteln des 380-kV-Netzes sowie des 220-kV- und 110-kV-Netzes bei kurzzeitiger Beanspruchung mit $1,05 \cdot U_m$	63
6.3. Szenario 2: Mögliche Alterung bzw. Lebensdauerverkürzung durch zeitweilige Überspannung von $1,025 \cdot U_m$ mit längerer Beanspruchungsdauer.....	63
6.3.1. GIS-Schaltanlagen.....	63
6.3.2. Leistungstransformatoren.....	64
6.3.3. Kabelanlagen.....	65
6.4. Zusammenfassende Bewertung der Lebensdauer von 420-kV-Betriebsmitteln bei längerer Beanspruchung mit 102,5% der dauernd zulässigen Betriebsspannung.....	66
7. Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen.....	67
8. Schrifttum.....	69
Anhang: Zu den Autoren.....	72

Verwendete Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

AKS	Abstandskurzschluss
AWE	Automatische Wiedereinschaltung
FNN	Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE
KKS	Klemmenkurzschluss
STATCOM	Statische Kompensationseinrichtung
T10	10 %-Klemmenkurzschlussstrom
T30	30 %-Klemmenkurzschlussstrom
TAR	Technische Anschlussregel
USCD	Unified specific creepage distance

Formelzeichen

C_L	Kapazität der induktiven Last
C_N	Kapazität des speisenden Netzes
C_P	Schaltstreckenkapazität
C_t	resultierende Kapazität parallel zu Schaltstrecke
$E_{d0,01\%}$	0,01 %-Durchschlagsfeldstärke (Durchschlagsfeldstärke mit 0,01 %-Durchschlagswahrscheinlichkeit)
$E_{d50\%}$	50 %-Durchschlagsfeldstärke
$E_{d99,99\%}$	99,99 %-Durchschlagsfeldstärke
f	aktuelle Netzfrequenz
f_r	Bemessungsfrequenz
I_k	Bemessungskurzschlussstrom
I_{k1e}	einpoliger Erdkurzschlussstrom
I_{k3}	dreipoliger Kurzschlussstrom
I_L	Abstandskurzschlussstrom
i_{ch}	Abreißstrom
k_a	Überspannungsfaktor beim Ausschalten des Magnetisierungsstromes eines Transformators
k_c	kapazitiver Spannungsfaktor
k_{pp}	Polfaktor
k_{tov}	Verhältnis der gemäß Spannungs-Zeit-Kennlinie eines Ableiters zulässigen betriebsfrequenten Spannung zur Bemessungsspannung des Ableiters
L_b	Streuinduktivität zwischen Netz und Schalter
L_L	Induktivität der induktiven Last
L_N	Kurzschlussinduktivität des speisenden Netzes
L_P	Schaltstreckeninduktivität
P_r	Bemessungsleistung eines Transformators
s_L	Steilheit der leitungsseitigen Einschwingspannung

T_t	Zeitdauer der betriebsfrequenten Spannung bzw. Überspannung
$U_{90\%_ff_is}$	90 %-Blitzstehstoßspannung der in der Leitung verwendeten Isolatorketten
U_{hf}	max. VFT-Überspannung in p.u.
u_L	leitungsseitige Einschwingspannung
U_m	höchste Spannung für Betriebsmittel
U_{max}	höchste Spannung bei Bemessungsfrequenz, bei der ein Dauerbetrieb der Drosselspule möglich sein muss
U_n	Nennspannung eines Netzes
U_N	Netzspannung
U_r	Bemessungsspannung
u_{max}	Abreißüberspannung
u_N	Leiter-Erd-Spannung des speisenden Netzes
u_{NC}	Spannung an der Kapazität C_L zum Zeitpunkt des Stromabrisses
u_{tr}	Einschwingspannung
W_{ch}	auf Lastseite gespeicherte Energie
X_0	Reaktanz im Nullsystem
X_1	Reaktanz im Mitsystem
Z_0	Wellenwiderstand im Nullsystem
Z_1	Wellenwiderstand im Mitsystem
Z_L	Wellenwiderstand der Leitung
$\frac{C_t \cdot U_r^2}{\alpha P_r}$	"Chop Parameter" in s
α	Verhältnis Magnetisierungsstrom zu Bemessungsstrom
δ	Erdfehlerfaktor
δ_L	Lastabwurffaktor
λ	Abreißzahl
σ	Standardabweichung

Zusammenfassung

Ausgangspunkt für die Betrachtungen sind zum einen die nationalen und internationalen Network Codes und zum anderen geänderte Übertragungsaufgaben. In den europäischen Network Codes wird für das 380-kV-, 220-kV- und 110-kV-Netz in Zentraleuropa eine zeitlich begrenzte Überschreitung der Bemessungsspannung von 420 kV, 245 kV und 123 kV mit 440 kV, 253 kV und 127 kV für mindestens 20 min und maximal 60 min angegeben. In Deutschland wird der normale Spannungsbereich durch netztechnische Maßnahmen in der Regel eingehalten. Durch Änderung der Erzeugungsstruktur und den damit verbundenen Übertragungsaufgaben sind abhängig vom jeweiligen Betriebsfall und von der Anordnung der Blindleistungskompensationseinrichtungen an einigen Netzknoten zeitweilig Spannungen größer U_m nicht auszuschließen. Daneben sind weitere Ausnahmesituationen, wie Systemsplit, Zuschalten von Leitungen mit Teilverkabelung, oder Lastabwurf zu nennen.

Für die bisher eingesetzten Betriebsmittel, die in der Regel für eine dauernde Betriebsspannung U_m von 123 kV, 245 kV und 420 kV spezifiziert sind, ist zu prüfen, inwieweit ein Betrieb bei Spannungen höher als die dauernde Betriebsspannung möglich ist. Dabei ist ein solcher Betriebsfall zunächst aus Sicht der relevanten Vorschriften zu betrachten. Des Weiteren sind mögliche Funktionseinschränkungen und physikalischen Phänomene zu klären, die bei Beanspruchungen mit Spannungen größer als die dauernde Betriebsspannung auftreten.

Im Kapitel 2 wird zunächst der Betrieb mit Spannungen $>U_m$ aus Sicht der Vorschriften und Richtlinien betrachtet. Aus den genannten Definitionen in den Vorschriften kann abgeleitet werden, dass ein dauernder Betrieb eines Betriebsmittels oberhalb der Bemessungsspannung nicht erlaubt ist. Ein Betrieb mit betriebsfrequenter Spannung oberhalb der Bemessungsspannung stellt einen Betrieb bei zeitweiliger Überspannung dar. Inwieweit ein solcher Betriebsfall zulässig ist, muss im Rahmen der Isolationskoordination geklärt werden. Die internationalen und nationalen Network Codes fordern eine Spannung von bis $1,05 \cdot U_m$ für 30 bzw. 60 Minuten, bevor der betreffende Netzknoten vom Netz getrennt wird.

Kapitel 3 geht auf die Randbedingungen für den Betrieb mit Spannungen $>U_m$ ein. Hierzu werden zunächst Erfahrungswerte der Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber analysiert. Dabei zeigen sich deutliche Unterschiede sowohl zwischen den einzelnen Übertragungsnetzbetreibern als auch den Verteilnetzbetreibern. Während in einem betrachteten Übertragungsnetz bis auf zwei Ausnahmesituationen keine Überschreitungen von U_m auftreten, kommt es bei einem anderen in einigen Umspannanlagen zu Überschreitungen von 1...2%, die z. T. über mehrere Stunden andauern. Bei einem städtisch geprägten Verteilnetzbetreiber ist die Spannung in den repräsentativen Umspannanlagen mehr oder weniger konstant und liegt mit 110 kV immer deutlich unter U_m . In einem anderen städtisch und ländlich geprägten Verteilnetz sind die Spannungsschwankungen ausgeprägter, und es können sporadische Überschreitungen von U_m auftreten. In einigen wenigen Umspannanlagen wurden sogar Überschreitungen von U_m um mehr als 5% über mehrere Stunden festgestellt.

Die von der FNN-Projektgruppe „Spannungsfestigkeit“ aufgeführten Szenarien für das Auftreten von betriebsfrequenten Spannungen $>U_m$ konnten für das Szenario „Zuschaltung von langen Kabelstrecken oder Hybrid-Leitungen“ anhand von Simulationsrechnungen und für das Szenario „Wegfall von Erzeugungseinheiten“ anhand eines aktuellen Fallbeispiels belegt werden.

Das Kapitel 4 befasst sich mit der grundsätzlichen Auslegung von Betriebsmitteln auf Basis der Prüfvorschriften und der angenommenen Randbedingungen. Betriebsmittel für das Hoch-

und Höchstspannungsnetz werden für eine Lebensdauer von 40 bis 50 Jahren ausgelegt. Die Auslegung erfolgt gemäß internationaler Normen (IEC Standards), die eine Vielzahl von betrieblichen Anforderungen, jedoch nicht 100% aller im Betrieb auftretenden Bedingungen abdecken. Andererseits werden bei den Typprüfungen Annahmen getroffen, die unter Netzbedingungen nur sehr selten oder gar nicht auftreten. Es ist Aufgabe des Betreibers, die Einsatzbedingungen und die Anforderungen zu analysieren und die entsprechende Bemessung zu spezifizieren.

Im vorliegenden Fall wird nur der Einfluss der elektrischen Beanspruchungen betrachtet. Der prüftechnische Nachweis, dass das betreffende Betriebsmittel in der Lage ist, die betriebliche Dauerbeanspruchung über die angenommene Lebensdauer zu beherrschen, erfolgt durch eine Prüfung mit Langzeit-Stehwechselfspannung, meist für eine Dauer von 30...60 min. Bei einigen Betriebsmitteln wird dieser Nachweis auch durch eine Prüfung mit Kurzzeit-Stehwechselfspannung, Prüfdauer meist 1 min, vorgenommen. Die ausreichende Festigkeit gegenüber zeitweiligen Überspannungen wird durch die Prüfung mit Kurzzeit- oder Langzeit-Stehwechselfspannung nachgewiesen.

Im Folgenden ist insbesondere das Verhalten bei zeitweiligen Überspannungen von Interesse. Basierend auf den Analysen der Daten der Netzbetreiber und den nationalen und europäischen Network Codes wird angenommen, dass die betreffenden Betriebsmittel zweimal pro Woche für jeweils 30 min mit einer zeitweiligen Überspannung von $1,05 \cdot U_m$ beansprucht werden. Es ist zu prüfen, ob durch diese Beanspruchungen eine Funktionseinschränkung der Betriebsmittel zu erwarten ist und ob diese über die Betriebszeit akkumuliert zu einer merklichen Verkürzung der Lebensdauer führen. Die beiden Fragestellungen werden für die verschiedenen Betriebsmittel – Freileitungen, Freiluftschaltanlagen, Schaltgeräte, gasisolierte Schaltanlagen, Strom- und Spannungswandler, Leistungstransformatoren, Überspannungsableiter und Kabelanlagen – auf Basis der einschlägigen Vorschriften und der Fachliteratur betrachtet.

Kapitel 5 beschäftigt sich mit möglichen Funktionseinschränkungen der vorgenannten Betriebsmittel bei $1,05 \cdot U_m$.

Der Betrieb einer Freileitung mit $1,05 \cdot U_m$ hat keine Auswirkung auf die grundsätzliche Bemessung der Abstände einer Freileitung, da hierfür die Blitzstehstoßspannung der Isolatoren maßgeblich ist. Das Koronaverhalten der Leiterseile und Armaturen sowie der vereinheitlichte spezifische Kriechweg der Isolatoren sind in der Regel so bemessen, dass sie auch den Anforderungen bei $1,05 U_m$ genügen.

Die Mindestabstände in Freiluft-Schaltanlagen im 110-kV- und 220-kV-kV-Netz werden durch die Bemessungs-Blitzstoßspannung und im 380-kV-Netz durch die Bemessungs-Schaltstoßspannung bestimmt. Die Bemessungs-Blitzstoßspannung ist von der atmosphärischen Überspannung abgeleitet. Für die Bemessungs-Schaltstoßspannung wird in der Regel ein Wert von 1 050 kV angesetzt, ausgehend von Schaltüberspannungen von 2,9 p.u., die aber in deutschen 380-kV-Netzen aber gar nicht auftreten. Daher ist die Bemessung der Mindestabstände von aktiven Teilen in Freiluft-Schaltanlagen auch bei Beanspruchung mit $1,05 \cdot U_m$ ausreichend sicher.

Für die Auslegung von gasisolierten Schaltanlagen (GIS) ist die Bemessungs-Blitzstoßspannung maßgebend, die von äußeren Überspannungen abgeleitet wird und von der Betriebsspannung nicht beeinflusst wird. Daneben soll die Bemessungs-Blitzstoßspannung auch eine ausreichende Spannungsfestigkeit gegenüber inneren Überspannungen beim Schalten von Trennschaltern nachweisen. Da die sehr schnell ansteigenden Überspannungen

kleiner sind als die Koordinations-Stehblitzstoßspannung, sind diese durch die Bemessungs-Blitzstoßspannung abgedeckt.

Ist am Netzknoten bei erhöhter Spannung von $1,05 \cdot U_m$ mit Kurzschlussströmen im Bereich des Bemessungs-Kurzschlussstromes des Leistungsschalters zu rechnen, sind die Netzverhältnisse im Kurzschlussfall zu prüfen. Ist das Verhältnis $X_0/X_1 < 2,5$, so ist in starr geerdeten Netzen beim dreipoligen Kurzschluss der Polfaktor $k_{pp} < 1,3$ und somit die Wiederkehrspannung kleiner als die gemäß Norm geprüfte. In solchen Fällen ist davon auszugehen, dass der Schalter diesen Kurzschlussfall auch bei einer Spannung von $1,05 \cdot U_m$ beherrscht.

Der Abstandskurzschluss wird gemäß Norm mit einem Kurzschlussstrom bezogen auf den Bemessungs-Kurzschlussstrom geprüft. In der Praxis wird dieser Kurzschlussfall durch einen einpoligen Fehler verbunden mit einem Erdkurzschlussstrom in Höhe von 85...90 % des dreipoligen Kurzschlussstromes ausgelöst, sodass auch die kritische Anfangsteilheit geringer sein wird. Somit sollte auch dieser Schaltfall beherrscht werden.

Kurzschlüsse ohne Erdberührung sind äußerst selten. Daher kann auch beim Schalten von Teilkurzschlussströmen von einem Polfaktor $k_{pp} \leq 1,3$ ausgegangen werden, sofern der Transformator-Sternpunkt geerdet ist, sodass die Amplitude der Einschwingspannung nur 87 % des Normwertes beträgt. Somit sollte dieser Schaltfall auch bei $1,05 \cdot U_m$ beherrscht werden. Kann der Transformator-Sternpunkt aus netztechnischen Gründen nicht geerdet werden, ist eine Analyse der Einschwingbedingungen unter Berücksichtigung der Eigenfrequenz des Transformators und eine Klärung erforderlich, ob dieser Schaltfall vom eingesetzten Schalter beherrscht wird.

Beim Ausschalten von nicht kompensierten Leitungen bei Spannungen von $1,05 \cdot U_m$ sind Rückzündungen nicht auszuschließen. Erfolgt die Zuschaltung der Leitung bei einer Spannung von $1,05 \cdot U_m$, sind sowohl der betriebsfrequente als auch der transiente Ausgleichsvorgang ausgeprägter. Auswirkungen auf den Leistungsschalter am Leitungsanfang und am Leitungsende durch die transienten Überspannungen sind aber nicht zu erwarten, da diese durch die Bemessung gemäß Norm abgedeckt sind.

Das Schalten von kleinen induktiven Strömen bei Spannungen von $1,05 \cdot U_m$ kann vermehrt Wiederzündungen zur Folge haben. Wiederzündungen können grundsätzlich durch gesteuertes Schalten vermieden werden. Bei Einstellung des Auslösezeitpunktes sollte aber überprüft werden, ob die Funktionalität auch bei erhöhter Betriebsspannung gewährleistet ist.

Das Schalten von kleinen kapazitiven Strömen mit GIS-Trennschaltern sollte auch bei $1,05 \cdot U_m$ möglich sein, da dieser Schaltfall gemäß Norm mit der 1,1-fachen Phasenspannung auf der Speiseseite und der 1,1-fachen Spannung als Vorladung auf der Lastseite geprüft wird. Bei Freiluft-Trennschaltern ist mit einer geringfügig längeren Schaltdauer zu rechnen, die sich allerdings im Bereich der statistischen Streuung bewegen wird.

Spannungen von $1,05 \cdot U_m$ können an Transformatoren zu einer im Dauerbetrieb unzulässigen Übererregung führen. Da diese aber nur kurzzeitig wirkt, ist keine unzulässige Übererwärmung zu erwarten. In jedem Fall muss aber mit gegenüber der Bemessungsspannung höheren Geräuschen gerechnet werden, ebenso wie bei den nach Network Codes zulässigen Unterfrequenzen. Als kurzschlussfest geltende Transformatoren sollten die stärkere mechanische Beanspruchung durch den höheren Inrush-Strom bei Zuschaltung mit $1,05 \cdot U_m$ beherrschen. Dennoch ist zu prüfen, wie die Schutzgeräte auf die höheren Amplituden des Einschaltstromes reagieren.

Beim Betrieb von Drosselspulen mit Spannungen von $1,05 \cdot U_m$ muss mit einer höheren Verlustleistung gerechnet werden. Diese höhere Verlustleistung wird aber nur für maximal 30 Minuten wirken und in der Regel nicht bei der für die Bemessung angenommenen maximalen Betriebstemperatur von 40°C auftreten, sodass keine unzulässige Übertemperatur zu erwarten ist. In jedem Fall werden aber höheren Geräusche auftreten, da die Geräusche bei Bemessungsspannung und Bemessungsstrom definiert sind.

Gemäß Norm ist auch Genauigkeit von Strom- und Spannungswandlern bei Spannungen von $1,05 \cdot U_m$ gewährleistet. Durch induktive Spannungswandler in bestimmten Netz- und Anlagenkonfigurationen angeregte stationäre Kippschwingungen können durch Einsatz von Spannungswandlern mit Luftspaltkern vermieden werden. Es ist anzunehmen, dass diese Wandler auch bei $1,05 \cdot U_m$ ein ausreichendes Dämpfungsverhalten aufweisen.

Bei den in deutschen Netzen üblichen Überspannungsableitern ist auch bei einer Spannung von $1,05 \cdot U_m$ keine thermische Überbeanspruchung zu erwarten. Lediglich in 110-kV-Netzen mit Erdschlusskompensation könnten Ableiter bei Vorbeanspruchung in Höhe der vollen Nennenergie instabil werden, wobei dieser Fall als selten einzustufen ist. Trifft er zu, ist das thermische Verhalten anhand der Herstellerangaben genauer zu überprüfen.

Die an Kabelanlagen im Rahmen der Typ- und Vorortprüfungen durchgeführten Spannungsprüfungen mit einer Prüfdauer von 30 bis 60 min führen zu deutlich höheren Beanspruchungen als Spannungen von $1,05 \cdot U_m$. Funktionseinschränkungen sind daher unter diesem Gesichtspunkt nicht zu erwarten.

In Kapitel 6 wird der Einfluss von Spannungen $> U_m$ auf das Langzeit- und Alterungsverhalten abhängig von Dauer und Häufigkeit des Auftretens untersucht. Basierend auf den Analysen der Daten der Netzbetreiber und den nationalen und europäischen Network Codes werden zwei Szenarien betrachtet. Zunächst wird die bisher angenommene Beanspruchung der betreffenden Betriebsmittel zweimal pro Woche für jeweils 30 min mit einer zeitweiligen Überspannung von $1,05 \cdot U_m$ über eine Betriebszeit von 40 Jahren akkumuliert und daraus der Lebensdauerverbrauch abgeleitet. Anschließend wird untersucht, bei welcher Beanspruchungsdauer eine zeitweilige Überspannung von nur $1,025 \cdot U_m$ zu einer merklichen Alterung bzw. Lebensdauerverkürzung führen würde.

Die Betrachtungen gehen davon aus, dass die ausreichende elektrische Langzeitfestigkeit durch eine in den Normen angegebene Kurzzeit- bzw. Langzeit-Stehwechselspannungsprüfung nachzuweisen ist. Das Alterungsverhalten wird aus der Spannungszeitcharakteristik – Lebensdauer abhängig von der angelegten Spannung, engl.: V-t characteristic – hergeleitet.

Die Überlegungen beziehen sich vorrangig auf Betriebsmittel des 380-kV-Netzes. Die Erkenntnisse können auch auf Betriebsmittel des 110-kV- und 220-kV-Netzes übertragen werden, da für diese Betriebsmittel das Verhältnis Kurzzeitwechselspannung zu Bemessungsspannung in der Regel größer als ist als für Betriebsmittel des 380-kV-Netzes.

Die angenommene kurzzeitige Beanspruchung von Betriebsmitteln des 380-kV-Netzes mit 105 % der dauernd zulässigen Betriebsspannung zweimal pro Woche für jeweils 30 min führt nicht zu einer signifikanten Lebensdauerverkürzung. Eine dauernde Beanspruchung mit 105 % würde jedoch eine deutliche Lebensdauerverkürzung um mindestens 50 % bewirken. Daher kann eine solche Beanspruchung nicht nur auf Grund der geltenden Vorschriften, sondern auch aus physikalischen Gründen nicht zugelassen werden. Die Aussage kann auch auf Betriebsmittel des 110-kV- und 220-kV-Netz übertragen werden.

Die Untersuchungen des Lebensdauerverhaltens bei zeitweiligen Überspannungen von $1,025 \cdot U_m$ bezieht sich auf die drei Betriebsmittel GIS, Transformatoren und Kabel, für deren Isoliersystem die Alterungsindizes aus der Literatur bekannt sind. Ein Dauerbetrieb mit Betrieb mit 102,5% der dauernd zulässigen Betriebsspannung führt bei den Isoliersystemen der hier betrachteten Betriebsmittel zu einer deutlichen Lebensdauerverkürzung. Der Lebensdauerverbrauch liegt bei den Isoliersystemen der Betriebsmittel GIS und Kabel bei 10 Jahren bzw. 12 Jahren. Die Lebensdauer des Transformator-Isoliersystems wird sogar noch deutlicher verkürzt. Derartige Betriebszustände müssen daher zeitlich begrenzt werden. Lässt man eine Lebensdauerverkürzung um 10% zu, so darf die akkumulierte Betriebszeit mit einer Spannung von $1,025 \cdot U_m$ höchstens 4 Jahre betragen.

Das Kapitel 7 fasst die Schlussfolgerungen zusammen und gibt Handlungsempfehlungen. Ein zeitweiliger Betrieb des Hoch- und Höchstspannungsnetzes mit Spannungen von 105% der höchsten Spannung für Betriebsmittel U_m stellt einen Betrieb bei zeitweiliger Überspannung dar. Dieser ist zulässig und wird von den Betriebsmitteln in der Regel beherrscht. Funktionseinschränkungen sind in den meisten Fällen nicht zu erwarten, da unter realen Netzbedingungen die dann auftretenden Betriebsbedingungen durch die Annahmen in betreffenden Normen größtenteils noch abgedeckt sind. Die angenommenen Beanspruchung mit $1,05 \cdot U_m$ zweimal pro Woche für jeweils 30 Minuten würde über eine Betriebszeit von 40 Jahren akkumuliert keine signifikante Lebensdauerverringerung verursachen. Auch unter Gesichtspunkten der Alterung der eingesetzten Isoliermedien ist mit keiner technisch relevanten Verkürzung der Lebensdauern zu rechnen.

Bei einigen Betriebsmitteln könnten bei Betrieb mit $1,05 \cdot U_m$ unter besonderen Betriebsbedingungen gewisse Funktionseinschränkungen auftreten. In diesen Fällen werden die im Folgenden angegebenen Maßnahmen empfohlen.

Leistungsschalter

Wenn in Anlagen mit Kurzschlussströmen im Bereich des Bemessungs-Kurzschlussstromes mit erhöhten Betriebsspannungen zu rechnen ist, sollte anhand der konkreten Netzbedingungen geprüft werden, ob die eingesetzten Leistungsschalter Schaltfälle im Grenzleistungsbereich, insbesondere Klemmenkurzschlüsse, beherrschen. Gegebenenfalls müssen Leistungsschalter mit höherem Bemessungs-Kurzschlussstrom eingesetzt werden.

Werden leerlaufende, nicht kompensierte Leitungen bei erhöhter Betriebsspannung von $1,05 \cdot U_m$ ausgeschaltet, so sind Rückzündungen nicht mehr auszuschließen. In diesen Fällen wird gesteuertes Schalten der Leistungsschalter empfohlen.

Transformatoren

Bei Transformatoren muss bei Betrieb mit $1,05 \cdot U_m$ mit deutlich höheren Geräuschen gerechnet werden. Ob eine im Kurzzeitbetrieb unzulässige Übererregung auftreten kann, ist gegebenenfalls zu klären.

Drosselspulen

Beim Betrieb von Drosselspulen mit $1,05 \cdot U_m$ sind neben verstärkten Geräuschen auch höhere Kupfer- und Eisenverluste zu erwarten. Es ist zu überprüfen, ob die zusätzlichen Verluste zu einer unzulässigen Übererwärmung im Kurzzeitbetrieb führen können.

Spannungswandler

Zur Vermeidung von stationären Kippschwingungen wird der Einsatz von induktiven Spannungswandlern mit Luftspalt-Kernen empfohlen. Das ausreichende Dämpfungsverhalten bei $1,05 \cdot U_m$ sollte versuchstechnisch oder durch Simulation überprüft werden.

Überspannungsableiter

Tritt im gelöschten betriebenen 110-kV-Netz ein Erdschluss bei der erhöhten Betriebsspannung von $1,05 \cdot U_m$ auf, so ist bei einer Fehlerdauer ≥ 30 Minuten eine thermische Überbeanspruchung der Ableiter nach Norm nicht gänzlich auszuschließen. In solchen Fällen ist das thermische Verhalten der Ableiter anhand der Herstellerangaben genauer zu überprüfen.

Kabelanlagen

Neben den hier betrachteten VPE-Kabeln sind im deutschen Hoch- und Höchstspannungsnetz noch Gasaußendruckkabel und Ölkabel im Einsatz. Bei diesen Kabelsystemen wirkt nicht die dielektrische sondern möglicherweise die thermische Alterung Lebensdauer begrenzend.

Die angenommene Häufigkeit und Dauer der Beanspruchungen mit $1,05 \cdot U_m$ führt zu keiner signifikanten Lebensdauerverkürzung der betrachteten Betriebsmittel. Eine deutlich größere Häufigkeit und/oder Beanspruchungsdauer hätte aber negative Auswirkungen auf die Lebensdauer der Betriebsmittel. Ein dauernder Betrieb mit $1,05 \cdot U_m$ würde basierend auf der in den Vorschriften zugrunde gelegten Bemessung zu einer deutlichen Lebensdauerverringering führen und ist unter Berücksichtigung der einschlägigen Normen nicht zulässig. Selbst der dauernde Betrieb mit einer geringeren Spannung oberhalb der Betriebsspannung, z. B. mit $1,025 \cdot U_m$ würde zu einer beschleunigten Alterung führen. Betriebszustände mit Spannungen oberhalb von U_m sind daher auf das für die Netzsicherheit notwendige Maß zu beschränken. Sie dürfen nicht zur Lastflusssteuerung oder zum Vermeiden von Überlastsituationen eingesetzt werden.

1. Einleitung

In den letzten Jahren sind auf europäischer Ebene Network Codes veröffentlicht worden, deren Anforderungen nicht eindeutig in den internationalen, europäischen und nationalen Industrienormen (IEC, CENELEC, VDE) abgebildet sind. Zwar entsprechen in der Regel die maximal dauernd zulässigen Spannungen in den Network Codes mit 420 kV, 245 kV und 123 kV der Bemessungsspannung U_r der eingesetzten Betriebsmittel, doch in den Network Codes ist eine zeitlich begrenzte Überschreitung dieser Spannung auf 440 kV, 253 kV und 127 kV zugelassen. Die zeitliche Begrenzung für Zentraleuropa wird mit mindestens 20 min und maximal 60 min angegeben. In den deutschen TARs für den Anschluss von Erzeugungseinheiten wird eine Maximaldauer von 30 min genannt.

In Deutschland wird der normale Spannungsbereich $\leq U_m$ durch netztechnische Maßnahmen, wie Einsatz von Transformatoren mit Spannungsregeleinrichtungen und Kompensationseinrichtungen (z.B. rotierender Phasenschieber, Kompensationsdrossel oder STATCOM) in der Regel eingehalten. Die Änderung der Erzeugungsstruktur von verbrauchernaher zu verbraucherferner Erzeugung stellt allerdings neue Anforderungen an die Spannungshaltung im Hoch- und Höchstspannungsnetz. Abhängig vom jeweiligen Betriebsfall – Starklast oder Schwachlast – und von der Anordnung der Blindleistungskompensationseinrichtungen sind an einigen Netzknoten zeitweilig Spannungen größer U_m nicht auszuschließen. Daneben sind weitere Ausnahmesituationen, wie Systemsplit, Zuschalten von Leitungen mit Teilverkabelung, oder Lastabwurf zu nennen.

Da die bisher im 110-kV-, 220-kV- und 380-kV-Netz eingesetzten Betriebsmittel in der Regel für eine dauernde Betriebsspannung von 123 kV, 245 kV und 420 kV spezifiziert sind, ist zu prüfen, inwieweit mit diesen Betriebsmitteln ein Betrieb bei Spannungen höher als die dauernde Betriebsspannung möglich ist. Dabei soll ein solcher Betriebsfall zunächst aus Sicht der relevanten Vorschriften betrachtet werden. Zum anderen sollen mögliche Funktionseinschränkungen und physikalische Phänomene untersucht werden, die bei Beanspruchungen mit Spannungen größer als die dauernde Betriebsspannung auftreten. Zur Beurteilung sollen Beanspruchungen, die sich aus den in verschiedenen Vorschriften angeführten Prüfbedingungen ergeben, herangezogen werden.

2. Betrieb mit Spannungen >U_m aus Sicht der Vorschriften und Richtlinien

2.1. Begriffe und Definitionen in den VDE-Vorschriften

In den VDE-Vorschriften werden folgende Spannungsbegriffe verwendet:

- DIN EN 60038, April 2012 [7]:

Abschnitt 3.1 Nennspannung eines Netzes

geeigneter, gerundeter Spannungswert zur Bezeichnung oder Identifizierung eines Netzes

Abschnitt 3.2 Höchste Spannung eines Netzes

(ausgenommen transiente oder anomale Bedingungen)

höchster Wert der Betriebsspannung, der unter normalen Betriebsbedingungen zu einem beliebigen Zeitpunkt an irgendeiner Stelle des Netzes auftritt

ANMERKUNG: Ausgeschlossen sind transiente Spannungen, z. B. von Schaltvorgängen und zeitweilige Spannungsschwankungen

- VDE 0111 Teil 1 [8],

Abschnitt 3.8: Nennspannung eines Netzes, U_n :

ein geeigneter, gerundeter Spannungswert zur Bezeichnung oder Identifizierung eines Netzes

Abschnitt 3.9: höchste Betriebsspannung eines Netzes, U_s :

höchster Betriebsspannungswert zwischen Außenleitern (Effektivwert) bei Normalbetrieb zu einem beliebigen Zeitpunkt an einem beliebigen Punkt des Netzes

Abschnitt 3.10: höchste Spannung für Betriebsmittel, U_m :

Effektivwert der höchsten Außenleiterspannung, für die ein Betriebsmittel im Hinblick auf seine Isolation und andere Eigenschaften, die sich in den entsprechenden Gerätebestimmungen auf diese Spannung beziehen, bemessen ist. Unter normalen Betriebsbedingungen, wie sie durch die Gerätebestimmungen festgelegt sind, darf ein Betriebsmittel mit dieser Spannung dauernd betrieben werden.

Aus den genannten Definitionen kann abgeleitet werden, dass ein dauernder Betrieb eines Betriebsmittels oberhalb der Bemessungsspannung nicht erlaubt ist. Ein Betrieb mit betriebsfrequenter Spannung oberhalb der Bemessungsspannung stellt einen Betrieb bei zeitweiliger Überspannung dar. Inwieweit ein solcher Betriebsfall zulässig ist, muss im Rahmen der Isolationskoordination geklärt werden. Dazu darf ein Koordinierungsverfahren angewendet werden, das die repräsentative Überspannung durch die Amplituden/Dauer-Häufigkeitsverteilung der im Betrieb zu erwartenden zeitweiligen Überspannungen beschreibt (Abschnitt 2.3.2 in [8]).

Gemäß VDE 0111, Teil 1 sind zeitweilige Überspannungen wie folgt definiert:

Abschnitt 3.17.2: Zeitweilige Überspannung

Überspannung mit Betriebsfrequenz und relativ langer Dauer

ANMERKUNG Die Überspannung kann ungedämpft oder schwach gedämpft sein. In einigen Fällen kann ihre Frequenz um ein Vielfaches kleiner oder größer als die Betriebsfrequenz sein.

Genauere Angaben über Formen der Überspannungen sowie genormte Spannungsform und genormte Stehspannungsprüfung gehen aus Tabelle 1 in [8] hervor. Für die Kategorie „zeitweilige Überspannungen“ gilt Bild 1.

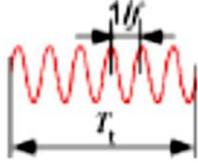
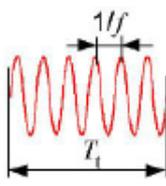
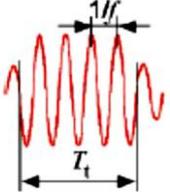
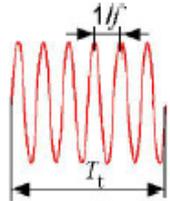
	Spannungs- bzw. Überspannungsform	Bereich der Spannungs- bzw. Überspannungsform	Genormte Spannungsform	Kurzzeitwechselspannungsprüfung
dauernd		$f = 50 \text{ Hz od. } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3600 \text{ s}$	 $f = 50 \text{ Hz od. } 60 \text{ Hz}$	Festzulegen durch das zuständige Geräte-Komitee
zeitweilig		$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_t \leq 3600 \text{ s}$	 $48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$	Kurzzeitwechselspannungsprüfung

Bild 1: Formen der Überspannungen sowie genormte Spannungsform und genormte Stehspannungsprüfung für die Kategorie „dauernde Betriebsspannung“ und „zeitweilige Überspannungen“ (nach [8])

2.2. Internationale und nationale Network Codes

Im Transmission Code 2007 der deutschen Übertragungsnetzbetreiber [1] wird gefordert, dass in das 380-kV-, 220-kV- bzw. 110-kV-Netz einspeisende Erzeugungseinheiten in der Lage sein müssen, Wirkleistung bei einer Spannung von 440 kV, 253 kV bzw. 127 kV einzuspeisen. Als max. Dauer werden 30 min genannt (Bild 2). Erst danach dürfen sich diese vom entsprechenden Netzknotenpunkt trennen.

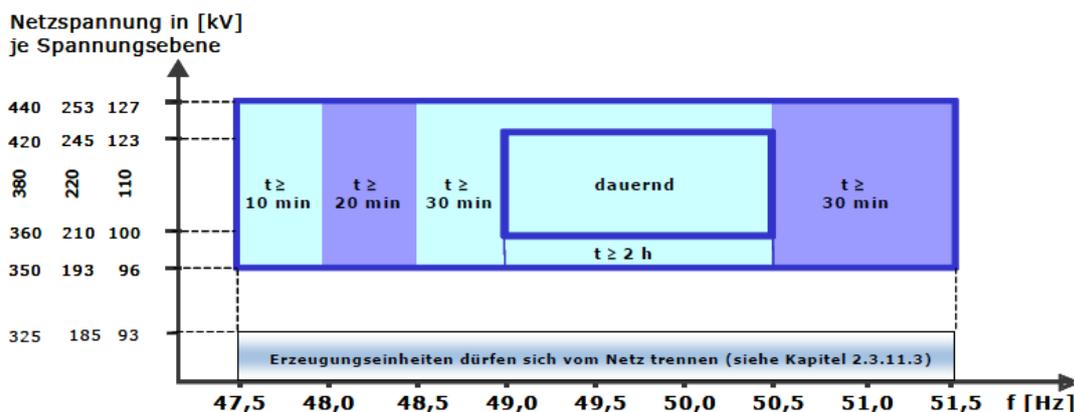


Bild 2: Anforderungen an die Abgabeleistung der Erzeugungseinheiten an das Netz für bestimmte Zeitdauern in Abhängigkeit von Netzfrequenz und Netzspannung [1]

Ein Betrieb von Erzeugungseinheiten bei Spannungen $>U_m$ war allerdings bereits im Grid Code 2000 „Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber“, herausgegeben von der Deutschen Verbundgesellschaft, gefordert worden [2].

Auf europäischer Ebene sind 2016 Network Codes für den Netzanschluss von Generatoren [3] sowie für den Lastanschluss [4] veröffentlicht worden. In beiden Papieren werden am Netzanschlusspunkt für Kontinentaleuropa folgende Spannungen vorgegeben (Tabelle 1).

Tabelle 1: Spannungen am Netzanschlusspunkt für Kontinentaleuropa gem. Network Codes für den Netzanschluss von Generatoren und für den Lastanschluss (nach [3], [4])

Referenzspannung	Spannungsbereich	Dauer
110 kV	99 kV ... 123 kV	unbegrenzt
	123 kV ... 127 kV	min: 20 min, max: 60 min
220 kV	198 kV ... 246 kV	unbegrenzt
	246 kV ... 253 kV	min: 20 min, max: 60 min
400 kV	360 kV ... 420 kV	unbegrenzt
	420 kV ... 440 kV	min: 20 min, max: 60 min

Die Network Codes haben Gesetzescharakter und müssen in nationales Recht überführt werden. In Deutschland ist die Umsetzung über VDE FNN im Rahmen von Technischen Anschlussregeln erfolgt [5], [6].

3. Randbedingungen für den Betrieb mit Spannungen $>U_m$: Betrieb bei temporären Überspannungen, Zeitdauer, kritische Situationen

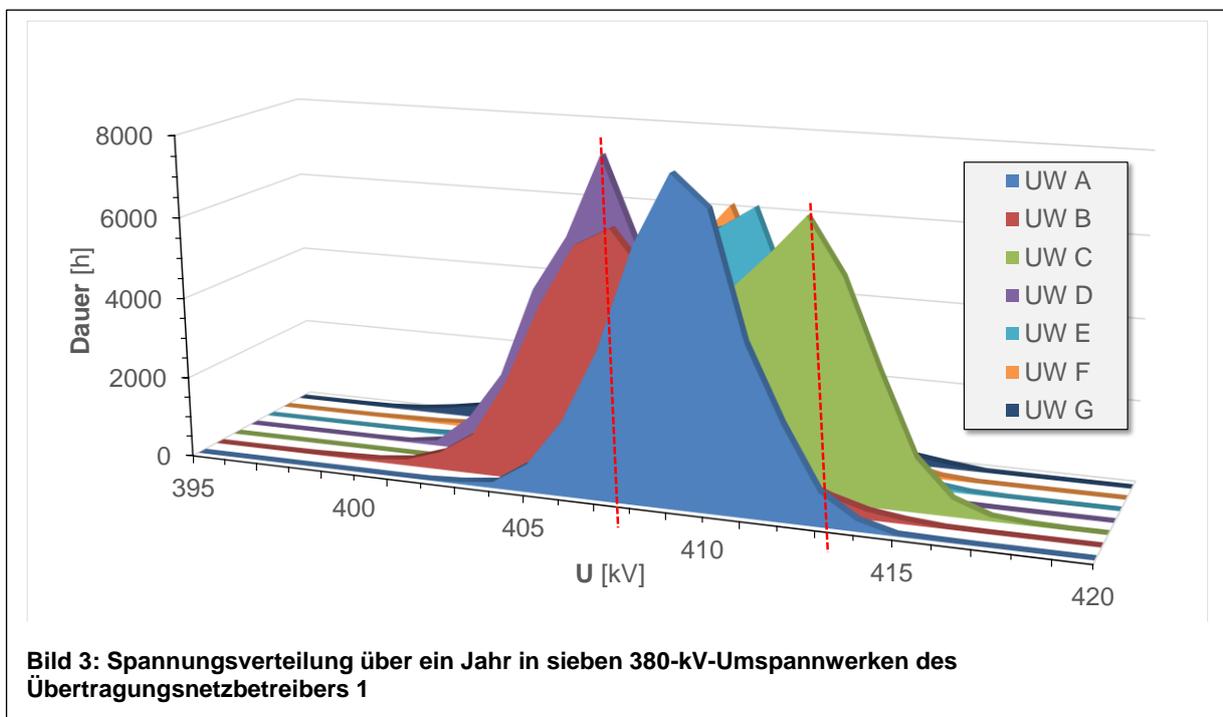
Die in Kapitel 2.2 dargestellten Network Codes gehen davon aus, dass unter bestimmten Netzbedingungen Betriebsspannungen auftreten können, die die Bemessungsspannungen der Betriebsmittel überschreiten. Die Dauer ist allerdings auf max. 60 min begrenzt. Im Folgenden soll erörtert werden, unter welchen Bedingungen solche Betriebsfälle auftreten können. Daneben werden die Erfahrungswerte verschiedener deutscher Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber analysiert. Die Betrachtungen basieren auf Daten, die aufgrund einer Anfrage den Autoren dieser Studie an die FNN-Projektgruppe „Spannungsfestigkeit“ zur Verfügung gestellt wurden. Aus Gründen der Anonymisierung sind diese im Weiteren nicht referenziert.

3.1. Sichtung und Analyse der Erfahrungswerte bei Übertragungs- und Verteilnetzbetreibern

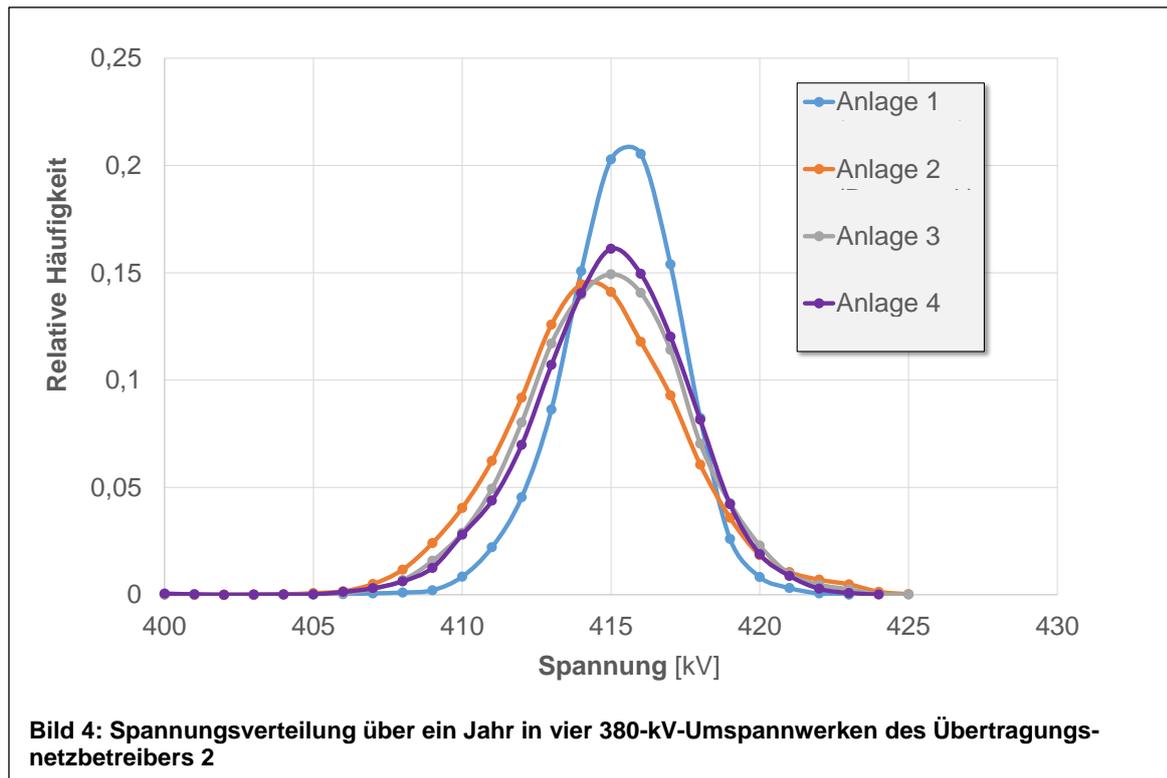
Die Betrachtungen beziehen sich auf Erfahrungswerte von mehreren Übertragungsnetzbetreibern sowie von verschiedenen Verteilnetzbetreibern mit städtisch geprägten und gemischten, städtisch und ländlich geprägten Netzen.

3.1.1. Übertragungsnetzbetreiber

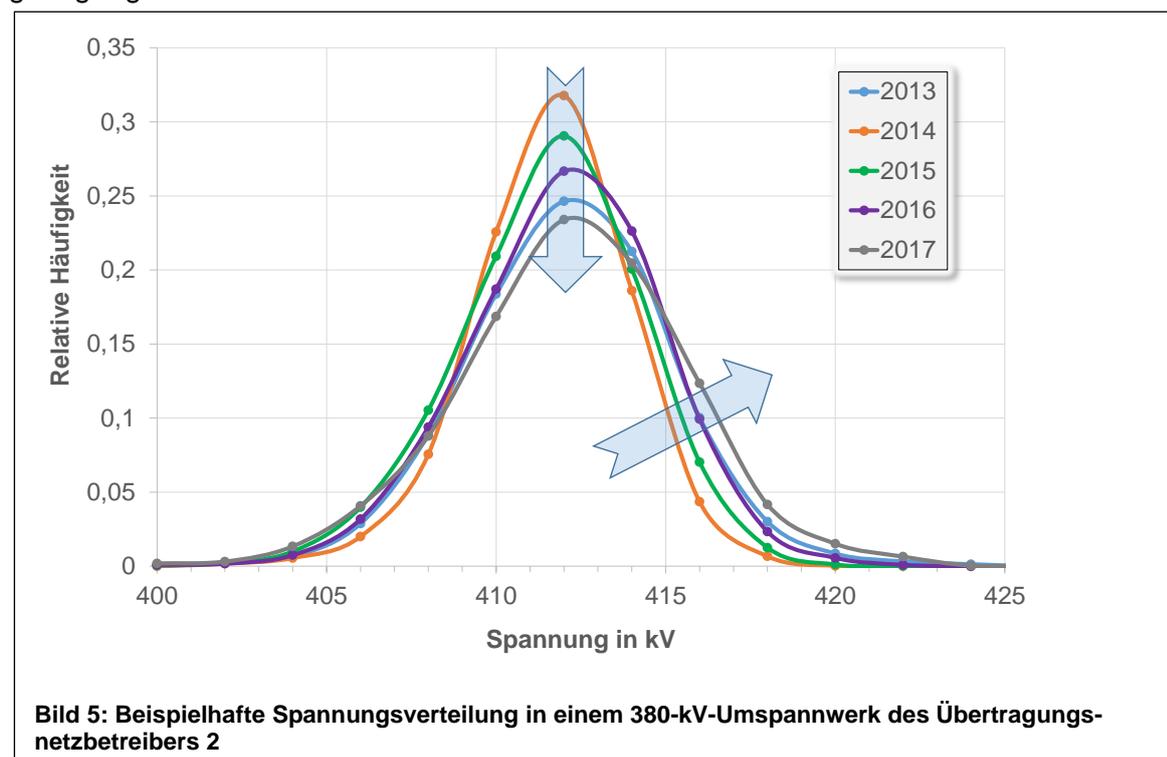
Im Übertragungsnetz des Netzbetreibers 1 gab es bisher zwei Störungsereignisse, bei denen Spannungen $>U_m$ aufgetreten sind. Diese sollen als Beispiele in Kapitel 3.2 behandelt werden. Ansonsten lag die Spannung immer unter der maximalen (dauernd) zulässigen Spannung $U_m = 420$ kV. Bild 3 zeigt die Spannungsverteilung über ein Jahr in sieben 380-kV-Umspanwerken. Die mittlere Spannung liegt zwischen 408 kV und 413 kV.



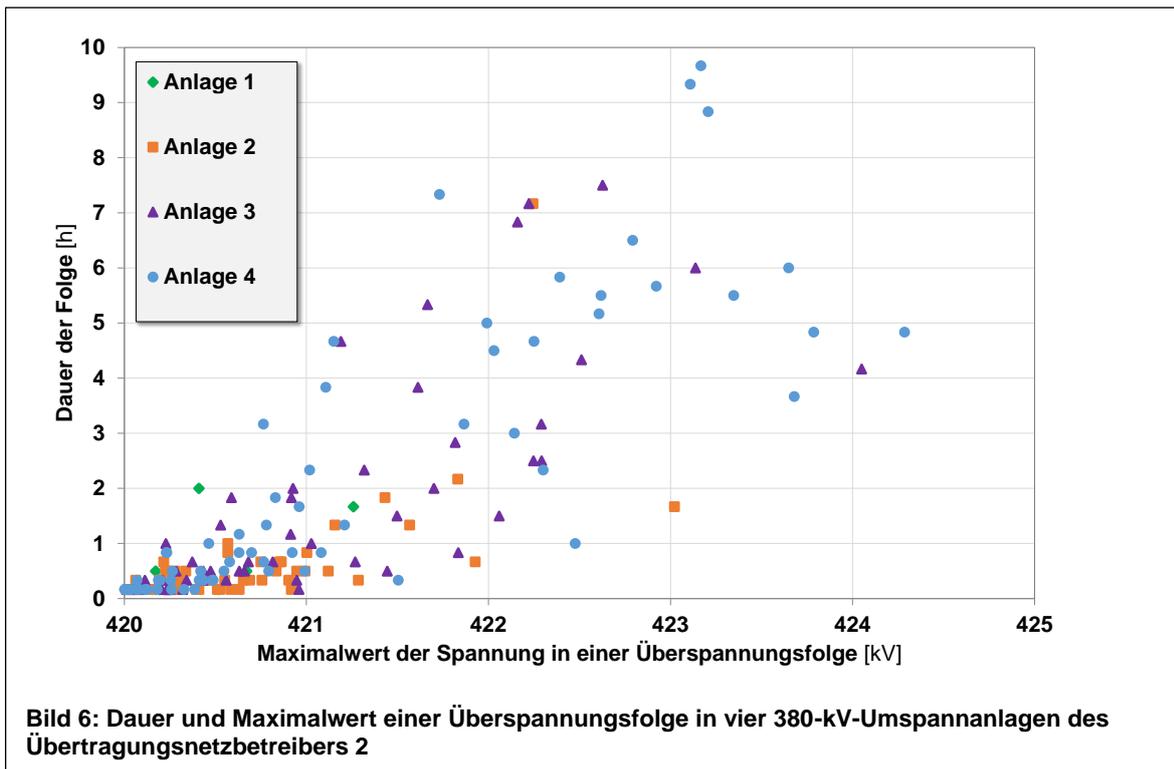
3 Randbedingungen für den Betrieb mit Spannungen $>U_m$: Betrieb bei temporären Überspannungen, Zeitdauer, kritische Situationen



Aus den Daten des Übertragungsnetzbetreibers 2 geht hervor, dass in diesem Netz gelegentlich Spannungen >420 kV auftreten. In Bild 4 ist die Spannungsverteilung über ein Jahr beispielhaft für vier 380-kV-Anlagen dargestellt. Es treten Spannungen bis 425 kV auf. Bild 5 zeigt die Spannungsverteilung im Umspannwerk 2 für die Jahre 2013 bis 2017. Die Häufigkeit der Spannungen >420 kV hat in den letzten Jahren zugenommen, wohingegen die mittlere Spannung mit 412 kV sich nicht geändert hat, sondern lediglich ihre Häufigkeit geringer geworden ist.



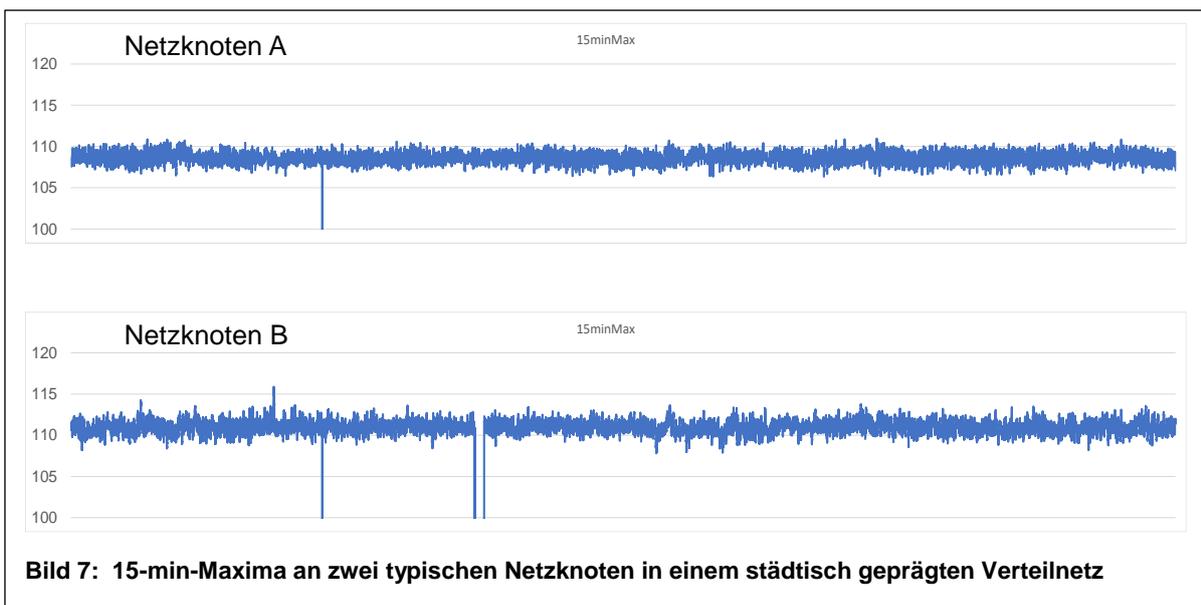
3 Randbedingungen für den Betrieb mit Spannungen $>U_m$: Betrieb bei temporären Überspannungen, Zeitdauer, kritische Situationen



Die Dauer der Überspannungen in den vier betrachteten 380-kV-Umspannanlagen geht aus Bild 6 hervor. Danach treten die höchsten Überspannungen bzw. Überspannungsdauern in den Anlagen 3 und 4 auf mit 423 kV für 6 h bzw. 9 h und 424 kV für 4 h bzw. 5 h.

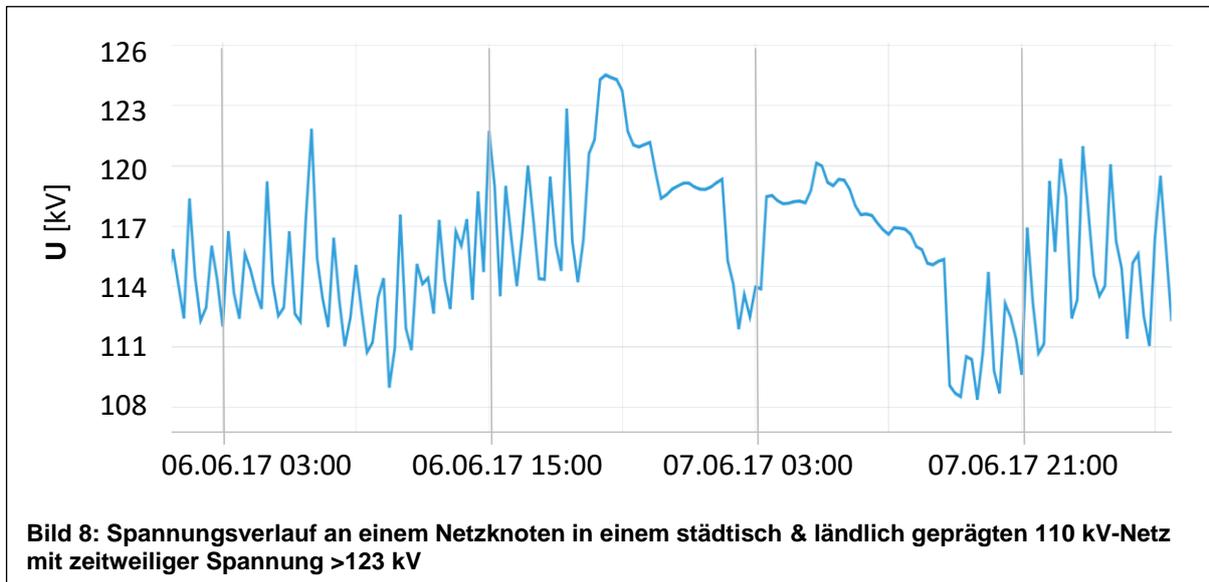
3.1.2. Verteilnetzbetreiber

Aus dem städtisch geprägten Verteilnetz wurden typische 15-min-Maxima an zwei repräsentativen Netzknoten ausgewählt (Bild 7). Die Verläufe zeigen, dass die Spannungen nur wenig von der Netzennennspannung von 110 kV abweichen. Nur einmal erreicht die Spannung kurzzeitig einen Wert von 116 kV. Spannungen $>U_m = 123$ kV sind in diesem Netz nicht bekannt.



3 Randbedingungen für den Betrieb mit Spannungen $>U_m$: Betrieb bei temporären Überspannungen, Zeitdauer, kritische Situationen

Das zweite Beispiel bezieht sich auf Betriebserfahrungen des Netzbetreibers mit sowohl städtisch als auch ländlich geprägtem Netz. In diesen Netzen sind sporadisch Spannungen über 123 kV mit einem Maximalwert von 133 kV registriert worden. Da diese Überspannungen sporadisch und nicht systematisch auftreten, kann über die Häufigkeit keine Angaben gemacht werden. Die Dauer kann mehrere 15 min betragen. Ein typisches Beispiel ist in Bild 8 dargestellt.



3.2. Szenarien für das Auftreten von betriebsfrequenten Spannungen $>U_m$

Von der FNN-Projektgruppe „Spannungsfestigkeit“ wurden die in Tabelle 2 aufgeführten Szenarien für das Auftreten von betriebsfrequenten Spannungen $>U_m$ angegeben.

3 Randbedingungen für den Betrieb mit Spannungen $>U_m$: Betrieb bei temporären Überspannungen, Zeitdauer, kritische Situationen

Tabelle 2: Szenarien für das Auftreten von betriebsfrequenten Spannungen $>U_m$

Nr.	Kurzname	Beschreibung	Wahrscheinliche Spannung	Schätzung der Auftretenshäufigkeit	Dauer
1	Zuschaltung von langen Kabelstrecken oder Leitungen	Aufgrund von Feranti-Phänomen wird sich bei der Zuschaltung eines Kabels an seinem fernen Ende höhere Spannung als am zugeschalteten Ende einstellen. Diese Spannung wird dann die Schaltkammer des fernen Leistungsschalters belasten. Bei Kabelverbindungen, bei einem Netzbetreiber werden die Zuschaltzeit auf Grund der Schaltautomatiken kurz $<10s$ ausfallen, bei Kabelverbindungen zwischen benachbarten Netzbetreibern erfolgt die Zuschaltung normalerweise manuell, sodass es hier mit längeren Zeiten zu rechnen ist.	bis 440kV	20 - 100 / Jahr	10s - 15min
2	Schwachlastfall	Freileitungen, die nur marginell belastet werden, wirken wie eine Kapazität. Durch solche Schwachlast-Situationen sind normalerweise größere Netzregionen betroffen. Als Abhilfemaßnahme werden einzelne Freileitungen abgeschaltet bzw. falls vorhanden die Drosseln zugeschaltet.	einige kV über U_m	100-300 / Jahr	1-5 h
3	Inselbildung	Falls das Netz auseinander brechen soll, werden wahrscheinlich die Erzeuger und Lasten nicht im Gleichgewicht bleiben, sodass die Spannung in dem Inselnetz mit Übergebot der Erzeuger höhere Spannung erfahren wird.	bis 440kV	1 / 10 Jahre	1h
4	Wegfall von Erzeugern	Falls Erzeuger wegfallen sollen, wird versucht durch die entsprechende Umkonfiguration des Netzes das Netz stabil zu halten. In dieser Zeit kann die Systemführung die Spannungen erhöhen um die Lastströme zu reduzieren. In solchen Fällen können die Spannungen auch über gewisse Zeit anstehen.	bis 440kV	1 / 10 Jahre	1 h
5	Lastabwurf	Falls die Frequenz im System kritisch sinken sollte, wird zur Stabilisierung des Systems die Lastabschaltung eingeleitet. Infolge können sich temporär erhöhte Überspannungen ergeben.	bis 440kV	1 / 10 Jahre	1h
6	Stark belastete Netze mit hohem kapazitiven Kompensationsanteil	Die stark belastete Leitungen müssen entsprechend kapazitiv kompensiert werden. Wenn in diesem Betriebszustand eine Leitung auf Grund eines Fehler abgeschaltet werden muss, wird das verbleibende Netz einen Überschuss an kapazitiver Leistung haben. Dies wird die Spannung in die Höhe treiben, da die MSCDN Kompensationsanlagen in der Regel nicht stufbar sind.	bis 440kV	1 - 5 / Jahr	1h
7	Stark belastete Netze mit hohem Kabelanteil	Die Kabel bieten dem Übertragungsnetz gewisse kapazitive Kompensationsleistung die zu einem gewissen Grad in der Regel mit Drosseln kompensiert wird. Falls dieses eingestellte Blindleistungsbilanz durch Abschaltungen gestört wird (z.B. Abschaltung des Netzteils mit der Drossel) kann es aufgrund der Überschuss der kapazitiven Blindleistung zu Spannungserhöhung kommen.	bis 440kV	1/100 Jahre	1h
8	Umkonfiguration des Netzes mit MSCDN Anlagen oder Anlagen die gerade kapazitiv Blindleistung einspeisen	Falls die Umkonfiguration des Netzes mit einer großen MSCDN Anlage erforderlich ist, kann es bei der Öffnung der Kupplung aufgrund von Reduktion der Kurzschlussleistung auf Sammelschiene mit MSCDN zu Spannungserhöhung kommen.	bis 440kV	20 - 100 / Jahr	30min
9	Auslösung von Last im Hochfahernetz	In Hochfahernetzen muss auf die Blindleistungsbilanz geachtet werden. Eine Auslösung einer Last kann die Blindleistungsbilanz stören und zur Spannungserhöhung führen.	bis 440kV	1/100 Jahre	30min

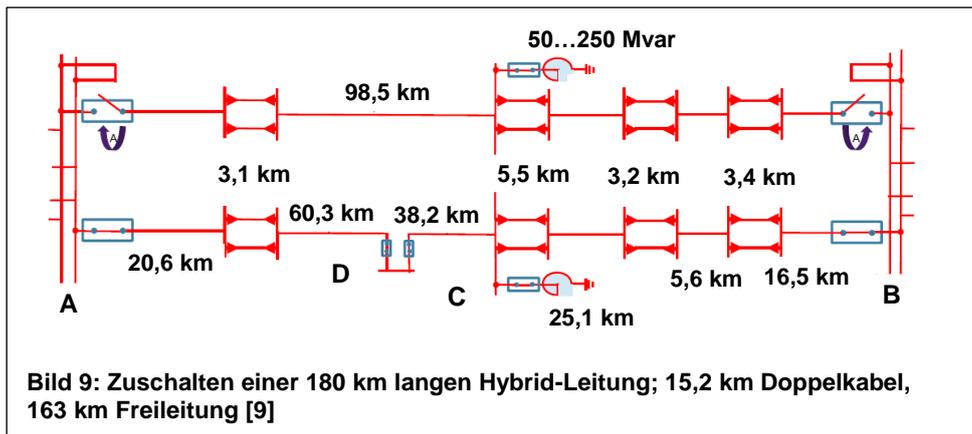
Das Szenario 1 kann anhand von Simulationen, das Szenario 4 aufgrund von aufgezeichneten Netzereignissen näher betrachtet werden.

3.2.1. Zuschaltung von langen Kabelstrecken oder Hybrid-Leitungen (Szenario 1)

Die Simulation bezieht sich auf eine 180 km lange Hybrid-Leitung, bestehend aus insgesamt 15,2 km Doppelkabel und 163 km Freileitung (Bild 9) [9].

3 Randbedingungen für den Betrieb mit Spannungen >Um: Betrieb bei temporären Überspannungen, Zeitdauer, kritische Situationen

In der Mitte befindet sich eine Kompensationsanlage mit einer Leistung von 50...250 Mvar.



Bei Zuschaltung mit einer voreingestellten Kompensationsleistung von 250 Mvar treten Spannungen gemäß Tabelle 3a am jeweiligen fernen Ende auf. Bei geringer oder ohne Kompensationsleistung sind Spannungen gemäß Tabelle 3b zu erwarten.

Tabelle 3: Spannungen am Leitungsende bei Zuschaltung der Hybrid-Leitung nach Bild 9

a) Zuschalten mit 250 Mvar Kompensationsleistung, vor Zuschaltung 410 kV		
Zuschalten in	Spannung in B [kV]	Spannung in A [kV]
Station A	427 kV	414 kV
Station B	417 kV	432 kV

b) Zuschalten ohne Kompensation, vor Zuschaltung 410 kV		
Zuschalten in	Spannung in B [kV]	Spannung in A [kV]
Station A	441 kV	418 kV
Station B	424 kV	463 kV

Selbst bei voller Kompensationsleistung muss mit Spannungen am fernen Ende deutlich über der Bemessungsspannung gerechnet werden. Ohne bzw. bei zu gering eingestellter Kompensationsleistung können erhebliche Überspannungen von über 460 kV auftreten.

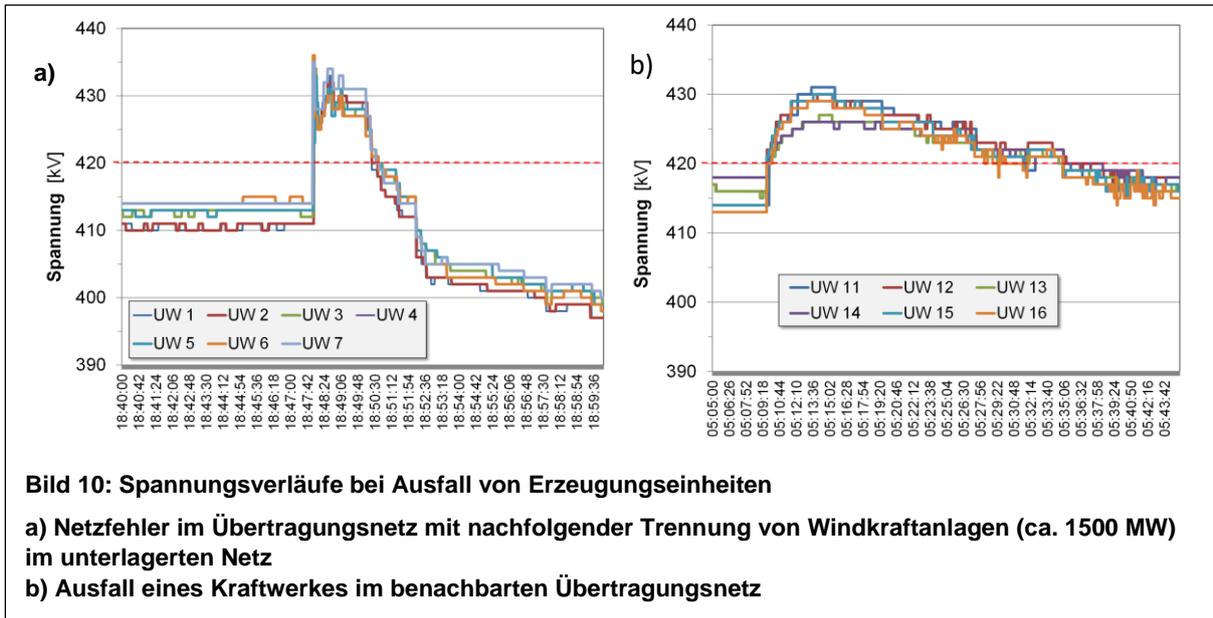
Die in Tabelle 3 angegebenen Werte sind somit realistisch für Kompensationsgrade, wie sie im praktischen Betrieb zu finden sind.

3.2.2. Wegfall von Erzeugungseinheiten (Szenario 4)

Bild 10 zeigt Spannungsverläufe, wie sie bei Wegfall von Erzeugungseinheiten aufgezeichnet wurden. Bild 10a bezieht sich auf einen Netzfehler im Übertragungsnetz mit nachfolgender Trennung von Windkraftanlagen (ca. 1500 MW) im unterlagerten Netz. Ursache für die Spannungsverläufe nach Bild 10b war der Ausfall eines Kraftwerkes im benachbarten Übertragungsnetz.

3 Randbedingungen für den Betrieb mit Spannungen $>U_m$: Betrieb bei temporären Überspannungen, Zeitdauer, kritische Situationen

Bei Fehler 1 steigt die Spannung kurzzeitig auf 435 kV an und erreicht nach 3 min wieder U_m . Im Falle des Fehlers 2 steigt die Spannung innerhalb von 4 min auf über 430 kV an und erreicht erst nach weiteren gut 20 min wieder U_m . Die in Tabelle 2 für dieses Szenario angenommenen Werte sind somit realistisch.



4. Grundsätzliche Auslegung von Betriebsmitteln, Prüfvorschriften und angenommene Randbedingungen

Betriebsmittel für das Hoch- und Höchstspannungsnetz werden für eine Lebensdauer von mehreren Dekaden ausgelegt. Dabei ist zu bedenken, dass die Netze in Zukunft stärker ausgelastet und näher an ihren Grenzen betrieben werden. Die Auslegung erfolgt gemäß internationaler Normen (IEC Standards), die eine Vielzahl von betrieblichen Anforderungen, jedoch nicht 100% aller im Betrieb auftretenden Bedingungen abdecken. Andererseits werden bei den Typprüfungen Annahmen getroffen, die unter Netzbedingungen nur sehr selten oder gar nicht auftreten. So geht beispielsweise die Prüfnorm für Hochspannungsleistungsschalter beim Schalten von Kurzschlussströmen von Polfaktoren von $k_{pp} = 1,3$ aus. Derartig hohe Polfaktoren werden im Netz im Bereich von kurzschlussstromstarken Anlagen, wo mit Strömen im Bereich des Bemessungs-Kurzschlussstromes zu rechnen ist, nicht auftreten. Die Erfahrungen zeigen, dass hier kleinere Polfaktoren zu erwarten sind. Daher ist es Aufgabe des Betreibers, die Einsatzbedingungen und die Anforderungen zu analysieren und die entsprechende Bemessung zu spezifizieren.

Bei der Bemessung und Auslegung von Betriebsmitteln sind vielfältige Beanspruchungen zu berücksichtigen. Im vorliegenden Fall wird nur der Einfluss der elektrischen Beanspruchungen betrachtet. Die grundsätzliche dielektrische Beanspruchung der Betriebsmittel und der prüftechnische Nachweis gehen aus Bild 11 hervor. Dabei sind betriebsfrequente und transiente Vorgänge zu unterscheiden. Neben der dauernden Betriebsspannung werden die Betriebsmittel mit zeitweiligen Überspannungen beansprucht, die in der Regel ebenfalls betriebsfrequenter Natur sind. Beanspruchungen durch transiente Vorgänge entstehen zum einen durch Fehler und/oder Schaltvorgänge im Netz, die zu Überspannungen mit langsamer Anstiegszeit im Bereich von einigen 100 μs führen. Zum anderen treten Beanspruchungen durch schnell und sehr schnell ansteigende Überspannungen auf. Schnell ansteigende Überspannungen mit Anstiegszeiten von weniger als einer Mikrosekunde bis zu einigen Mikrosekunden werden durch Blitzeinschläge verursacht, können aber auch die Folge von Rück- und Wiederezündungen sein. Zu sehr schnell ansteigenden Überspannungen mit Anstiegszeiten von einigen Nanosekunden bis zu einigen 10 Nanosekunden kommt es beim Schalten von GIS-Trennschaltern.



Bild 11: Zusammenhang zwischen betrieblichen Spannungs- bzw. Überspannungsbeanspruchungen und prüftechnischem Nachweis

Der prüftechnische Nachweis, dass das betreffende Betriebsmittel in der Lage ist, die betriebliche Dauerbeanspruchung über die angenommene Lebensdauer zu beherrschen, erfolgt durch eine Prüfung mit Langzeit-Stehwechselfspannung, meist für eine Dauer von 30...60 min. Bei einigen Betriebsmitteln wird dieser Nachweis auch durch eine Prüfung mit Kurzzeit-Stehwechselfspannung, Prüfdauer meist 1 min, vorgenommen. Die ausreichende Festigkeit gegenüber zeitweiligen Überspannungen wird durch die Prüfung mit Kurzzeit- oder Langzeit-Stehwechselfspannung nachgewiesen. Die ausreichende Festigkeit gegenüber langsam ansteigenden Überspannungen wird durch Prüfung mit Schaltstoßspannung, und die gegenüber schnell und sehr schnell ansteigenden Überspannung durch Prüfung mit Blitzstoßspannung belegt.

Im Folgenden ist insbesondere das Verhalten bei zeitweiligen Überspannungen von Interesse. Basierend auf den Analysen der Daten der Netzbetreiber und den nationalen und europäischen Network Codes wird angenommen, dass die betreffenden Betriebsmittel zweimal pro Woche für jeweils 30 min mit einer zeitweiligen Überspannung von $1,05 \cdot U_m$ beansprucht werden. Es ist zu prüfen, ob durch diese Beanspruchungen eine Funktionseinschränkung der Betriebsmittel zu erwarten ist. Dabei sind sowohl stationäre und quasistationäre Vorgänge als auch transiente Vorgänge zu berücksichtigen. Zum anderen ist zu klären, ob diese Beanspruchungen über die Betriebszeit akkumuliert zu einer merklichen Verkürzung der Lebensdauer führen. Die beiden Fragestellungen sollen für die verschiedenen Betriebsmittel – Freileitungen, Freiluftschaltanlagen, Schaltgeräte, gasisolierte Schaltanlagen, Strom- und Spannungswandler, Leistungstransformatoren, Überspannungsableiter und Kabelanlagen – auf Basis der einschlägigen Vorschriften und der Fachliteratur betrachtet werden.

5. Mögliche Einschränkungen der Funktionalität von Betriebsmitteln bei Betrieb mit Spannungen $>U_m$

5.1. Freileitungen

Die inneren und äußeren Abstände von Freileitungen werden von der 90%-Blitzstehstoßspannung $U_{90\%_{ff, is}}$ der in der Leitung verwendeten Isolatorketten abgeleitet [10]. Blitzüberspannungen sind äußere Überspannungen, die nicht durch die aktuelle Betriebsspannung beeinflusst werden. Die oben angenommene zeitweilige Überspannung hat somit keine Auswirkung auf die grundsätzliche Bemessung der Abstände einer Freileitung.

Eine höhere Betriebsspannung kann sich aber auf das Koronaverhalten der Freileitung – Leiterseile und Armaturen – auswirken. Hier sind insbesondere 380-kV-Leitungen zu betrachten. Diese sind in der Regel mit 4er-Bündelleitern mit mindestens 22 mm Seildurchmesser beseit, welche bei einer Betriebsspannung von 420 kV eine Randfeldstärke von 16,5 kV_{eff}/cm aufweisen. Diese Randfeldstärke ist ausreichend weit von der nach [11] ermittelten Korona-Einsatzfeldstärke von ca. 22 kV_{eff}/cm entfernt, so dass auch bei einer zeitweiligen Überspannung von $1,05 \cdot U_m$ keine unzulässig hohe Korona zu erwarten ist. Das Koronaverhalten der Armaturen ist unkritisch, da in den Prüfungen ein Koronaeinsatz oberhalb der 1,1-fachen maximalen Betriebsspannung gefordert wird.

Für die Bemessung der Freileitungsisolatoren ist neben der Steh-Blitzstoßspannung das Verhalten unter Fremdschichteinfluss bei Betriebsspannung von Bedeutung. Die im Hoch- und Höchstspannungsnetz verwendeten Porzellan- und Verbundisolatoren sind in der Regel für mittlere Verschmutzung ausgelegt. Der vereinheitlichte spezifische Kriechweg (USCD; bezogen auf die Leiter-Erdspannung) liegt je nach Isolator typ zwischen 32...36 mm/kV.

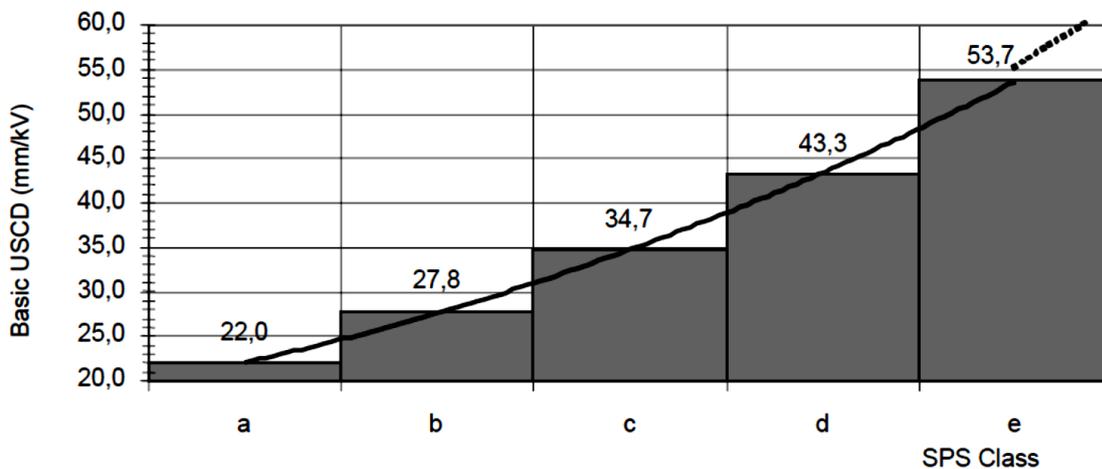


Bild 12: Vereinheitlichte spezifische Kriechweglängen als Funktion der Verschmutzungsstufe [12]

a sehr leichte b leichte c mittlere d schwere e sehr schwere Verschmutzung

Gemäß IEC 60815-2 [12] ist für mittlere Verschmutzung ein vereinheitlichter spezifischer Kriechweg von 31...38 mm/kV zulässig (Bild 12). Bei Verbundisolatoren ist aufgrund ihrer hydrophoben Oberfläche zusätzlich noch eine Reduzierung des Kriechweges auf 75% möglich. Daneben ist zu bedenken, dass in den meisten Netzgebieten nur eine leichte Verschmutzung vorherrscht. Somit ist eine zeitweilige Beanspruchung mit $1,05 \cdot U_m$ ohne merklichen Einfluss auf das Verhalten der Freileitungs-Isolatoren unter Fremdschichteinfluss.

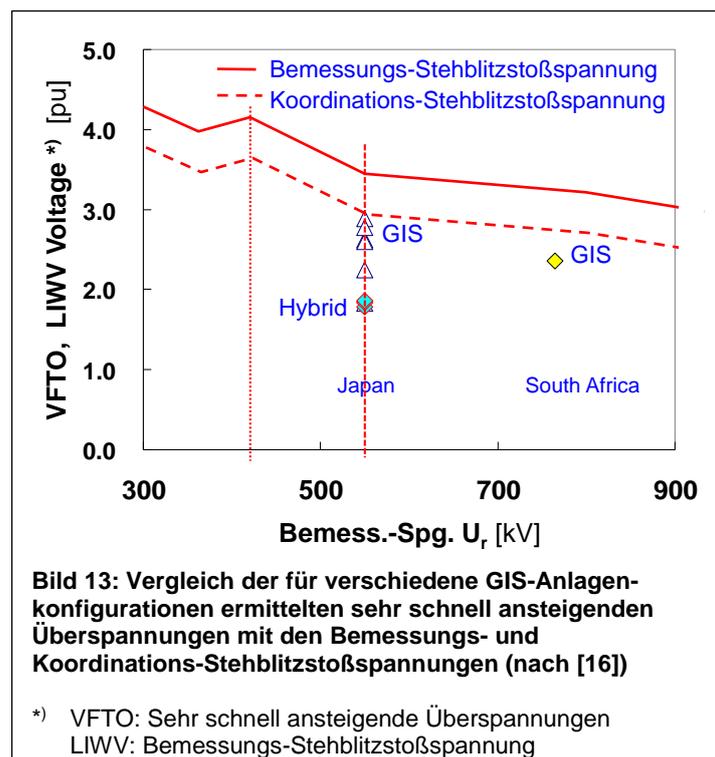
5.2. Freiluft-Schaltanlagen

Die Mindestabstände von aktiven Teilen in Freiluftschaltanlagen werden nach [6] im Bereich I ($1 \text{ kV} < U_m \leq 245 \text{ kV}$) durch die Bemessungs-Blitzstoßspannung und im Bereich II ($U_m > 245 \text{ kV}$) durch die Bemessungs-Schaltstoßspannung bestimmt [13]. Da die Bemessungs-Blitzstoßspannung von den atmosphärischen Überspannungen abgeleitet ist, würde sich eine um 5 % höhere Betriebsspannung in 110-kV- und 220-kV-Freiluftanlagen nicht auf die Mindestabstände auswirken. In 380-kV-Freiluftschaltanlagen wird in der Regel eine Bemessungs-Schaltstoßspannung von 1050 kV angesetzt, die von Schaltüberspannungen von 2,9 p.u. ausgeht. Solche Schaltüberspannungen können aber nur bei dreipoliger automatischer Wiedereinschaltung (AWE) auftreten, wenn auf eine vorgeladene Leitung geschaltet wird. Das deutsche Übertragungsnetz wird aber nur mit einpoliger AWE betrieben, bei der mit Schaltüberspannungen von nur 2,3 p.u. zu rechnen ist. Daher ist die Bemessung der Mindestabstände von aktiven Teilen auch bei Beanspruchung mit 440 kV ausreichend sicher.

Die in Freiluftschaltanlagen eingesetzten Betriebsmittel sind nach den hierfür gültigen Normen zu betrachten (siehe weiter unten). Eine mögliche Funktionseinschränkung im Falle einer Betriebsspannung von $1,05 \cdot U_m$ ist unter Berücksichtigung der in den Normen vorgenommenen Bemessung zu untersuchen.

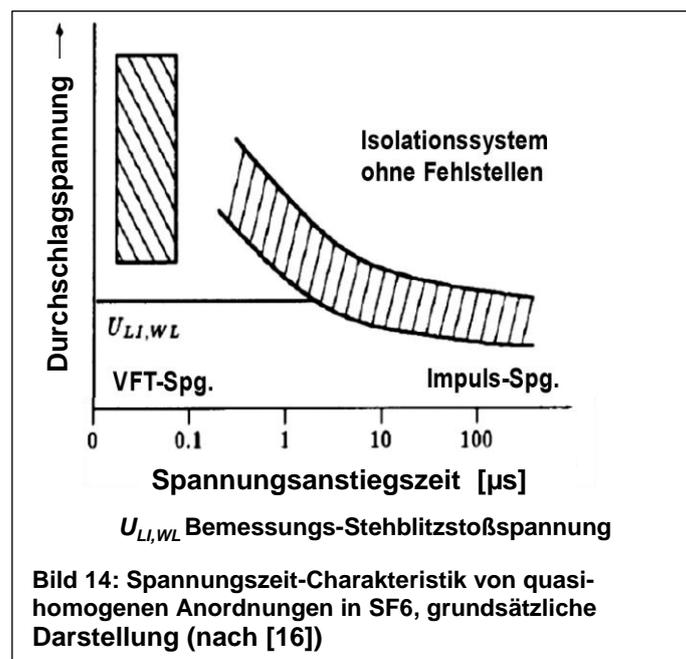
5.3. GIS-Anlagen

Für die Auslegung von gasisolierten Schaltanlagen (GIS) ist die Bemessungs-Stehblitzstoßspannung maßgebend [14], [15]. Diese Spannung wird von äußeren (atmosphärischen) Überspannungen abgeleitet und wird von der jeweiligen Betriebsspannung nicht beeinflusst. Die Bemessungs-Blitzstoßspannung soll aber auch eine ausreichende Spannungsfestigkeit gegenüber inneren Überspannungen beim Schalten von Trennschaltern nachweisen. Diese sehr schnell ansteigenden Überspannungen können in der Nähe des betreffenden Trennschalters 2,0 p.u. betragen. Diese Überspannungen erzeugen Wanderwellenvorgänge in der gesamten GIS-Anlage. Aufgrund der Reflexionen und Teilreflexionen entstehen sehr komplexe Wellenformen, und die Überspannungen weisen eine räumliche Verteilung auf. Im Allgemeinen werden die höchsten Überspannungen am offenen Ende der Anlage erreicht.



In [16] sind sehr schnell ansteigende Überspannungen durch das Schalten von Trennschaltern für verschiedene GIS-Konfigurationen ermittelt worden (Bild 13). Die in p.u. angegebenen Ergebnisse beziehen sich zwar auf 550-kV- und 750-kV-Anlagen, sie sollten aber auch für 420-kV-GIS-Anlagen zutreffen, da die Anlagenabmessungen ähnlich sind.

Aus Bild 13 geht hervor, dass die sehr schnell ansteigenden Überspannungen kleiner sind als die Koordinations-Stehblitzstoßspannung, d.h. die sehr schnell ansteigenden Überspannungen sind durch die Bemessungs-Stehblitzstoßspannung abgedeckt. Das Bild zeigt auch, dass der Abstand mit zunehmender Bemessungsspannung abnimmt, d.h. dieser Sachverhalt ist insbesondere bei GIS-Anlagen im Höchstspannungsnetz von Interesse. Wenn nun sehr schnell ansteigende Überspannungen bei Betriebsspannungen von $1,05 \cdot U_m$ auftreten, wird der Abstand zur Stehblitzstoßspannung kleiner. Bei einwandfreiem Isolationsverhalten kann dieser Effekt aber vernachlässigt werden. Ein Vergleich des Isolationsverhalten von SF₆-gasisolierten Systemen bei sehr schnell ansteigenden Überspannungen (Schalten von GIS-Trennschaltern) und schnell ansteigenden Überspannungen (Blitzüberspannungen) (Bild 14) zeigt, dass die Durchschlagsspannung mit zunehmender Steilheit leicht anwächst [16]. Somit ist die Festigkeit bei Beanspruchung durch sehr schnell ansteigende Spannungen durch die Bemessungs-Stehblitzstoßspannung abgedeckt, auch wenn die Amplitude der sehr schnell ansteigenden Spannungen um 5% größer ist [17].



5.4. Schaltgeräte

5.4.1. Leistungsschalter, Schalten von Kurzschlussströmen

Gemäß [18] werden Anfangs-Kurzschlusswechselströme von netzgespeisten Kurzschlüssen mit einer Spannung von $1,1 \cdot U_n / \sqrt{3}$ ermittelt. Der Faktor 1,1 berücksichtigt das Verhältnis zwischen höchster dauernder Betriebsspannung, welches der Bemessungsspannung entspricht, und der Netznominalspannung. Bei Betriebsspannungen $>U_m$ treten somit größere Kurzschlussströme als die in der Kurzschlussstromrechnung ermittelten auf. Bei Betriebsspannungen von $1,05 \cdot U_m$ ist mit 5% höheren Kurzschlussströmen zu rechnen. Da die Einschwingspannung beim Schalten von Kurzschlussströmen gemäß VDE 0671-100 [20] auf die Bemessungsspannung bezogen ist, würde sich bei einer erhöhten Betriebsspannung von 105% der Bemessungsspannung eine um 5% höhere Amplitude der Einschwingspannung

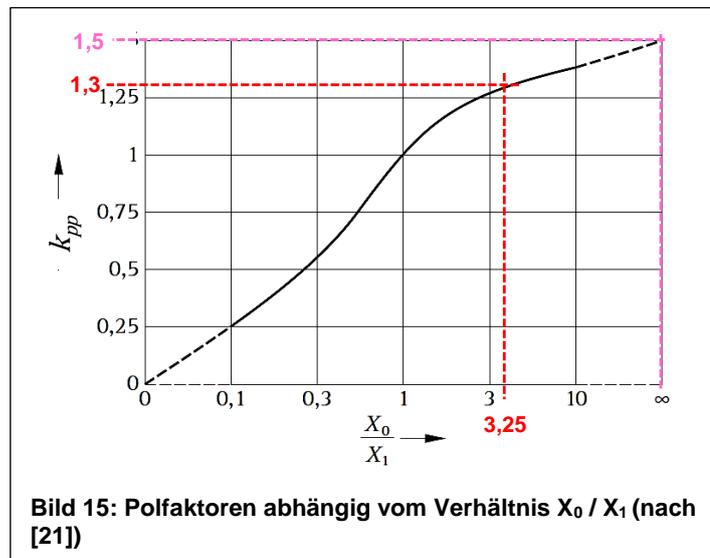
ergeben. Somit könnte das Schalten von Kurzschlussströmen bei Spannungen von $1,05 \cdot U_m$ zu einer Überbeanspruchung des Schalters führen. Bei der Beurteilung, inwieweit eine solche Überbeanspruchung der Schalter wahrscheinlich ist, sind weitere Gesichtspunkte, wie in den Vorschriften angenommene Randbedingungen, im Netz vorliegende Randbedingungen, Häufigkeit von ein- und mehrpoligen Fehlern mit und ohne Erdberührung, Schaltverhalten bei kleineren Stromsteilheiten, etc., zu bedenken.

5.4.1.1. Klemmenkurzschluss

Das Kurzschlussstromschaltvermögen eines Leistungsschalters ergibt sich aus dem zu schaltenden Strom und der Einschwingspannung. Die Einschwingspannung ergibt sich aus dem Überswingfaktor γ und dem Polfaktor k_{pp} , der wiederum von der Sternpunktbehandlung des Netzes abhängt. Das Übertragungsnetz ist in Deutschland starr geerdet. Bei starrer Sternpunktterdung wird ein Polfaktor $k_{pp} = 1,3$ angenommen. Im 110-kV-Netz findet man sowohl starre Sternpunktterdung als auch Sternpunktterdung über Petersenspulen. Bei Sternpunktterdung über Petersenspulen geht man von einem Polfaktor von $k_{pp} = 1,5$ aus. Allgemein bestimmt sich der Polfaktor aus dem Verhältnis Nullsystemimpedanz zu Mitsystemimpedanz zu

$$k_{pp} = \frac{3X_0}{X_1 + 2X_0}$$

Wie Bild 15 [21] zeigt, ergibt sich der Polfaktor $k_{pp} = 1,3$ für ein Verhältnis $X_0/X_1 = 3,25$. Beim Netz mit freiem Sternpunkt oder Erdung über Petersenspule ist die Nullimpedanz sehr groß. Mit $X_0/X_1 \rightarrow \infty$ wird der Polfaktor $k_{pp} = 1,5$ [21].



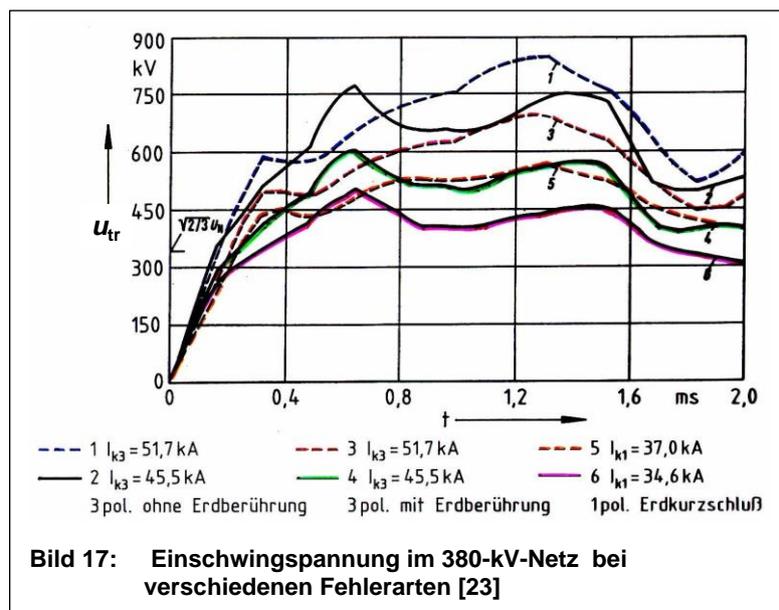
Der größte Kurzschlussstrom tritt beim Klemmenkurzschluss auf, also bei einem dreipoligen Kurzschluss direkt an den Klemmen des Leistungsschalters.

5 Mögliche Einschränkungen der Funktionalität von Betriebsmitteln bei Betrieb mit Spannungen $>U_m$

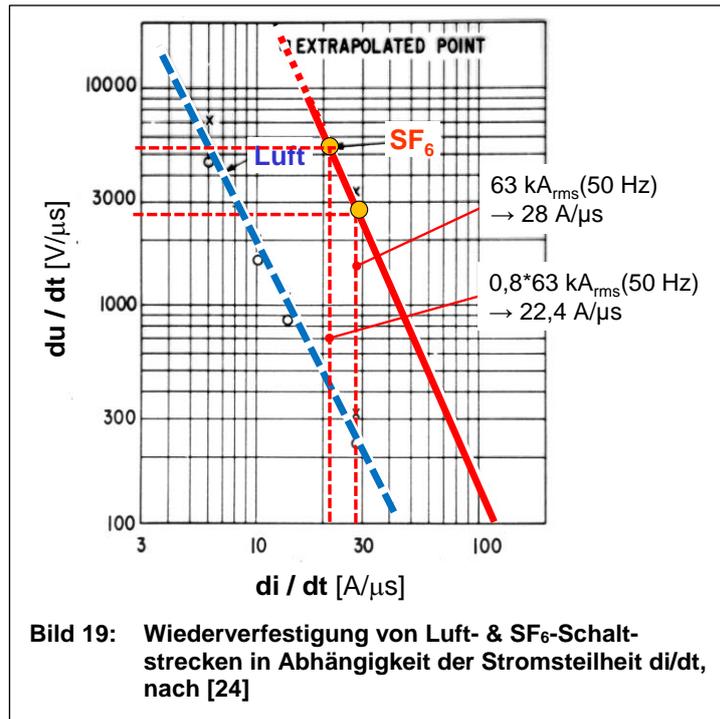
2017	HS		HöS	
	1/(100 km *a)	%	1/(100 km *a)	%
Erdschluss	4,24	66,8%		
Einpoliger Erdkurzschluss	1,48	23,3%	1,02	93,1%
Zweipoliger Kurzschluss	0,09	1,4%	0,06	5,3%
Dreipoliger Kurzschluss	0,04	0,6%	0,01	1,1%
Sonst.	0,51	8,0%	0,006	0,5%

Bild 16: Häufigkeit der verschiedenen Kurzschluss- bzw. Fehlerarten im deutschen Hoch- und Höchstspannungsnetz-Netz [22]

Wie aus Bild 16 [22] hervorgeht, tritt ein dreipoliger Kurzschluss im Höchstspannungsnetz aber nur mit einer Häufigkeit von 0,01 je 100 km Stromkreislänge und Jahr bzw. mit einer Häufigkeit von etwa 1% aller im Netz vorkommenden Kurzschlüsse auf. Im Hochspannungsnetz ist die Fehlerrate sogar noch geringer. Am häufigsten kommt es im Höchstspannungsnetz zu einem einphasigen Erdfehler, bei dem der Kurzschlussstrom in der Regel geringer ist als beim dreipoligen, ebenso wie der Polfaktor der Einschwingspannung. Hier geht man in der Regel von einem Polfaktor $k_{pp1} \approx 1,0$ aus. Dennoch sind Leistungsschalter im Übertragungsnetz für den dreipoligen Fehler mit Erdberührung auszulegen.



Bei allen anderen Kurzschlüssen – einpolige Erdkurzschlüsse, zweipolige Kurzschlüsse mit und ohne Erdberührung und dreipolige Kurzschlüsse mit Erdberührung – sind die Amplitude und die Steilheit der Einschwingspannung, abhängig vom Verhältnis Nullimpedanz X_0 zu Mitimpedanz X_1 bzw. Wellenwiderstand Z_0 im Nullsystem zu Wellenwiderstand Z_1 im Mit-system, geringer [23] (Bild 17).



Es ist daher davon auszugehen, dass das Schalten von Kurzschlussströmen bei $1,05 \cdot U_m$ von den im 380-kV- und 220-kV- Netz eingesetzten Leistungsschaltern beherrscht wird. Wird der Schalter bereits bei Betriebsspannung entsprechend U_m mit Bemessungs-Kurzschlussausschaltstrom beansprucht, so ist das Schaltverhalten bei Spannungen größer als die Bemessungsspannung mit dem Hersteller zu klären. Ein solcher Fall liegt in der durch roten Kreis gekennzeichneten Anlage in Bild 18 a vor. Oftmals wird die gleiche Unterbrechereinheit (Schaltkammer ggfs. mit Steuerkondensator und Einschaltwiderstand) statt für eine Bemessungsspannung von 420 kV oder 245 kV auch für höhere Bemessungsspannungen, z.B. 550 kV oder 300 kV eingesetzt.

Leistungsschalter für das 110-kV-Netz werden ebenfalls für den dreipoligen Kurzschluss ausgelegt. In der Regel werden auch im starr geerdeten Netz Schalter, die für einen Polfaktor $k_{pp} = 1,5$ ausgelegt sind, eingesetzt. Diese Schalter sollten auch Kurzschlussströme von 105 % des Bemessungsstromes beherrschen, weil die Wiederkehrspannung nur 87 % der Bemessungsspannung beträgt, und wenn man den in Bild 19 dargestellten Sachverhalt berücksichtigt. Bei Schaltern in Netzen mit freiem Sternpunkt oder Erdung über Petersenspulen und Beanspruchung mit Bemessungs-Kurzschlussausschaltstrom sollte das Schaltverhalten bei Spannungen größer als die Bemessungsspannung mit dem Hersteller geklärt werden. Meist wird auch in diesem Spannungsbereich die gleiche Schaltkammer auch für eine Bemessungsspannung von 145 kV eingesetzt.

5.4.1.2. Abstandskurzschluss

Der Abstandskurzschluss (AKS) stellt eine besondere Beanspruchung für Leistungsschalter dar. Der Ausschaltstrom ist zwar geringer als der Bemessungskurzschlussstrom, jedoch wird der Schalter durch die hohe Steilheit der Einschwingspannung auf Grund der Wanderwellenvorgänge auf der Leitung direkt nach Unterbrechen des Stromes besonders beansprucht. Die leitungsseitige Steilheit bestimmt sich zu

$$s_L = \frac{du_L}{dt} = Z_L * \frac{di_L}{dt} = \sqrt{2} \omega Z_L * I_L \quad (5.4.1)$$

geringer als die gemäß Norm [20] geprüfte Steilheit, sofern man von einem AKS aufgrund eines 1-poligen Fehlers ausgeht.

Der dreipolige AKS im gelöscht betriebenen 110-kV-Netz soll hier nicht weiter betrachtet werden, weil bereits der dreipolige Kurzschluss ohne Erdberührung äußerst selten ist. Und dass dieser Kurzschluss bei einer Leitungslänge auftritt, die zu einem 90 % AKS-Strom führt, ist äußerst unwahrscheinlich.

5.4.1.3. Teilkurzschlussströme

Das Schalten von Teilkurzschlussströmen, z. B. 10 % bzw. 30% des Klemmenkurzschlussstromes (T10 bzw. T30), ist insbesondere bei Transformator nahen Fehlern zu betrachten. In diesem Fall wird der Kurzschlussstrom durch die Transformatorimpedanz begrenzt und liegt in der Größenordnung von 10% bis 30% des Bemessungskurzschlussstromes. Die Einschwingspannung wird durch die Eigenfrequenz des Transformators, die je nach Spannungsebene bei 5...10 kHz liegt, bestimmt [25].

Neben der Sternpunktbehandlung des Transformators ist zu unterscheiden, ob der Fehler auf der Oberspannungs- oder Unterspannungsseite des Transformators auftritt. Die Norm geht bei diesem Schaltfall von einem dreipoligen Kurzschluss ohne Erdberührung und/oder von Transformatoren ohne geerdeten Sternpunkt aus und gibt einen Polfaktor $k_{pp} = 1,5$ vor [26]. Der aktuelle Entwurf der Norm [20] gibt für 245-kV- und 420-kV-Schalter zwar einen Polfaktor von 1,3 an, mit dem angegebenen Amplitudenfaktor von 1,76 ergibt sich aber die gleiche Einschwingspannung (Steilheit und Scheitelwert) wie in der z. Z. gültigen Norm [19]. In einer Anmerkung in [20] ist ausgeführt, dass transformatorbegrenzte Kurzschlüsse mit X_0/X_1 größer als 3,0 ab (z. B. Transformatoren mit nicht-effektiver Sternpunkterdung in Netzen mit effektiver Sternpunkterdung) abgedeckt sind.

Bei einer Spannung von $1,05 \cdot U_m$ würde in diesem Fall sowohl bei 123-kV- als auch bei 245-kV- und 420-kV-Leistungsschaltern eine gegenüber der Norm um 5 % größere Amplitude der Einschwingspannung auftreten. Da ein dreipoliger Kurzschluss ohne Erdberührung äußerst selten ist, kann von einem Polfaktor $k_{pp} = 1,3$ ausgegangen werden, sofern der Transformator-Sternpunkt geerdet ist. Für diesen Fall kann damit eine Amplitude der Einschwingspannung von $1,05 \cdot 87\% = 91\%$ des Normwertes angenommen werden. Somit sollte dieser Schaltfall auch bei $1,05 \cdot U_m$ beherrscht werden.

Ist der Transformator-Sternpunkt nicht geerdet, muss für diesen Schaltfall ein Polfaktor $k_{pp} = 1,5$ angenommen werden. Transformator-Sternpunkte an Netzknoten, an denen mit Spannungen von $1,05 \cdot U_m$ zu rechnen werden ist, sollten daher geerdet werden.

Wenn diese Maßnahme aus netztechnischen Gründen nicht möglich ist, wie es z. B. bei Maschinentransformatoren der Fall sein kann, ist zu klären, ob der eingesetzte Schalter die um 5 % höhere Einschwingspannung beherrscht. Hierbei ist zu bedenken, dass aufgrund der hohen Eigenfrequenz einiger Transformatoren in ungünstigen Einsatzfällen eine größere Steilheit als in den Normen vorgegeben auftreten kann [25].

5.4.2. Leistungsschalter, Schalten von kapazitiven Strömen

5.4.2.1. Ausschalten von Leitungen

Leistungsschalter müssen kapazitive Ströme in der Größenordnung von einigen 10 A bis wenigen 100 A schalten. Die heute eingesetzten SF6-Leistungsschalter können diese Ströme mit sehr kurzen Lichtbogenzeiten unterbrechen. Um ein rückzündungsfreies Schalten zu

gewährleisten, ist eine entsprechende dynamische Spannungsfestigkeit du/dt der Schaltstrecke erforderlich. Dieser Sachverhalt soll anhand der Kaltkennlinie eines 420-kV-SF6-Leistungsschalters erörtert werden. Eine solche Kaltkennlinie – das ist die Funktion der Spannungsfestigkeit in Abhängigkeit der Schlagweite der Schaltstrecke – ist für eine erste Beurteilung der dynamischen Spannungsfestigkeit geeignet, solange man den Einfluss des Stromes vernachlässigen kann. Dies ist bei SF6-Schaltern im o.a. Strombereich zulässig.

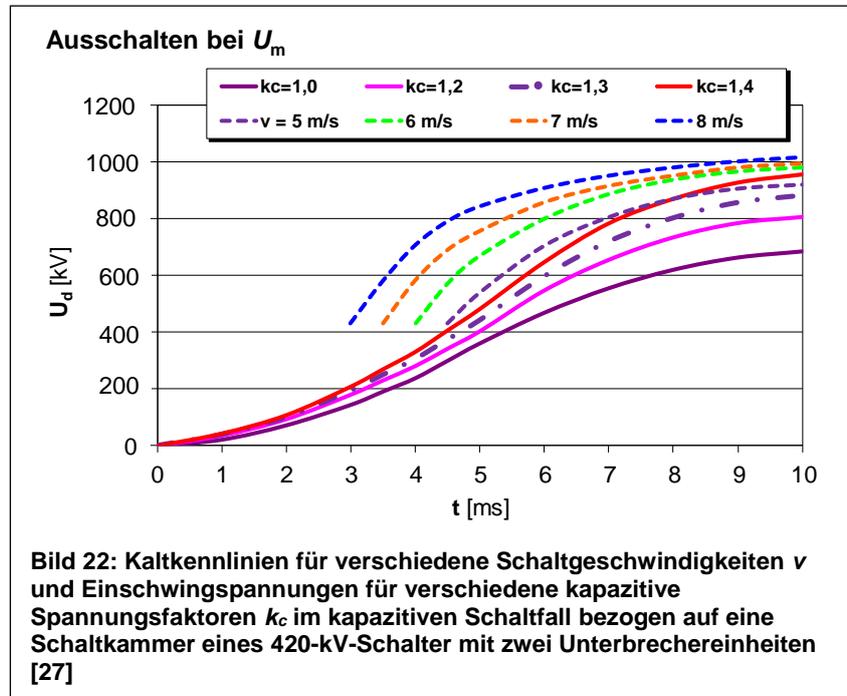
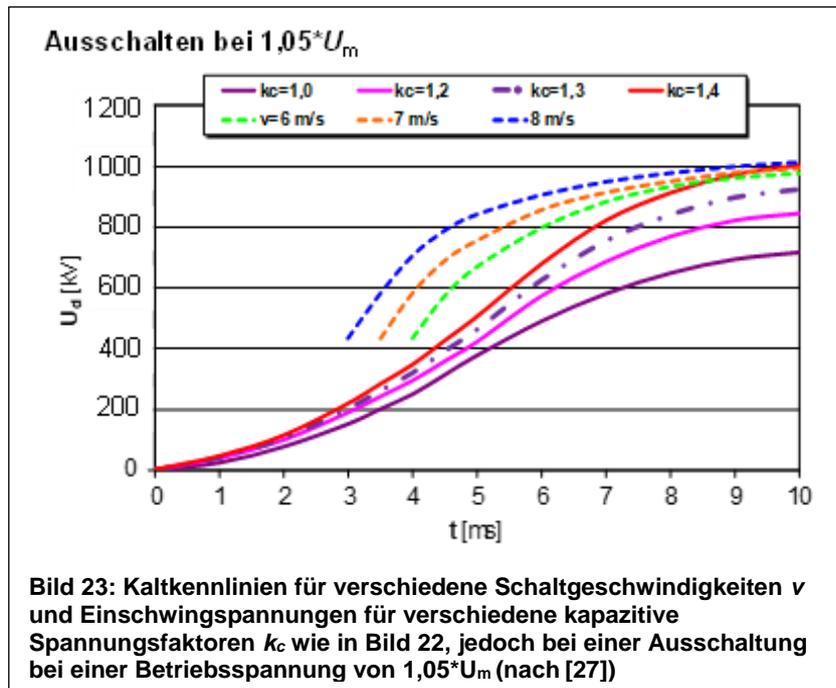


Bild 22 [27] zeigt gestrichelt die Kaltkennlinien eines 420-kV-Schalters mit zwei Unterbrechereinheiten für verschiedene Schaltstiftgeschwindigkeiten, wobei die x-Achse jetzt aber zeitabhängig skaliert ist. Daneben ist durchgezogen die Einschwingspannung für die verschiedenen kapazitiven Spannungsfaktoren k_c dargestellt. Neben den Spannungsfaktoren gemäß Norm ist auch strichpunktierter Faktor $k_c = 1,3$ eingezeichnet. Dieser Faktor wird von einigen Netzbetreibern gewählt, um die kapazitive Beeinflussung durch in Betrieb befindliche Nachbarsysteme zu berücksichtigen.

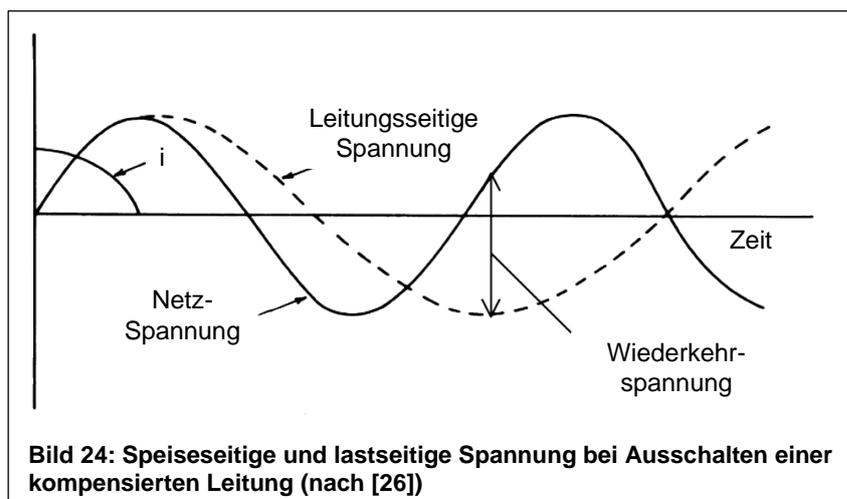
Man erkennt, dass bei einem kapazitiven Spannungsfaktor $k_c = 1,4$ Rückzündungen nur dann nicht mehr zu erwarten sind, wenn die Schaltstiftgeschwindigkeit mindestens 6 m/s beträgt. Die Darstellung geht von einer Lichtbogenzeit $t_L \approx 0$ aus. Unterstellt man größere Lichtbogenzeiten, so würde sich das Verhalten verbessern, da die Einschwingspannung erst bei größeren Kontaktabständen wirksam wird. Es hat sich jedoch gezeigt, dass SF6-Schalter in der Lage sind, kapazitive Ströme mit Lichtbogenzeiten von $< 0,5 \dots 1 \text{ ms}$ zu unterbrechen. Bild 22 stellt also Worst-Case-Bedingungen dar, die den Prüfbedingungen in der Norm für Schalter der Klasse C2 (Schalter mit einer sehr geringen Rückzünd-Wahrscheinlichkeit) entsprechen. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass die Norm seit 2004 für Schalter dieser Klasse den prüftechnischen Nachweis an einem vorbeanspruchten Schalter fordert.

Wird die Ausschaltung nun bei erhöhter Betriebsspannung von $1,05 \cdot U_m$ durchgeführt, so sind bei einer Schaltgeschwindigkeit von 6 m/s, die bei U_m noch für eine erfolgreiche Schaltung mit $k_c=1,4$ ausreichte, Rückzündungen nicht mehr auszuschließen (Bild 23).



Bei größeren Lichtbogenzeiten würde sich das Verhalten verbessern, da die Wiederkehrspannung erst bei größeren Kontaktabständen wirksam wird. Größere Lichtbogenzeiten lassen sich durch gesteuertes Schalten erreichen, indem der Schalter so ausgelöst wird, dass die Kontakttrennung einige Millisekunden vor dem Stromnulldurchgang erfolgt.

Ist die Leitung, die ausgeschaltet werden soll, eine kompensierte Leitung, so ist die Gefahr von Rückzündungen geringer. Durch die Kompensationsdrossel bleibt die lastseitige Spannung nicht auf dem Scheitelwert der Spannung liegen, sondern schwingt mit der Resonanzfrequenz von Drosselspule und Leitungskapazität aus. In der Regel wird ein Kompensationsgrad < 1 gewählt, so dass sich eine Resonanzfrequenz < 50 Hz einstellt. Die sich in diesem Fall ergebende Wiederkehrspannung ist beispielhaft in Bild 24 dargestellt (nach [26]). Sie ist in jedem Fall geringer als die im Falle der nicht kompensierten Leitung.



5.4.2.2. Einschalten von Leitungen

Neben dem Ausschalten ist auch das Einschalten von Freileitungen als Schaltfall zu betrachten. Dieser Schaltfall ist insbesondere wegen der dabei auftretenden Überspannungen von Interesse. Dabei ist ein betriebsfrequenter und ein transients Anteil zu unterscheiden (Bild 25).

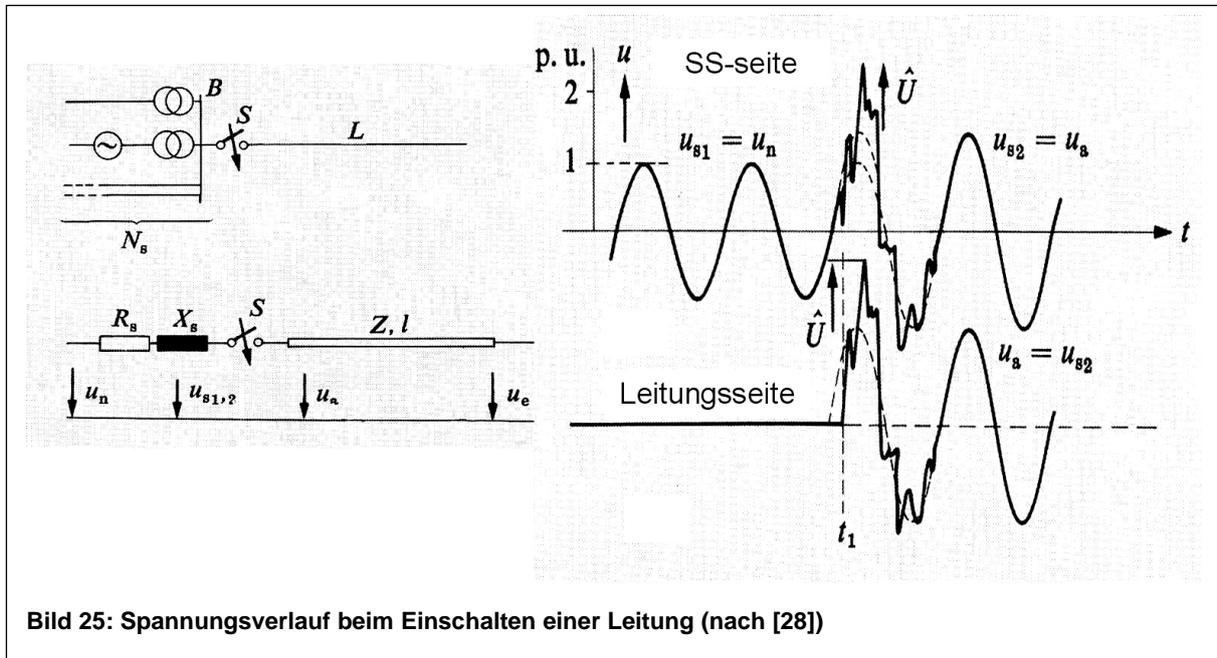


Bild 25: Spannungsverlauf beim Einschalten einer Leitung (nach [28])

Nach dem Einschalten zum Zeitpunkt t_1 muss sich die Spannung u_a am Leitungsanfang auf den neuen Wert u_{s1} , der sich durch den neuen Schaltzustand mit der zugeschalteten Leitung ergibt, einstellen. Dies geschieht durch einen Ausgleichsvorgang in Form einer Wanderwelle auf der Leitung mit dem Scheitelwert \hat{U} und einer Wechselwirkung mit dem speisenden Netz. Da eine leerlaufende Leitung eine kapazitive Last darstellt, ist die stationäre betriebsfrequente Spannung u_{s2} größer als die Spannung u_{s1} . Der transiente Ausgleichsvorgang überlagert sich also der erhöhten betriebsfrequenten Spannung nach dem Einschalten. Wegen des Ferranti-Effektes ist die Spannung am Ende der leerlaufenden Leitung höher als am Anfang. Demzufolge tritt am Ende der Leitung auch eine höhere Einschaltüberspannung auf. Die Höhe der transienten Spannungsspitze ist von der Phasenlage des Einschalt Augenblickes t_1 abhängig. Die geringste Überspannung entsteht, wenn es gelingt, im Spannungsnulldurchgang einzuschalten, die höchste bei Zuschaltung im Spannungsmaximum.

Die Überspannungsfaktoren liegen bei diesem Schaltvorgang bei 2 p.u., maximal bei 2,8 p.u. Noch höhere Überspannungsfaktoren von bis zu 3,5 p.u. können beim Zuschalten auf eine vorgeladene Leitung auftreten, wie dies im Falle einer dreipoligen AWE möglich ist. Da in deutschen Netzen in der Regel nur 1-polige AWE durchgeführt wird oder die Vorladung beispielsweise durch induktive Spannungswandler an den Leitungsenden innerhalb der AWE-Offenzeit abgeleitet werden kann, sind derartig hohe Überspannungen nicht zu betrachten.

Erfolgt die Zuschaltung der Leitung bei einer Spannung von $1,05 \cdot U_m$, ist sowohl der betriebsfrequente als auch der transiente Ausgleichsvorgang ausgeprägter. Auswirkungen auf den Leistungsschalter am Leitungsanfang und am Leitungsende durch die transienten Überspannungen sind aber nicht zu erwarten, da 420-kV-Leistungsschalter in der Regel für

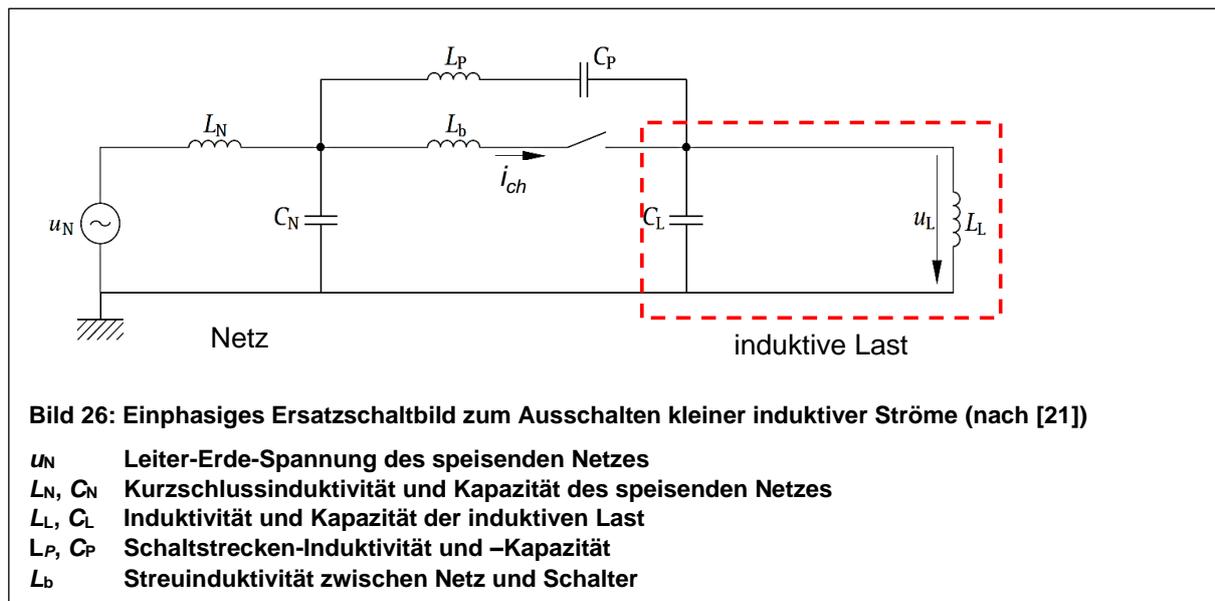
eine Bemessungs-Schaltstoßspannung von 1 050 kV ausgelegt sind, die von einer Schaltüberspannung von 2,9 p.u. ausgeht. Bei 123-kV- und 245-kV- Leistungsschaltern sind diese Überspannungen durch die betriebsfrequente Kurzzeitwechselspannung abgedeckt. Die betriebsfrequente Spannung am Leitungsende kann jedoch, wie auch das Beispiel in Kapitel 3.2.1 zeigt, größer als die Spannung am Leitungsanfang ($1,05 \cdot U_m$) sein.

Eine Verringerung der Einschaltüberspannung lässt sich erreichen, wenn die Leitung über Einschaltwiderstände eingeschaltet wird. Eine weitere Möglichkeit ist das zeitgesteuerte Schalten, auch synchrones Schalten genannt. Hierbei wird der Schalter so ausgelöst, dass er im Spannungsnulldurchgang einschaltet.

5.4.3. Ausschalten von kleinen induktiven Strömen

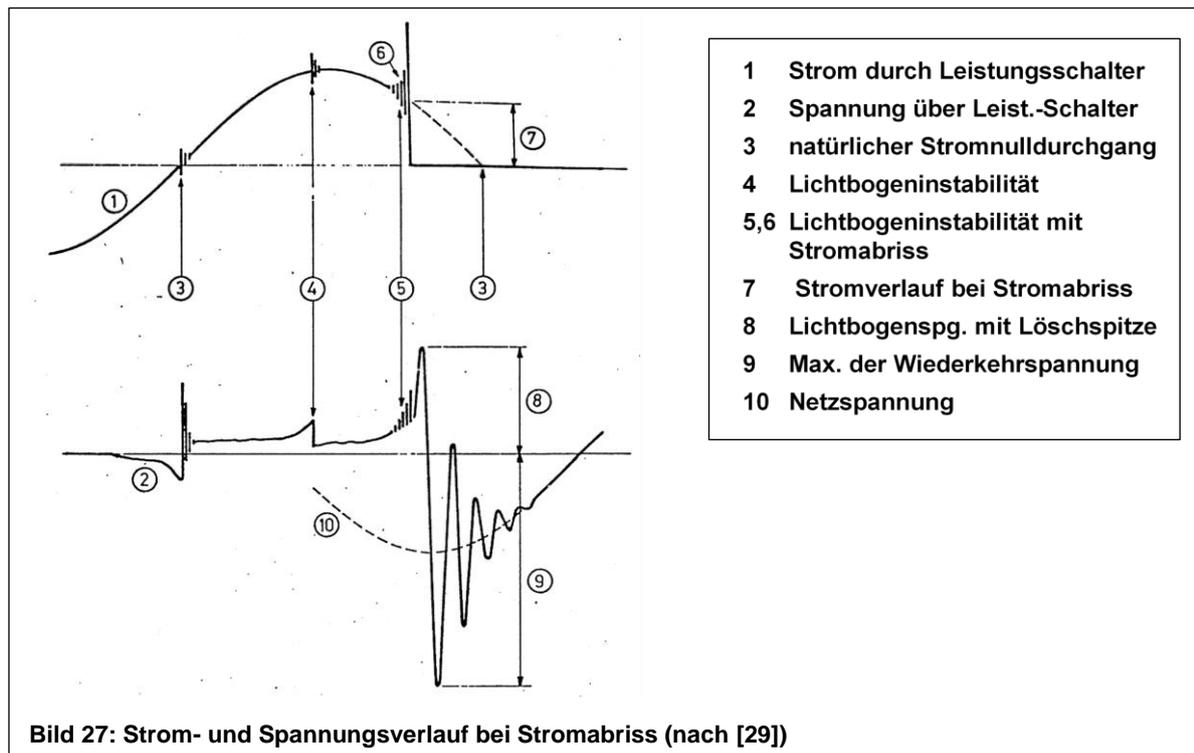
Mit dem Begriff „kleine induktive Ströme“ sind Bemessungsströme von Drosselspulen zur Blindleistungskompensation gemeint, die im Übertragungsnetz bis zu 200 A betragen können. Daneben ist das Ausschalten von unbelasteten Transformatoren zu betrachten. Bild 26 zeigt das einphasige Ersatzschaltbild zum Ausschalten kleiner induktiver Ströme.

Bei den entsprechenden Schaltvorgängen sind das Phänomen des Stromabrisses und die daraus resultierenden Überspannungen sowie die Einschwingspannung und mögliche Wiederzündungen von Bedeutung [21], [29].



5.4.3.1. Stromabriss

Bei kleinen Strömen wird der Lichtbogen zwischen den Schaltkontakten instabil. Der Lichtbogenstrom beginnt zu oszillieren und neigt zum Stromabriss vor dem natürlichen Stromnulldurchgang. Bild 27 zeigt beispielhaft Strom- und Spannungsverlauf bei Stromabriss.



Für den Abreißstrom i_{ch} wird in der Literatur, z. B. [21], [29] folgende Beziehung angegeben:

$$i_{ch} = \lambda \cdot \sqrt{C_t} \quad (5.4.2)$$

mit i_{ch} in A, C_t in F und der dimensionslosen Abreißzahl λ .

C_t ist die resultierende Kapazität parallel zur Schaltstrecke aus Netzkapazität C_N , Lastkapazität C_L und Schaltstreckenkapazität C_P . Da die die Netzkapazität C_N in der Regel sehr viel größer ist als die Lastkapazität C_L und die Schaltstreckenkapazität C_P wesentlich kleiner als die Lastkapazität C_L , ist $C_t \approx C_L$.

Besitzt der Schalter n Schaltstrecken pro Pol, so ergibt sich der Abreißstrom zu

$$i_{ch} = \lambda \cdot \sqrt{n \cdot C_t} \quad (5.4.3)$$

Die Abreißzahl λ ist zwar von der jeweiligen Schalterkonstruktion abhängig, kann aber für einen Relativvergleich benutzt werden. Typische Werte für SF6-Schalter liegen bei $\lambda = (4...17) \cdot 10^4$. Bei Annahme eines Schalters mit zwei Unterbrechereinheiten und einer Parallelkapazität von $C_t = 4 \text{ nF}$, wie sie z. B. bei Höchstspannungstransformatoren zu finden ist, ergibt sich ein Abreißstrom von $4...17 \text{ A}$. Dieser Wert würde sich bei einer Spannung von $1,05 \cdot U_m$ nicht ändern, wie aus Gleichung (5.4.3) hervorgeht.

5.4.3.2. Überspannungen

Wenn es zum Stromabriss kommt, wird die induktive Last vom Netz getrennt und die Energie $\frac{1}{2} L_L i_{ch}^2$ bleibt in der Lastinduktivität L_L gespeichert. An der Kapazität C_L liege zum Zeitpunkt des Stromabbrisses die Spannung u_{NC} . Die in der Kapazität gespeicherte Energie beträgt $\frac{1}{2} C_L u_{NC}^2$. Damit ergibt sich die auf der Lastseite zum Zeitpunkt des Stromabbrisses gespeicherte Energie zu

$$W_{ch} = 1/2 L_L i_{ch}^2 + 1/2 C_L u_{NC}^2 \quad (5.4.4)$$

Wenn nach der Unterbrechung die Gesamtenergie in rein elektrische umgeladen ist, gilt

$$W_{ch} = 1/2 C_L u_{max}^2 \quad (5.4.5)$$

Der Scheitelwert der Spannung an den Klemmen der induktiven Last ergibt daraus sich zu

$$u_{max} = \sqrt{u_{NC}^2 + i_{ch}^2 \cdot L_L / C_L} \quad (5.4.6)$$

Tritt der Stromabriss kurz vor dem natürlichen Nulldurchgang des Laststromes auf, wie es beim Ausschalten von induktiven Lastströmen $> (100 \dots 150) \text{ A}$ der Fall sein wird, ist u_{NC} annähernd gleich dem Scheitelwert der treibenden Netzspannung \hat{u}_N . Für die Abreißüberspannung u_{max} folgt dann

$$u_{max} \approx \sqrt{\hat{u}_N^2 + i_{ch}^2 \cdot L_L / C_L} \quad (5.4.7)$$

Bei einer um 5 % höheren Netzspannung von $1,05 \cdot U_m$ wird in diesem Fall die lastseitige Überspannung um höchstens 5 % größer, da nur der erste Term in der Wurzel von der speiseseitigen Spannung abhängt.

Bei Stromabriss im Scheitelwert wird $u_{NC} = 0$, und für u_{max} ergibt sich

$$u_{max} \approx i_{ch} \cdot \sqrt{L_L / C_L} \quad (5.4.8)$$

Da in diesem Fall keine elektrische Energie in der Lastkapazität C_L gespeichert ist, ist die Abreißüberspannung u_{max} nicht von der Netzspannung u_N , sondern nur vom Abreißstrom i_{ch} abhängig.

Beim Ausschalten des Magnetisierungsstromes von Transformatoren muss ebenfalls mit Stromabriss gerechnet werden [21]. In der Literatur wird für diesen Fall für kaltgewalztes Blech der Überspannungsfaktor k_a als Funktion des "Chop Parameters" $\left(\frac{C_t \cdot U_r^2}{\alpha P_r} \right)$ angegeben, mit Parallelkapazität C_t (bestehend aus Eingangskapazität des Transformators und Zuleitungskapazitäten) in F, Bemessungsspannung U_r in V, Bemessungsleistung P_r in W und dem Verhältnis α von Magnetisierungsstrom zu Bemessungsstrom [29]. Die Funktion

$$k_a = f \left(\frac{C_t \cdot U_r^2}{\alpha P_r} \right) \quad (5.4.9)$$

ist in Bild 28 dargestellt.

5 Mögliche Einschränkungen der Funktionalität von Betriebsmitteln bei Betrieb mit Spannungen $>U_m$

In Bild 28 ist beispielhaft der Überspannungsfaktor k_a mit den technischen Daten eines 400/120 kV/250 MVA-Transformators und eines 115/10,5kV/30 MVA-Transformators für die primäre Bemessungsspannung und für $1,05 \cdot U_m$ ($U_m = 420$ kV bzw. 123 kV) eingezeichnet.

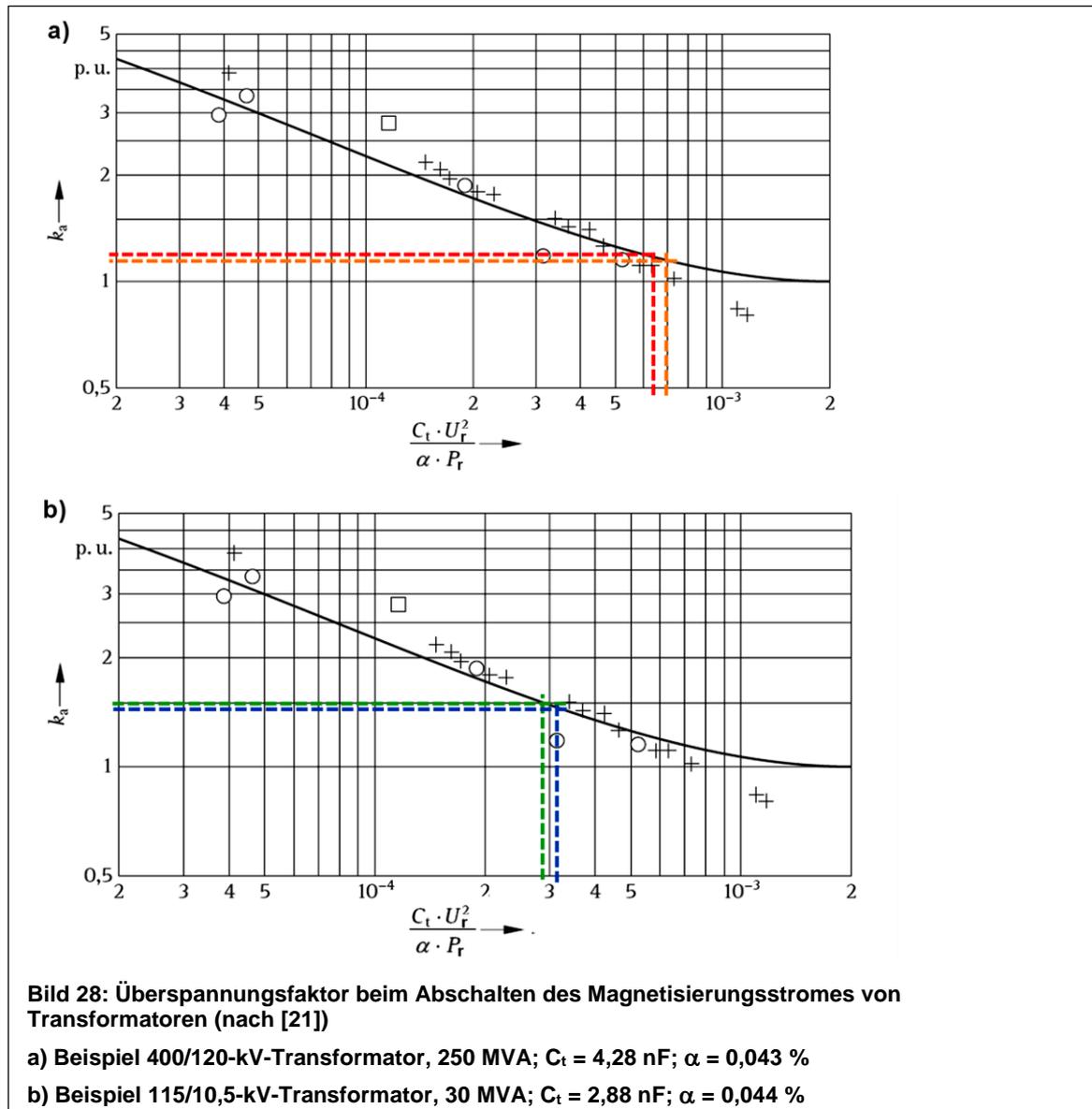
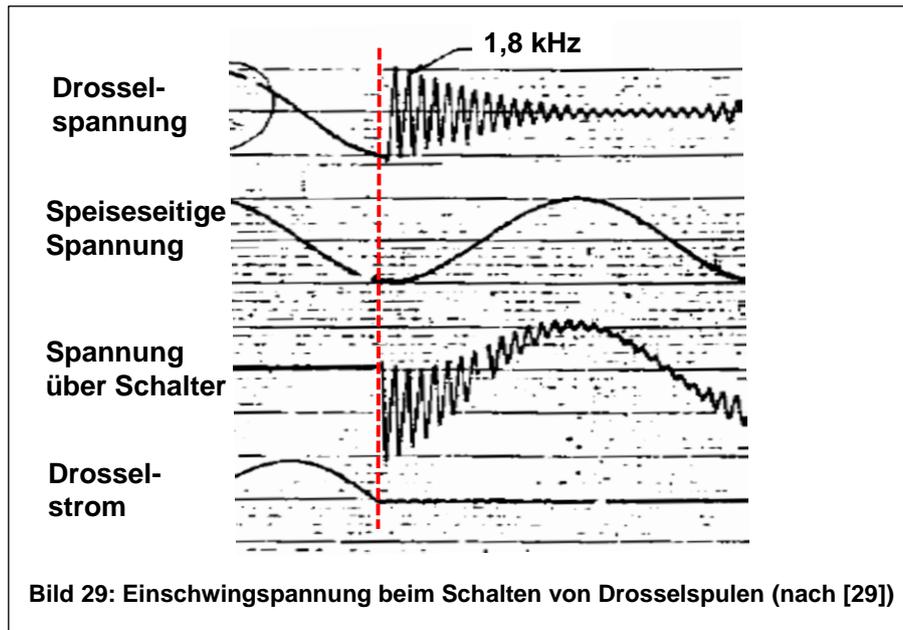


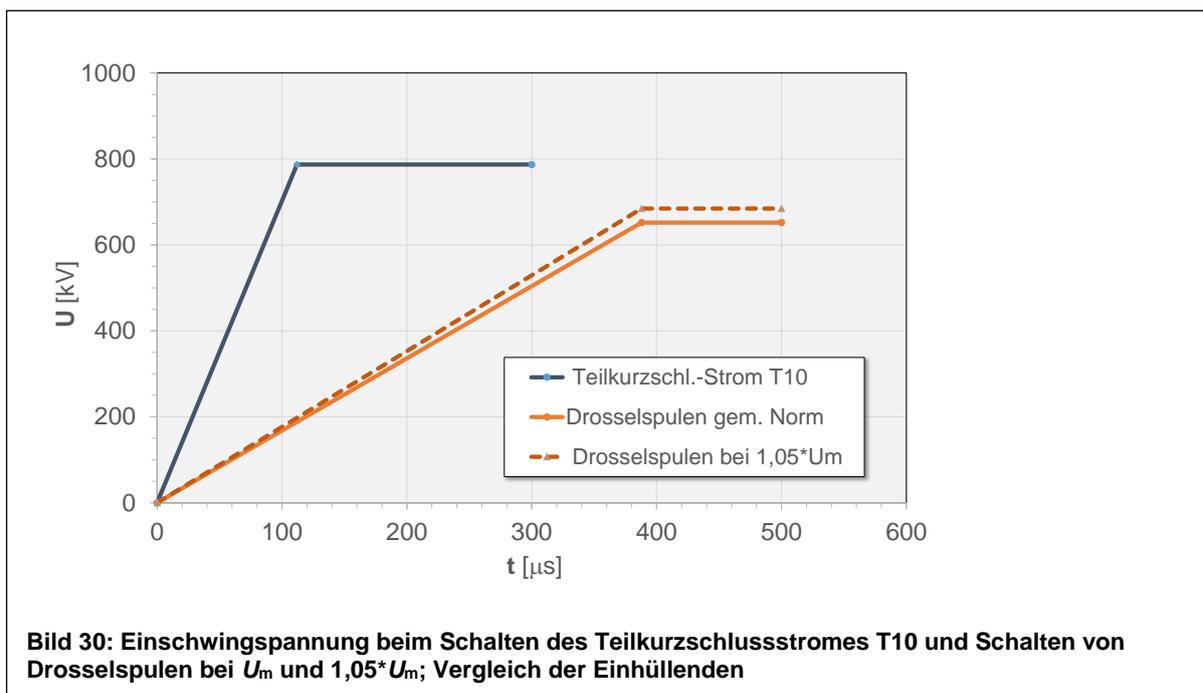
Bild 28 zeigt, dass der Überspannungsfaktor gering ist und von der höheren Spannung nur unwesentlich beeinflusst wird.

5.4.3.3. Einschwingspannung

Nach Unterbrechen des Stromes wird die Schaltstrecke mit der Einschwingspannung, d.h. der Differenz der betriebsfrequenten Spannung der Speiseseite und der hochfrequenten Spannung der Lastseite, beansprucht (Bild 29).



Wenn die Drossel vor Abschalten mit einer Spannung von $1,05 \cdot U_m$ betrieben wird, tritt eine um 5 % höhere Einschwingspannung auf. Da der Schalter in der Lage ist, den Drosselstrom mit kurzer Lichtbogenzeit zu unterbrechen, die dielektrische Festigkeit der Schaltstrecke aber noch nicht ausreicht, muss beim Schalten von kleinen induktiven Strömen grundsätzlich mit Wiederezündungen gerechnet werden. Wegen der größeren Steilheit und Amplitude der Einschwingspannung können bei Betrieb mit $1,05 \cdot U_m$ verstärkt Wiederezündungen auftreten. Ein Schalterversagen ist jedoch auch bei erhöhter Einschwingspannung nicht zu erwarten, denn die Einschwingspannung im induktiven Schaltfall gem. [30] ist weniger kritisch als die beim Schalten des 10 %-Teilkurzschlussstromes gem. [20], bei dem ebenfalls Ströme geschaltet werden, bei denen das dielektrische Verhalten der Schaltstrecke im Vordergrund steht. Bild 30 zeigt die Einhüllende der Einschwingspannung für die entsprechenden Schaltfälle.



5.4.3.4. *Wiederzündungen*

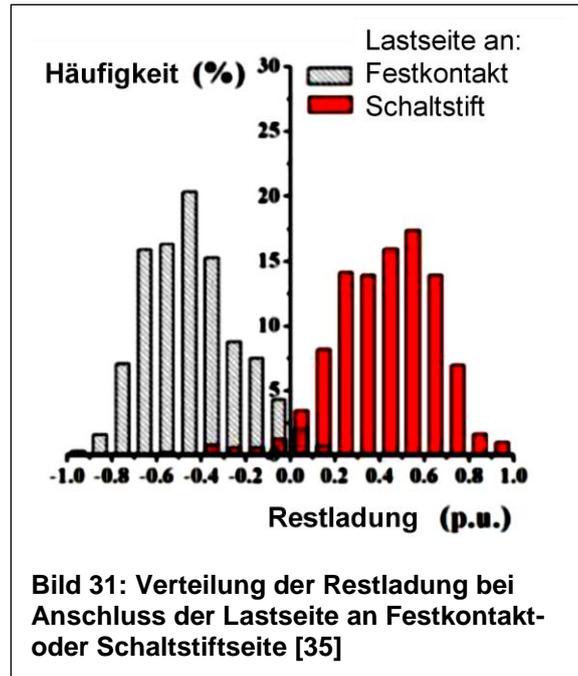
Wie bereits zuvor beschrieben, muss bei Betrieb mit $1,05 \cdot U_m$ verstärkt mit Wiederzündungen gerechnet werden. Wiederzündungen sind mit hochfrequenten Ausgleichsvorgängen verbunden, die die Isolierung der angeschlossenen Betriebsmittel stark beanspruchen können. Daher ist insbesondere beim Betrieb von Drosselpulen mit $1,05 \cdot U_m$ zu empfehlen, Wiederzündungen zu vermeiden, indem durch gesteuertes Schalten eine Lichtbogenzeit von mindestens 5 ms angestrebt wird. Beim Einstellen des Auslösezeitpunktes sollte überprüft werden, ob die angestrebte Lichtbogenzeit inklusive Streuung auch bei einer um 5 % höheren Einschwingspannung ein Ausschalten ohne Wiederzündung gewährleistet.

5.4.4. Trennschalter

Trennschalter müssen als Sicherheitselemente eine höhere Spannungsfestigkeit in der Trennstrecke als gegen Erde aufweisen. Diese wird bei 123-kV- und 245-kV-Geräten durch eine Prüfung mit Wechselfeldspannung und Blitzstoßspannung nachgewiesen [28], [31]. Insofern besteht keine direkte Korrelation zur Betriebsspannung. Bei 420-kV-Geräten wird neben diesen Prüfungen noch eine Prüfung mit Schaltstoßspannung durchgeführt, wobei ein Pol an Betriebsspannung $420 \text{ kV} \cdot \sqrt{2}/\sqrt{3} = 343 \text{ kV}$ liegt. Der andere Pol wird mit einer Schaltstoßspannung von 900 kV entsprechend 2,6 p.u. beaufschlagt. Da dieser Wert, wie bereits in Kapitel 5.2 ausgeführt, deutlich über den im 380-kV-Netz zu erwartenden Schaltüberspannungen von max. 2,3 p.u. liegt, sollte die Festigkeit der Schaltstrecke auch bei 420-kV-Trennschaltern durch eine erhöhte Betriebsspannung von $1,05 \cdot U_m$ nicht unzulässig beeinträchtigt werden.

5.4.4.1. *GIS-Trennschalter*

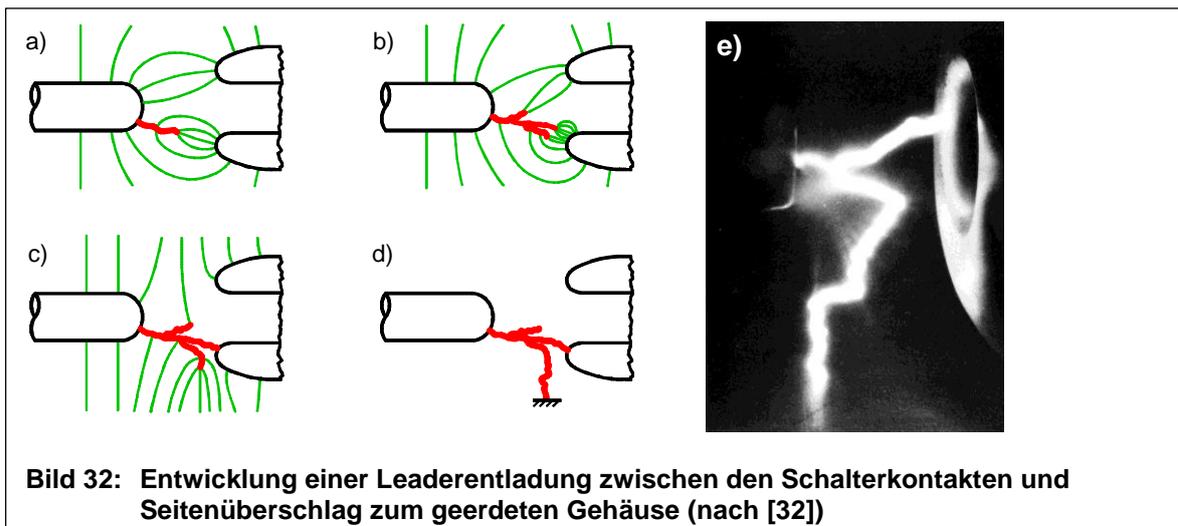
Beim Schalten von kleinen kapazitiven Strömen mit GIS-Trennschaltern entstehen Ausgleichsvorgänge mit Überspannungen in Frequenzbereichen von einigen MHz bis zu einigen 10 MHz mit überlagerten Wanderwellenvorgängen und sehr schnell ansteigenden Überspannungen (engl.: very fast transient overvoltages / VFTO) [32]. Diese Ausgleichsvorgänge (VFTO) werden durch den steilen Spannungszusammenbruch in SF₆ bei einer Wiederzündung ausgelöst. Besonders kritisch sind solche Vorgänge, die sowohl eine hohe Überspannungsamplitude als auch eine hohe Frequenz in der Ausgleichsschwingung aufweisen, wie sie beim Schalten von kurzen Rohrlängen von 3...7 m auftreten [33], [34]. Hier sind Überspannungen von max. 1,5 p.u. zu erwarten, wenn keine Vorladung auf der Lastseite vorhanden ist, d.h. die Wiederzündung mit einem Spannungssprung von $\Delta U = 1,0 \text{ p.u.}$ verbunden ist.



Da nach einer Ausschaltung eine Vorladung von $-1,0$ p.u. nicht auszuschließen ist (Bild 31) und somit ein Spannungssprung von $\Delta U = 2,0$ p.u. bei einer Wiederrzündung auftreten kann, muss man mit maximalen Überspannungen rechnen, die etwa bei 2 p.u. liegen. Dieser Wert U_{hf} kann aus dem Maximalwert ohne Restladung nach folgender Gleichung berechnet werden [34]:

$$U_{hf} (\Delta U = 2,0 \text{ p.u.}) = 2 \cdot [U_{hf} (\Delta U = 1,0 \text{ p.u.}) - 1] + 1 \quad \text{in p.u.} \quad (5.4.10)$$

Bei ungeeigneter Konstruktion des Trennschalters könnte durch diese Vorgänge ein Erdfehler eingeleitet werden, wenn der Lichtbogen zwischen den Schaltkontakten zum geerdeten Gehäuse abirren kann (Bild 32).



Ein solcher Fehler ist aber auch bei einer Betriebsspannung von $1,05 \cdot U_m$ nicht zu erwarten, wenn der GIS-Trennschalter gemäß VDE 0671-102 Anhang F [28] geprüft wurde. Diese Prüfung wird nämlich mit $(1,1/\sqrt{3})$ -facher Bemessungsspannung auf der Speiseseite und einer entsprechenden Gleichspannung auf der Lastseite durchgeführt.

5.4.4.2. Freiluft-Trennschalter

Beim Schalten von Freiluft-Trennschaltern kommt es ähnlich wie beim Schalten von GIS-Trennschaltern zu einer Vielzahl von dauernden Wieder- und Rückzündungen. Je nach Schaltgeschwindigkeit und zu schaltendem Strom dauert der Schaltvorgang 1...2 Sekunden. Wird eine solche Schaltung bei einer Betriebsspannung von $1,05 \cdot U_m$ durchgeführt, so ist eine geringfügig längere Schaltdauer zu erwarten, die aber im Bereich der statistischen Streuung liegen wird.

5.5. Transformatoren

Der Betrieb mit $1,05 \cdot U_m$ hat Einfluss auf die magnetische und dielektrische Beanspruchung des Transformators. Hinsichtlich der magnetischen Beanspruchung kann es je nach Stufenschalterstellung zu einer Übererregung kommen. In der Folge können zusätzliche Erwärmung und verstärkte Geräusche auftreten. In VDE 0523-76-1 [36] ist spezifiziert, dass ein Transformator auch im Dauerbetrieb mit Vollast bei Übererregung von 105% der Bemessungsspannung und im Leerlauf bei Übererregung von 110% ohne Beschädigung betrieben werden können muss. Die in [36] angeführte Voraussetzung „innerhalb der vorgeschriebenen Werte von U_m für die Transformatorwicklungen“ soll im Folgenden zunächst unberücksichtigt bleiben, da die Übererregung im Kurzzeitbetrieb betrachtet wird. Bei einem K -fachen Stromwert muss die Übererregung bei Bemessungsfrequenz gemäß (5.5.1) begrenzt werden.

$$U/U_r \cdot 100 \leq 110 - 5 \cdot K (\%) \quad (5.5.1)$$

Allerdings stimmt bei Transformatoren die Bemessungsspannung U_r in der Regel nicht mit der höchsten dauernd zulässigen Spannung für Betriebsmittel U_m überein. Daher ist die magnetische Beanspruchung eines Transformators bei $1,05 \cdot U_m$ mit Bezug auf die primäre Bemessungsspannung U_{r1} zu bewerten.

Die primäre Bemessungsspannung U_{r1} wird oft so gewählt, dass sich in Mittelstellung unter Berücksichtigung einer zulässigen Übererregung von 105% bei Vollast $U = U_m$ einstellt. Beispiele für die Bemessung von Netztransformatoren sind aus Tabelle 4 zu entnehmen.

U_m	U_{r1}	U_{r2}	U_{r3}
420 kV	400 kV $\pm 16\%$ in ± 13 Stufen	120 kV	30 / 33 kV
123 kV	115 kV $\pm 16\%$ in ± 9 Stufen	10,5 / 11 kV	

Sofern die Transformatoren wie in Tabelle angegeben ausgelegt sind, tritt somit bei Betriebsspannungen von $1,05 \cdot U_m$ in Mittelstellung und darunter im Leerlauf keine im Dauerbetrieb unzulässige Übererregung auf. Bei Belastung wird es abhängig vom Laststrom zu einer im Dauerbetrieb unzulässigen Übererregung kommen. Da diese gemäß Annahme in Kapitel 4 aber nur kurzzeitig wirkt, ist keine unzulässige Übererwärmung zu erwarten. In jedem Fall muss aber mit gegenüber der Bemessungsspannung höheren Geräuschen gerechnet werden.

Bei Abweichung von der Bemessungsfrequenz ist der Faktor f/f_r (f = aktuelle Netzfrequenz, f_r = Bemessungsfrequenz) zu berücksichtigen. Bei nach [37] zulässigen Unterfrequenzen von bis herab zu 48,5 Hz ($48,5 \text{ Hz} \leq f < 50 \text{ Hz}$) für 30 min ist dadurch eine kurzzeitige Übererregung

5.6. Drosselspulen

Auch bei Drosselspulen kann ähnlich wie bei Transformatoren die Bemessungsspannung von der höchsten dauernd zulässigen Spannung für Betriebsmittel U_m bzw. der maximalen Betriebsspannung U_{max} abweichen. Daher ist auch bei Drosselspulen die magnetische und dielektrische Beanspruchung bei Betrieb mit $1,05 \cdot U_m$ in Bezug auf die Bemessungsspannung U_r zu betrachten. Ein typisches Beispiel für die Bemessung einer Kompensationsdrosselspule zeigt Tabelle 5. Bei $1,05 \cdot U_m$ wird ein größerer Eingangsstrom verglichen mit dem bei Bemessungsspannung U_r fließen und zu einer höheren Verlustleistung führen.

U_m	U_r	U_{max}
420 kV	400 kV	420 kV

Die Verlustleistung ergibt sich aus den Kupfer- und den Magnetisierungsverlusten. Da es sich in der Regel um Drosselspulen mit Luftspalt handelt, wird auch bei $1,05 \cdot U_m$ noch lineares Verhalten vorliegen. Somit wird die Verlustleistung mehr oder weniger quadratisch ansteigen. Im vorliegenden Fall wird die Verlustleistung bei $1,05 \cdot U_m$ um 10% höher liegen als bei der maximalen Betriebsspannung U_{max} . Diese höhere Verlustleistung wird aber nur für maximal 30 Minuten wirken und in der Regel nicht bei der für die Bemessung angenommenen maximalen Umgebungstemperatur von 40 °C auftreten, sodass mit keiner unzulässigen Übertemperatur zu rechnen ist. Bei eingeschränkter Kühlleistung sind unzulässige Übertemperaturen aber nicht auszuschließen. In jedem Fall werden aber höheren Geräusche auftreten, da die Geräusche bei Bemessungsspannung und Bemessungsstrom definiert sind. Es muss mit einem Zuwachs aufgrund des höheren Magnetisierungsstromes wie auch des höheren Laststromes gerechnet werden.

5.7. Strom- und Spannungswandler

5.7.1. Genauigkeit

Messwandler haben die Aufgabe, den aktuellen Messwert amplituden- und phasenrichtig zu übertragen. Die zulässige Abweichung bei vorgegebener Genauigkeit ist in VDE 0414-9-2 bzw. VDE 0414-9-3 [39] spezifiziert. Danach sind für Stromwandler die Übersetzungsmessabweichung und der Fehlwinkel bei 5 %, 20 %, 100 % und 120 % des Bemessungswertes und für Spannungswandler die Spannungsmessabweichung und der Fehlwinkel bei jeder Spannung zwischen 80 % und 120 % der Bemessungsspannung definiert.

Somit sind auch bei Betriebsspannungen von $1,05 \cdot U_m$ keine Einschränkungen der Genauigkeit von Spannungswandlern gegeben, ebenso von Stromwandlern, auch bei Annahme eines um 5 % höheren Betriebsstromes.

5.7.2. Kippschwingungen

In bestimmten Anlagen- und Netzkonfigurationen mit induktiven Spannungswandlern treten Kippschwingungen auf, welche durch einen transienten Vorgang angeregt werden und auf das Zusammenwirken der nichtlinearen Hauptinduktivität des Wandlers L_h und der Anlagenkapazitäten gegen Erde C_2 zurückzuführen sind. Je nach Verlusten in diesem Serienschwing-

kreis können stationäre oder abklingende Kippschwingungen entstehen. Stationäre Kippschwingungen können thermische und dielektrische Überbeanspruchungen des Betriebsmittels verursachen.

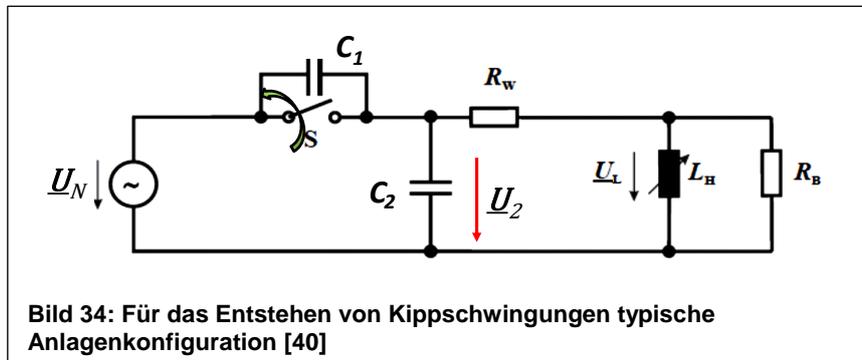


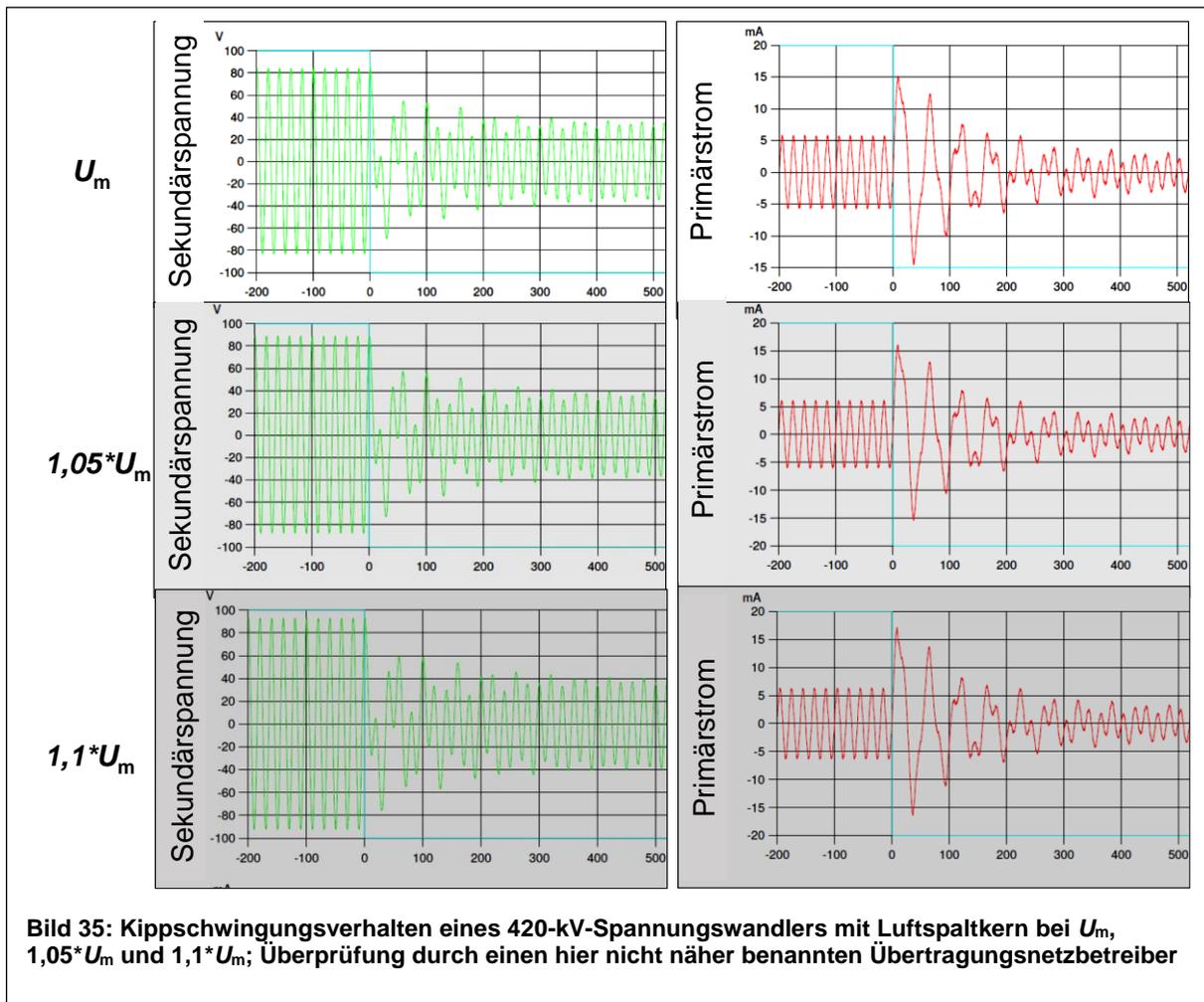
Bild 34: Für das Entstehen von Kippschwingungen typische Anlagenkonfiguration [40]

Eine typische Anlagenkonfiguration, bei der sich häufig auch stationäre Kippschwingungen ausbilden, ist in Bild 34 dargestellt [40]. Durch das Ausschalten des Schalters S entlädt sich der Kondensator C_2 über den Wandler, und in der Folge werden abhängig von den Kreisparametern (Magnetisierungskennlinie, Kapazitäten), der Spannung U_N und dem Schaltaugenblick stationäre oder abklingende Kippschwingungen angeregt. Stationäre Kippschwingungen können dann auftreten, wenn dem Serienschwingkreis über die Steuerkapazität C_1 des Leistungsschalters ständig Energie zugeführt wird, die die ohmschen, Wirbelstrom- und Hysterese-Verluste kompensieren. Als Abhilfemaßnahme hat sich der Einsatz von induktiven Spannungswandlern mit gescherter Kennlinie, d.h. ein Eisenkern mit Luftspalt, bewährt.

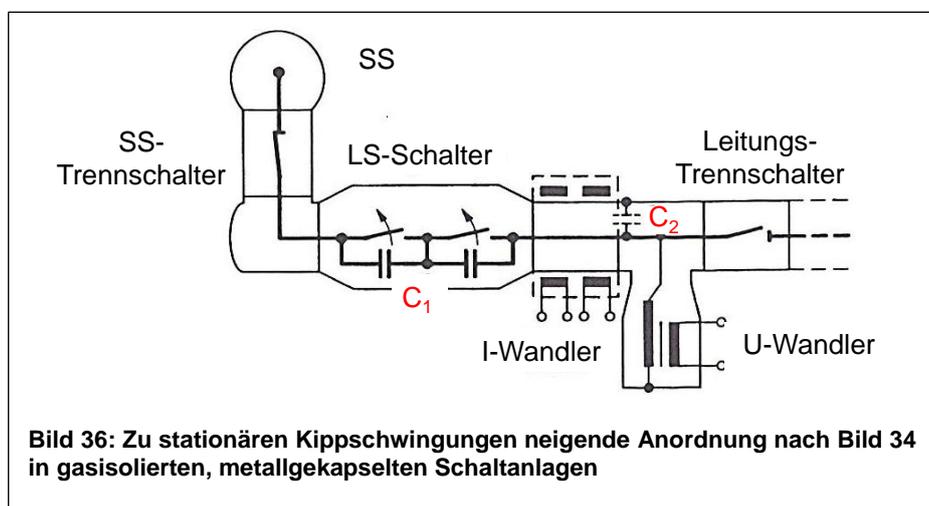
Da neben den Verlusten die weiteren Kreisparameter wesentlichen Einfluss auf das Kippschwingungsverhalten haben, muss bei Änderung dieser Parameter, also auch bei Betrieb der Anordnung mit einer Spannung von $1,05 \cdot U_m$, überprüft werden, ob das abklingende Schwingungsverhalten weiterhin gegeben ist. Eine solche Überprüfung kann versuchstechnisch oder durch Simulation erfolgen, sofern ein geeignetes Simulationsmodell vorliegt [41].

Bild 35 zeigt das Ergebnis der versuchstechnischen Überprüfung eines 420-kV-Spannungswandlers mit Luftspaltkern bei U_m , $1,05 \cdot U_m$ und $1,1 \cdot U_m$ durch einen hier nicht näher benannten Übertragungsnetzbetreiber. Man sieht, dass im vorliegenden Fall die gewählte konstruktive Maßnahme geeignet ist, auch bei Spannungen von $1,05 \cdot U_m$ und sogar $1,1 \cdot U_m$ stationäre Kippschwingungen zu vermeiden.

5 Mögliche Einschränkungen der Funktionalität von Betriebsmitteln bei Betrieb mit Spannungen $>U_m$



Die Kreisparameter entsprechen denen eines typischen Freiluft-Schaltfeldes mit Leistungsschalter-Steuerkapazität $C_1 = 250 \text{ pF}$ und Eigenkapazität C_2 des SF6-Kombiwandlers von $\sim 250 \text{ pF}$. Bei anderen Kreisparametern C_1 und C_2 ist auch bei gleicher magnetischer Auslegung des Spannungswandlers eine separate Überprüfung des Schwingungsverhaltens erforderlich. So ist z. B. in gasisolierten, metallgekapselten Schaltanlagen die Steuerkapazität C_1 wegen der metallischen Kapselung wesentlich größer und die Kapazität C_2 wesentlich kleiner, da neben der Eigenkapazität des Spannungswandlers nur eine Erdkapazität von wenigen 10 pF vorliegt (Bild 36).



5.8. Überspannungsableiter

Bei der Bemessung von Überspannungsableitern werden zeitweilige Überspannungen durch entsprechende Wahl der maximal zulässigen Dauerspannung sowie der Bemessungsspannung, d.h. der für eine Dauer von 10 s zulässigen Überspannung berücksichtigt [42][43]. Auf diese Weise soll eine (thermische) Überlastung vermieden werden.

In Tabelle 6 sind die in deutschen Netzen üblichen Werte der Dauerspannung und der Bemessungsspannung dargestellt [44], wobei in 110-kV-Netzen zwischen Netzen mit starrer Sternpunktterdung und Netzen mit Erdschlusskompensation unterschieden wird. Ableiterkennwerte werden grundsätzlich mit Bezug auf die Systemspannung U_s dargestellt (U_m ist für Ableiter nicht definiert).

Aus Tabelle 6 geht hervor, dass auch bei einer Betriebsspannung von $1,05 \cdot U_m$ keine thermische Überbeanspruchung der Ableiter zu erwarten ist. Daneben ist auch der Fall zu bedenken, dass in Netzteilen, die mit einer Spannung von $1,05 \cdot U_m$ betrieben werden, zeitweilige Überspannungen aufgrund von Erdfehlern oder Lastabwurf auftreten. Hierbei kann es zu Spannungen größer als die zulässige Dauerspannung des Ableiters kommen. Anhand der Spannungszeit-Kennlinie eines Ableiters ist dann zu prüfen, ob dies zu einer Überlastung des Ableiters führen kann.

Tabelle 6: In deutschen Netzen übliche Kennwerte von Überspannungsableitern (nach [44])

Netz-nennspannung (kV)	Erdung	Dauer-spannung (kV)	Bemessungs-spannung ¹⁾ (kV)	Betriebsspannung
				$1,05 \cdot U_s / \sqrt{3}$ (kV)
110	Petersenspule	123	144	75
110	starr	75	126	75
220	starr	160	216	149
380	starr	260	360	255

¹⁾ gem. VDE 0675-1, 08-2000: Für die Dauer von **10 s** zulässige Überspannung

Zunächst sei der Erdfehler im gelöscht betriebenen 110-kV-Netz betrachtet. Für die angenommene Zeitdauer von 30 min der erhöhten Betriebsspannung von $1,05 \cdot U_m$ kommt es zu einem Erdschluss mit einer Spannung am Ableiter von $1,05 \cdot 123 \text{ kV} = 129 \text{ kV}$. Die für diesen Fall zutreffende Spannungszeit-Kennlinie des Ableiters ist Bild 37 zu entnehmen. Es ist einmal

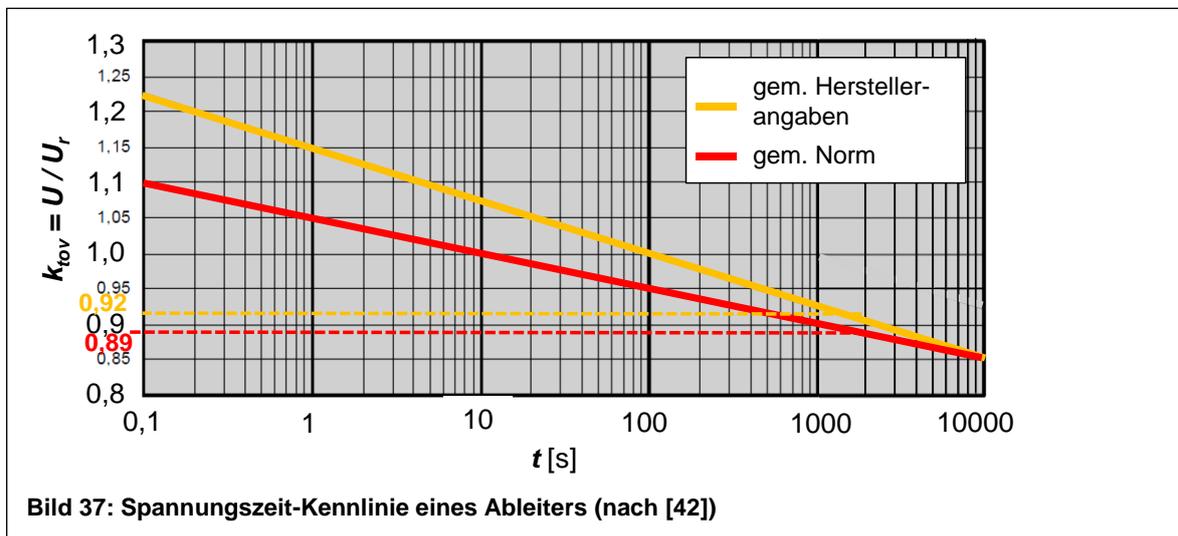


Bild 37: Spannungszeit-Kennlinie eines Ableiters (nach [42])

die normgemäße Kennlinie dargestellt, bei der die Bemessungsspannung auf 10 s bezogen ist. Der Faktor k_{tov} beträgt in diesem Fall $U/U_r = 129 \text{ kV}/144 \text{ kV} = 0,89$. Zum anderen ist eine Kennlinie gezeigt, wie sie von vielen Herstellern angegeben wird, bei der die Bemessungsspannung auf 100 s bezogen ist. In diesem Fall beträgt $k_{tov} = 0,92$. Die Kennlinien gelten für den Fall, dass der Ableiter mit der vollen Nennenergie vorbelastet wurde und entsprechend aufgeheizt ist.

Aus Bild 37 geht hervor, dass die zulässige Spannung knapp überschritten würde, wenn man die Norm-Kennlinie annimmt ($1,05 \cdot U_m = 129 \text{ kV} > 0,89 \cdot 144 \text{ kV} = 128,2 \text{ kV}$). D.h. bei einer Vorbeanspruchung in Höhe der Nenn-Energie könnte der Ableiter thermisch instabil werden. Geht man allerdings von den Herstellerangaben aus, wird auch dieser Betriebsfall ohne weiteres beherrscht ($1,05 \cdot U_m = 129 \text{ kV} < 0,92 \cdot 144 \text{ kV} = 132,5 \text{ kV}$).

Als nächstes soll der einpolige Erdfehler im starr geerdeten Netz betrachtet werden. Der Erdfehlerfaktor betrage $\delta \leq 1,4$ und die Fehlerdauer $\leq 1 \text{ s}$ [45]. Der Faktor k_{tov} für den einpoligen Fehler geht aus Tabelle 7 hervor. Da sich für alle Spannungsebenen ein Faktor $k_{tov} < 1,05$ (zulässiger Faktor gemäß Spannungszeit-Kennlinie, Bild 37, für die Dauer von 1 s) ergibt, ist beim einpoligen Fehler mit einer Fehlerdauer $\leq 1 \text{ s}$ auch bei einer Betriebsspannung von $1,05 \cdot U_m$ keine thermische Überbeanspruchung der Ableiter zu erwarten.

Tabelle 7: Faktor k_{tov} für Erdfehler im starr geerdeten Netz bei Betriebsspannung $1,05 \cdot U_m$

U_m (kV)	$\delta \cdot 1,05 \cdot U_m / \sqrt{3}$ (kV)	U_r (kV)	k_{tov}
123	104	126	0,83
245	208	216	0,96
420	356	360	0,99

Als letztes werden die zeitweiligen Überspannungen bei Lastabwurf betrachtet. Mit einem Lastabwurffaktor $\delta_L \leq 1,5$ [45] ermittelt man für eine Betriebsspannung von $1,05 \cdot U_m$ einen Faktor k_{tov} gemäß Tabelle 8. Da die Spannung durch den Spannungsregler in der Regel nach ca. 1 Sekunde auf die Generatorspannung zurückgefahren wird, ist auch bei einem Lastabwurf bei erhöhter Spannung von $1,05 \cdot U_m$ mit keiner thermischen Überbeanspruchung der Ableiter zu rechnen.

Tabelle 8: Faktor k_{tov} für Lastabwurf bei Betriebsspannung $1,05 \cdot U_m$

U_m (kV)	$\delta_L \cdot 1,05 \cdot U_m / \sqrt{3}$ (kV)	U_r (kV)	k_{tov}
123	112	126	0,89
245	223	216	1,03
420	382	360	1,06

5.9. Kabelanlagen

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf die heute üblichen Kabelanlagen aus Kabeln mit extrudierter Isolierung und ihre Garnituren. Sie können sinngemäß auch auf Kabelanlagen mit anderen Isolierungen übertragen werden.

5 Mögliche Einschränkungen der Funktionalität von Betriebsmitteln bei Betrieb mit Spannungen $>U_m$

Die Prüfspannungen von Kabeln mit extrudierter Isolierung und ihre Garnituren sind in VDE 0276-632 bzw. VDE 0276-2067, jeweils Tabelle 4, angegeben [46] [47]. Danach sind im Rahmen der Typprüfungen für Kabelanlagen in 110-kV-, 220-kV- und 380-kV-Netzen Spannungsprüfungen mit betriebsfrequenter Wechselspannung gemäß Tabelle 9 durchzuführen.

Tabelle 9: Typprüfungen an VPE-Kabeln mit betriebsfrequenter Wechselspannung (nach [46], [47])

Nennspannung U_n (kV)	Höchste dauernd zulässige Spannung U_m (kV)	Prüfwechselspannung (kV)	Prüfdauer (min)	Betriebsspannung	
				$1,05 \cdot U_m / \sqrt{3}$ (kV)	$1,05 \cdot U_m$ (kV)
110 ¹⁾	123	160	30	75	129
110	123	160	30	75	
220	245	318	30	149	
380	420	440	60	255	

¹⁾ Netze mit Erdschlusskompensation

Wie aus Tabelle 9 hervorgeht, führen die im Rahmen der Typprüfung durchgeführten Spannungsprüfungen zu deutlich höheren Beanspruchungen als die hier angenommenen zeitweiligen Überspannungen. Funktionseinschränkungen bei Kabelanlagen sind daher unter diesem Gesichtspunkt nicht zu erwarten.

5.10. Zusammenfassende Bewertung

Werden Betriebsmittel des Hoch- und Höchstspannungsnetzes mit Spannungen größer als die Bemessungsspannung betrieben, sind mögliche Funktionseinschränkungen zu bedenken:

Freileitungen

Der Betrieb einer Freileitung mit $1,05 \cdot U_m$ hat keine Auswirkung auf die grundsätzliche Bemessung der Abstände einer Freileitung. Auswirkungen auf das Koronaverhalten der Leiterseile und Armaturen sind nicht zu erwarten, da die Randfeldstärken der Leiterseile deutlich unter den zulässigen Werten liegen bzw. die Armaturen mit $1,1 \cdot U_m$ geprüft werden. Der vereinheitlichte spezifische Kriechweg der Isolatoren ist in der Regel so bemessen, dass er auch bei einer Spannung von $1,05 \cdot U_m$ den Anforderungen für mittlere Verschmutzung genügt.

Freiluft-Schaltanlagen

Die Mindestabstände in Freiluft-Schaltanlagen im 110-kV- und 220-kV-Netz werden durch die Bemessungs-Blitzstoßspannung und im 380-kV-Netz durch die Bemessungs-Schaltstoßspannung bestimmt. Die Bemessungs-Blitzstoßspannung ist von der atmosphärischen Überspannung abgeleitet. Für die Bemessungs-Schaltstoßspannung wird in der Regel ein Wert von 1050 kV entsprechend einer angenommenen Schaltüberspannung von 2,9 p.u. angesetzt. Derart hohe Schaltüberspannungen können in deutschen 380-kV-Netzen aber nicht auftreten. Daher ist die Bemessung der Mindestabstände von aktiven Teilen in Freiluft-Schaltanlagen auch bei Beanspruchung mit $1,05 \cdot U_m$ ausreichend sicher.

GIS-Schaltanlagen

Für die Auslegung von gasisolierten Schaltanlagen (GIS) ist die Bemessungs-Stehblitzstoßspannung maßgebend, die von äußeren Überspannungen abgeleitet wird und von der Betriebsspannung nicht beeinflusst wird. Daneben soll die Bemessungs-Stehblitzstoßspannung auch eine ausreichende Spannungsfestigkeit gegenüber inneren Überspannungen beim Schalten von Trennschaltern nachweisen. Da die sehr schnell ansteigenden Überspannungen kleiner sind als die Koordinations-Stehblitzstoßspannung, sind diese durch die Bemessungs-Stehblitzstoßspannung abgedeckt. Treten die sehr schnell ansteigenden Überspannungen nun bei Betrieb mit $1,05 \cdot U_m$ auf, wird der Abstand zur Stehblitzstoßspannung zwar kleiner, bei einwandfreiem Isolationsverhalten kann dieser Effekt aber vernachlässigt werden.

Leistungsschalter

Ist am Netzknoten bei Betrieb mit $1,05 \cdot U_m$ mit Kurzschlussströmen im Bereich des Bemessungs-Kurzschlussstromes zu rechnen, sind Netzverhältnisse im Kurzschlussfall zu prüfen, insbesondere das Verhältnis Nullimpedanz X_0 zu Mitimpedanz X_1 . Ist das Verhältnis $X_0/X_1 < 2,5$, so ist in starr geerdeten Netzen beim dreipoligen Kurzschluss der Polfaktor $k_{pp} < 1,3$ und somit die Wiederkehrspannung kleiner als die gemäß Norm geprüfte. In solchen Fällen ist davon auszugehen, dass der Schalter diesen Kurzschlussfall auch bei einer Spannung von $1,05 \cdot U_m$ beherrscht. Ebenso sollte der Abstandskurzschluss beherrscht werden, da dieser Schaltfall gemäß Norm mit einem Kurzschlussstrom bezogen auf den Bemessungs-Kurzschlussstrom geprüft wird, in der Praxis aber in der Regel durch einen einpoligen Erdkurzschlussstrom in Höhe von 85...90 % des dreipoligen Kurzschlussstromes verursacht wird. Somit wird auch die für diesen Schaltfall kritische Anfangsteilheit geringer sein.

Das Schalten von Teilkurzschlussströmen bei Transformator nahen Fehlern, z.B. (T10) sollte auch bei $1,05 \cdot U_m$ beherrscht werden, sofern ein Transformator-Sternpunkt geerdet ist. In diesem Fall kann man von einem Polfaktor $k_{pp} = 1,3$ ausgehen, wenn man dreipolige Fehler ohne Erdberührung ausschließt. Damit kann für die Einschwingspannung eine Amplitude von $1,05 \cdot 87\%$ des Normwertes angenommen werden. Wenn aus netztechnischen Gründen die Erdung des Transformator-Sternpunkt nicht möglich ist, muss geklärt werden, ob der eingesetzte Schalter unter Berücksichtigung der Eigenfrequenz des Transformators die höhere Einschwingspannung (Amplitude und Steilheit) beherrscht.

Beim Ausschalten von nicht kompensierten Leitungen bei Betriebsspannungen von $1,05 \cdot U_m$ sind Rückzündungen nicht auszuschließen. Insbesondere bei $k_c = 1,2$ und $1,3$. Das kapazitive Schalten von kompensierten Leitungen ist weniger kritisch, weil die Wiederkehrspannung wegen der niederfrequenten Schwingung der Leitungsseite kleiner ist. Erfolgt die Zuschaltung der Leitung bei einer Spannung von $1,05 \cdot U_m$, sind sowohl der betriebsfrequente als auch der transiente Ausgleichsvorgang ausgeprägter. Auswirkungen auf den Leistungsschalter am Leitungsanfang und am Leitungsende durch die transienten Überspannungen sind nicht zu erwarten, da diese durch die Bemessung gemäß Norm abgedeckt sind. Die betriebsfrequente Spannung am Leitungsende kann jedoch größer als $1,05 \cdot U_m$ werden.

Beim Schalten von kleinen induktiven Strömen sind das Phänomen des Stromabrisses und die daraus resultierenden Überspannungen sowie die Einschwingspannung und mögliche Wiederezündungen zu beachten. Da der Stromabriss nicht von der Spannung abhängig ist, würde der Wert sich bei einer Betriebsspannung von $1,05 \cdot U_m$ nicht ändern. Allerdings kann die lastseitige Überspannung um bis zu 5 % größer werden. Wegen der größeren Steilheit und

Amplitude der Einschwingspannung können bei $1,05 \cdot U_m$ verstärkt Wiederzündungen auftreten. Ein Schalterversagen ist jedoch nicht zu erwarten, da die Einschwingspannung im induktiven Schaltfall weniger kritisch ist als die beim Schalten des 10 %-Teilkurzschlussstromes, bei dem ebenfalls das dielektrische Verhalten der Schaltstrecke im Vordergrund steht. Wiederzündungen lassen sich durch gesteuertes Schalten vermeiden. Beim Einstellen des Auslösezeitpunktes sollte überprüft werden, ob ein Ausschalten ohne Wiederzündung auch bei einer um 5 % höheren Einschwingspannung gewährleistet ist.

Trennschalter

Das Schalten von kleinen kapazitiven Strömen mit GIS-Trennschaltern sollte auch bei $1,05 \cdot U_m$ möglich sein, da dieser Schaltfall gemäß Norm mit der 1,1-fachen Phasenspannung auf der Speiseseite und der 1,1-fachen Spannung als Vorladung auf der Lastseite geprüft wird. Bei Freiluft-Trennschaltern ist mit einer geringfügig längeren Schaltdauer zu rechnen, die sich allerdings im Bereich der statistischen Streuung bewegen wird.

Transformatoren

Bei Betriebsspannungen von $1,05 \cdot U_m$ kann es je nach Stufenschalterstellung und Belastung zu einer im Dauerbetrieb unzulässigen Übererregung kommen. Da diese aber nur kurzzeitig wirkt, ist keine unzulässige Übererwärmung zu erwarten. In jedem Fall muss aber mit gegenüber der Bemessungsspannung höheren Geräuschen gerechnet werden. Bei nach [4] zulässigen Unterfrequenzen und Zeitdauern sind ebenfalls kurzzeitige Übererregungen, die zu einer höheren Geräusentwicklung führen können, nicht auszuschließen. Bei Zuschaltung mit $1,05 \cdot U_m$ wird der Transformator wegen des höheren Inrush-Stromes stärker mechanisch beansprucht werden. Als kurzschlussfest geltende Transformatoren sollten auch diese Beanspruchungen beherrschen. Dennoch ist zu prüfen, wie die Schutzgeräte auf die höheren Amplituden des Einschaltstromes reagieren.

Drosselspulen

Die Verlustleistung von Drosselspulen aufgrund der Kupfer- und Magnetisierungsverluste wird bei Betrieb mit $1,05 \cdot U_m$ höher liegen als bei der maximalen Betriebsspannung U_{max} . Da diese höhere Verlustleistung aber nur für maximal 30 Minuten wirkt und in der Regel nicht bei der für die Bemessung angenommenen maximalen Betriebstemperatur von 40 °C auftritt, ist mit keiner unzulässigen Übertemperatur zu rechnen. In jedem Fall werden aber höheren Geräusche auftreten.

Strom- und Spannungswandler

Die gemäß Norm spezifizierte Genauigkeit von Strom- und Spannungswandlern ist auch bei Betriebsspannungen von $1,05 \cdot U_m$ gegeben. Durch induktive Spannungswandler angeregte Kippschwingungen lassen sich vermeiden, wenn Spannungswandler mit Luftspalt-Kern eingesetzt werden. Solche Wandler sind in der Regel auch bei $1,05 \cdot U_m$ kippschwingungsfrei. Dennoch sollte das Kippschwingungsverhalten bei Spannungen $>U_r$ versuchstechnisch oder durch Simulation überprüft werden.

Überspannungsableiter

Bei den in deutschen Netzen üblichen Überspannungsableitern ist auch bei einer Betriebsspannung von $1,05 \cdot U_m$ keine thermische Überbeanspruchung zu erwarten. Lediglich in 110-kV-Netzen mit Erdschlusskompensation könnten Ableiter bei Vorbeanspruchung in Höhe der vollen Nennenergie instabil werden, wobei dieser Fall als selten einzustufen ist. Trifft er zu, ist das thermische Verhalten anhand der Herstellerangaben genauer zu überprüfen.

Kabelanlagen

Die im Rahmen der Typ- und Vorortprüfungen durchgeführten Spannungsprüfungen mit einer Prüfdauer von 30 bis 60 min führen zu deutlich höheren Beanspruchungen als bei den hier angenommenen Spannungen von $1,05 \cdot U_m$. Funktionseinschränkungen bei Kabelanlagen sind daher unter diesem Gesichtspunkt nicht zu erwarten.

6. Einfluss von Spannungen > U_m auf das Langzeit- und Alterungsverhalten abhängig von Dauer und Häufigkeit des Auftretens

Betriebsmittel sind grundsätzlich so ausgelegt, dass Sie die betrieblichen Beanspruchungen je nach Typ des Betriebsmittels über eine Lebensdauer von 30...50 Jahren beherrschen. Um eine ausreichende dielektrische Langzeitfestigkeit nachzuweisen, werden die Betriebsmittel einer Kurzzeit- bzw. Langzeit-Stehwechselfestigkeitsprüfung unterzogen. Prüfspannungspegel und Prüfspannungsdauer können aus der Spannungszeitcharakteristik der 0,01 %-Durchschlagswahrscheinlichkeit des Betriebsmittels – Lebensdauer abhängig von der angelegten Spannung, engl.: V-t characteristic – hergeleitet werden.

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich vorrangig auf Betriebsmittel des 380-kV-Netzes. Die Erkenntnisse können auch auf Betriebsmittel des 110-kV- und 220-kV-Netzes übertragen werden, da für diese das Verhältnis Kurzzeitwechselfestigkeit zu Bemessungsspannung in der Regel größer als ist als das für Betriebsmittel des 380-kV-Netzes. Die Ergebnisse stellen damit für Betriebsmittel des 110-kV- und 220-kV-Netzes eine Worst-Case-Abschätzung dar.

Basierend auf den Analysen der Daten der Netzbetreiber und den nationalen und europäischen Network Codes werden zwei Szenarien und ihr Einfluss auf das Langzeit- und Alterungsverhalten betrachtet. Zunächst wird angenommen, dass die betreffenden Betriebsmittel zweimal pro Woche für jeweils 30 min mit einer zeitweiligen Überspannung von $1,05 \cdot U_m$ beansprucht werden. Die Beanspruchung wird über eine angenommene Betriebszeit von 40 Jahren (entsprechend 350 400 h bzw. $2,1 \cdot 10^7$ min) akkumuliert, resultierend in einer Beanspruchungsdauer von 2,080 h bzw. $7,3 \cdot 10^4$ min bzw. 0,6 % der Betriebszeit mit erhöhter Spannung, und daraus wird der Lebensdauerverbrauch abgeleitet. Anschließend wird untersucht, bei welcher Beanspruchungsdauer eine zeitweilige Überspannung von nur $1,025 \cdot U_m$ zu einer merklichen Alterung bzw. Lebensdauerverkürzung führen würde.

6.1. Szenario 1: Zweimal pro Woche für jeweils 30 min Beanspruchung mit einer zeitweiligen Überspannung von $1,05 \cdot U_m$ über eine Betriebszeit von 40 Jahren

6.1.1. Freileitungen

Da bei der Freileitung im Wesentlichen Luft als Isoliermedium verwendet wird und die Luftisolierung nicht altert, sind Lebensdauerbetrachtungen bei Freileitungen unter dielektrischen Gesichtspunkten nicht erforderlich.

6.1.2. Freileiluft-Schaltanlagen

Bei Freiluft-Schaltanlagen kommt ebenso wie bei Freileitungen Luft als Isoliermedium zur Anwendung. Daher sind auch hier, abgesehen von den eingesetzten Betriebsmitteln, Lebensdauerbetrachtungen nicht anzustellen.

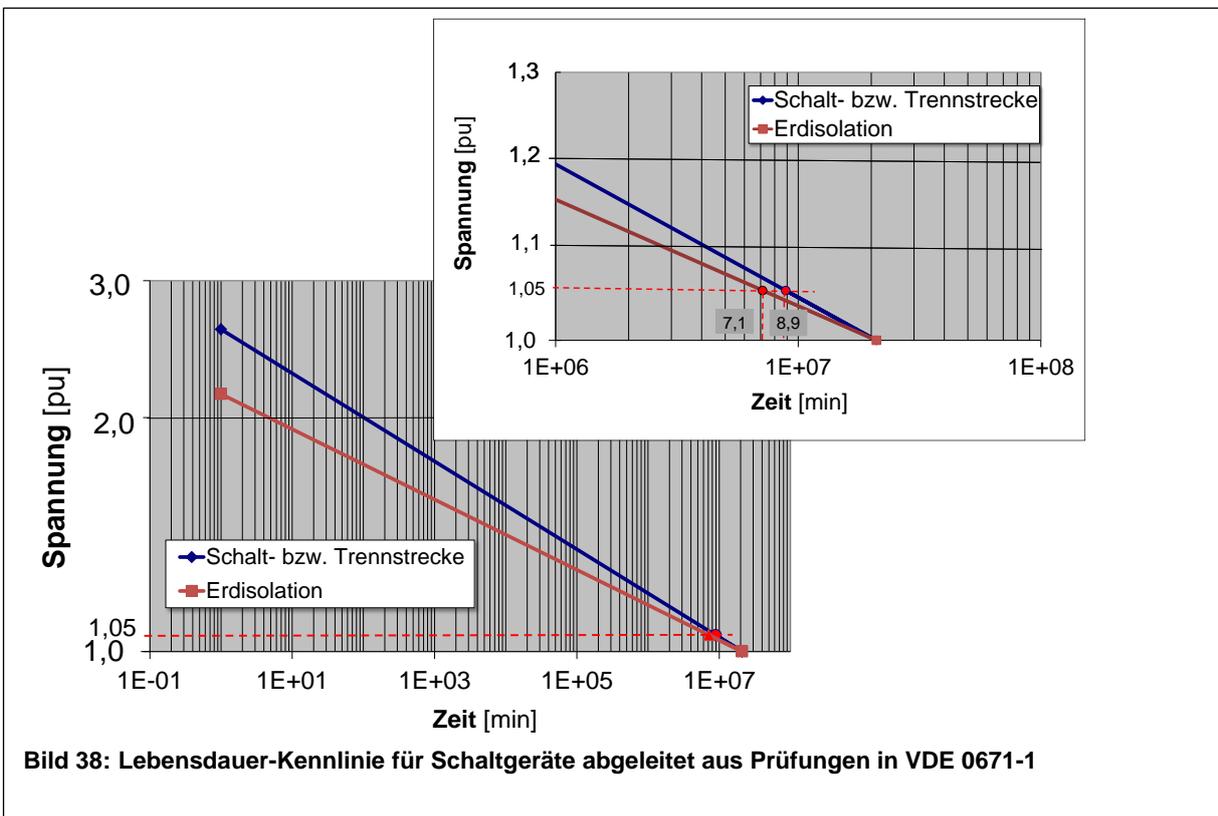
Die in Freiluftschaltanlagen eingesetzten Betriebsmittel sind nach den hierfür gültigen Normen zu betrachten. Eine mögliche Reduzierung der Lebensdauer durch zeitweilige Überspannungen ist unter Berücksichtigung der dort vorgenommenen Bemessung zu untersuchen.

6.1.3. Schaltgeräte

Schaltgeräte werden gemäß VDE 0671-1 [14] im Rahmen der Typ- und Stückprüfung einer einminütigen Wechselfestigkeitsprüfung mit 520 kV gegen Erde und 610 kV über die offene Schalt- bzw. Trennstrecke unterzogen. Unterstellt man eine Lebensdauer von ≥ 40 a, so ergibt

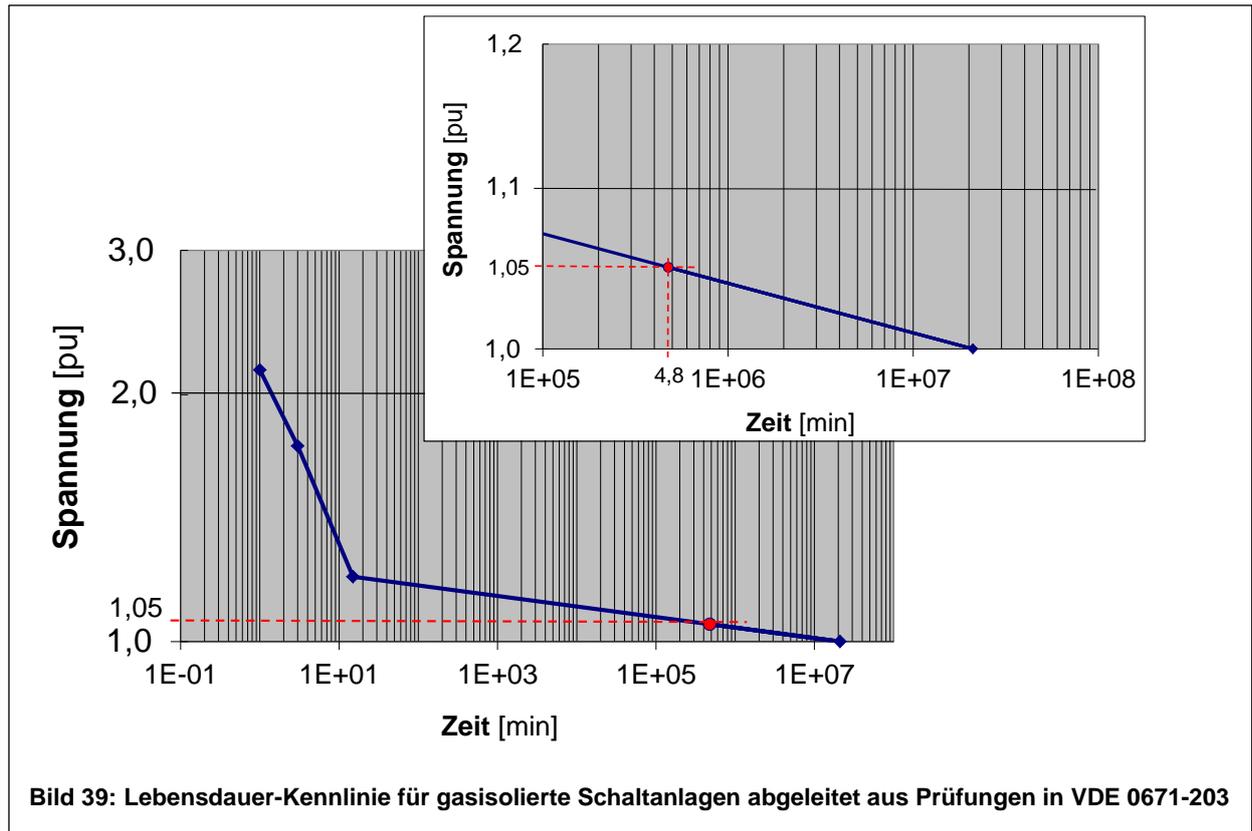
sich eine Kennlinie gemäß Bild 38. Es ist festzuhalten, dass diese Kennlinie und die für die weiteren Betriebsmittel hergeleiteten Kennlinien keine Grenzwerte darstellen, sondern aus den in den Normen aufgeführten Prüfungen abgeleitet sind.

Bild 38 zeigt, dass bei dauerndem Betrieb mit $1,05 \cdot U_m$ eine deutliche Lebensdauerverkürzung auf unter die Hälfte zu erwarten wäre (von $2 \cdot 10^7$ min auf $(7,1 \dots 8,9) \cdot 10^6$ min). Bei der in Szenario 1 angenommenen akkumulierten Beanspruchung von $1,25 \cdot 10^5$ min mit 105% Spannung würde jedoch die Lebensdauerverkürzung nur ca. $0,6 \cdot 10^5$ min betragen und wäre somit kaum feststellbar.



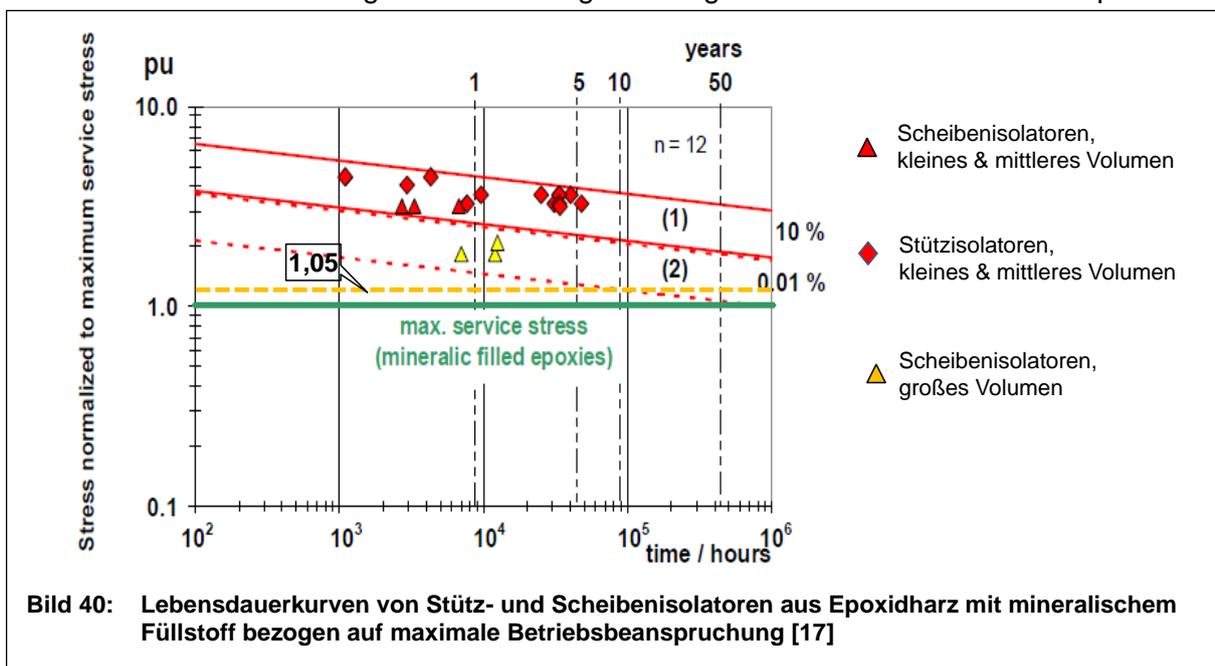
6.1.4. GIS-Schaltanlagen

An gasisolierten Schaltanlagen wird gemäß VDE 0671-203 [15] an allen Fertigungsbaugruppen als Stückprüfung eine einminütige Wechselspannungsprüfung mit 650 kV gegen Erde durchgeführt. Nach Montage vor Ort wird die komplette Anlage mit 515 kV für eine Minute geprüft. Daneben erfolgt eine Teilentladungsmessung bei 295 kV entsprechend der 1,2-fachen Leiter-Erd-Spannung. Dabei steht die TE-Prüfspannung in der Regel für mindestens 15 min an. Zusätzlich wird häufig die TE-Intensität bei 420 kV gemessen, wobei die Prüfspannung für 3 min angelegt wird.



Aus den nach VDE 0671-203 abgeleiteten Messpunkten ergibt sich die in Bild 39 dargestellte Kurve. Danach würde sich bei dauerndem Betrieb mit 105% der Bemessungsspannung eine erhebliche Lebensdauerverkürzung ergeben. Da die erhöhte Spannung aber nur während einer Dauer von 0,6% der angenommenen Betriebszeit von 40 a anliegt, ist eine kaum feststellbare Lebensdauerverkürzung von etwa einem Vierteljahr zu erwarten.

Betrachtet man das Alterungsverhalten der in gasisierten Schaltanlagen eingesetzten Isolierungen – SF6-Gasisolierung und Feststoffisolierung aus Epoxidharz – so ist anzumerken, dass die SF6-Gasisolierung keiner Alterung unterliegt. Die Isolierelemente aus Epoxidharz



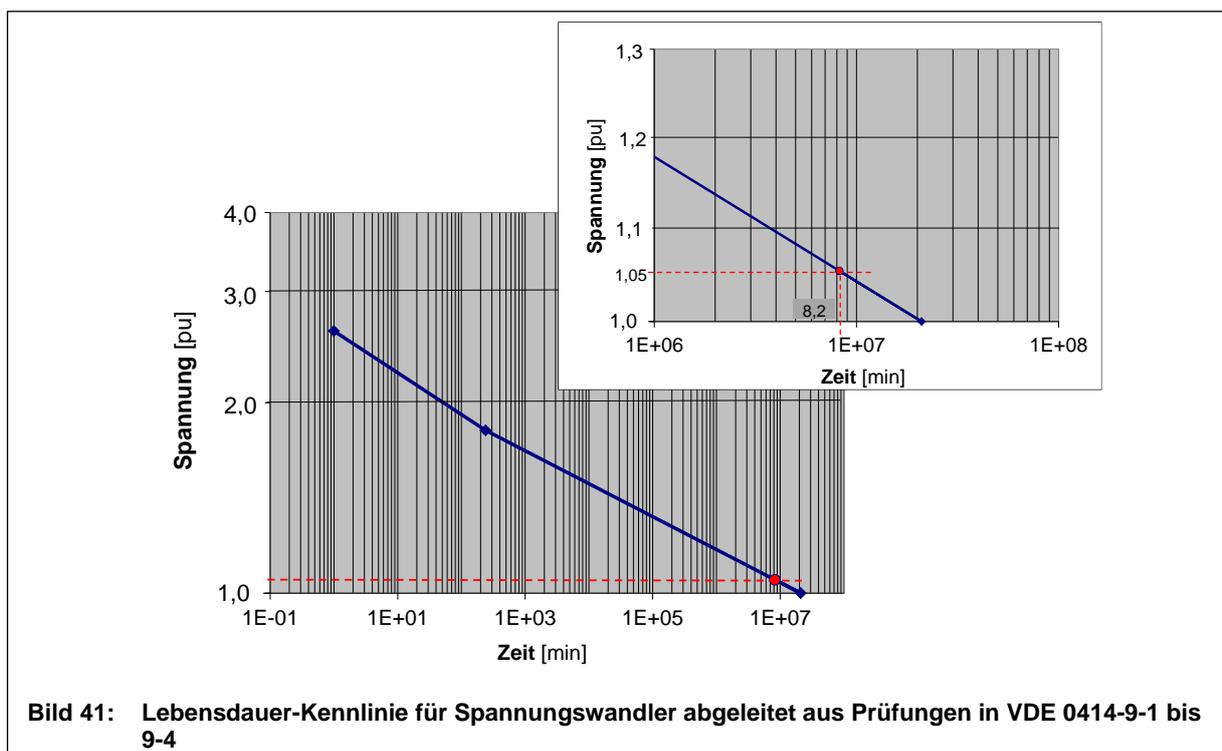
6 Einfluss von Spannungen > Um auf das Langzeit- und Alterungsverhalten abhängig von Dauer und Häufigkeit des Auftretens

sind für eine Lebensdauer von mindestens 50 Jahren ausgelegt. Ihre Betriebsfeldstärke liegt weit unterhalb der Durchschlagfeldstärke des Isolierstoffes. Bild 40 zeigt als typisches Beispiel eine Lebensdauerkurve von Stütz- bzw. Scheibenisolatoren aus mineralisch gefülltem Epoxidharz [17]. Ein Anheben der betrieblichen Beanspruchung um 5% würde die Lebensdauer der Isolatoren zwar verringern. Kurzzeitig höhere Betriebsspannungen für insgesamt < 1% der gesamten Betriebszeit haben aber keinen signifikanten Einfluss auf die Lebensdauer der Isolatoren.

Somit ist auch bei gasisolierten Schaltanlagen durch kurzzeitiges Anheben der Spannung auf 105% der Bemessungsspannung keine vorzeitige Alterung und Reduzierung der Lebensdauer zu erwarten.

6.1.5. Strom- und Spannungswandler

Strom- und Spannungswandler werden gemäß VDE 0414-9-1 bis 9-4 [39] im Rahmen der Stückprüfung einer einminütigen Wechselspannungsprüfung mit 630 kV unterzogen. Oftmals werden für Spannungswandler ein Bemessungs-Spannungsfaktor von 1,9 und eine Bemessungszeit von 4 h gefordert. Unterstellt man weiterhin eine Lebensdauer von ≥ 40 a, so ergibt sich mit oben genannten Prüfwerten die in Bild 41 dargestellte Kennlinie.

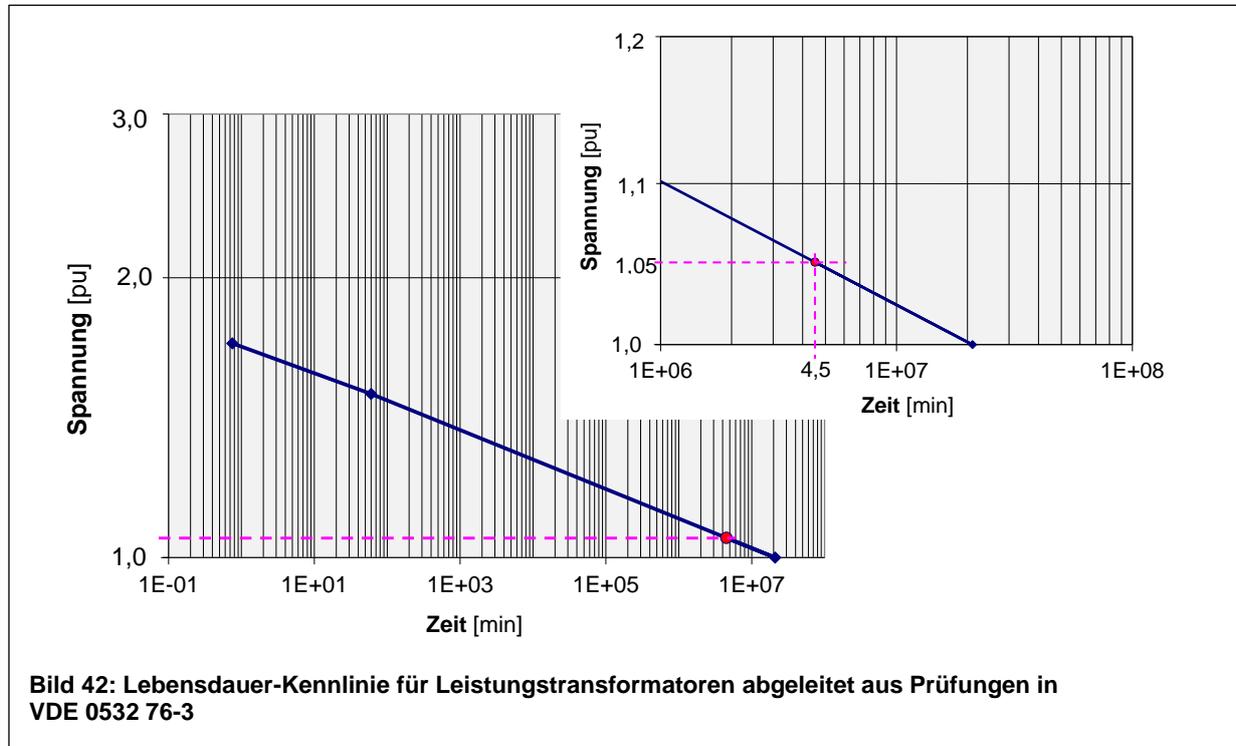


Ein dauernder Betrieb mit 105% der Bemessungsspannung würde zu einer deutlichen Lebensdauerverkürzung auf etwa 50% führen. Da die erhöhte Spannung aber nur während einer Dauer von 0,6% der angenommenen Betriebszeit von 40 a anliegt, ergibt sich eine kaum feststellbare Lebensdauerverkürzung von etwa 0,1 Jahr.

6.1.6. Leistungstransformatoren

Leistungstransformatoren werden gemäß VDE 0532-76-3 [37] im Rahmen der Stückprüfung einer einminütigen Wechselspannungsprüfung mit angelegter Spannung von 630 kV gegen Erde und einer einminütigen induzierten Spannungsprüfung von $1,8 \cdot U_r / \sqrt{3}$ bzw. $\sqrt{3} \cdot U_m / \sqrt{3}$

unterzogen. Da diese Prüfung meist mit einer Prüffrequenz von 150 Hz durchgeführt wird, beträgt die Prüfdauer $(120 \cdot 50 \text{ Hz} / 150 \text{ Hz}) \cdot s = 40 \text{ s}$. Die Prüfung wird mit einer Teilentladungsmessung bei $(1,58 \cdot U_r) / \sqrt{3}$ bzw. $(1,5 \cdot U_m) / \sqrt{3}$, Prüfdauer 1 h, kombiniert. Für $U_r = 400 \text{ kV}$ und $U_m = 420 \text{ kV}$ folgt daraus eine Kurzzeit-Prüfspannung von 416 kV bzw. 420 kV und eine Langzeit-Prüfspannung von 365 kV bzw. 364 kV. In der Regel kommt die höhere Prüfspannung zur Anwendung. Die sich aus diesen Daten ergebende Kennlinie zeigt Bild 42.



Wie aus Bild 42 hervorgeht, würde ein dauernder Betrieb mit 105 % der Bemessungsspannung eine erhebliche Lebensdauerverkürzung verursachen. Berücksichtigt man, dass die erhöhte Spannung jedoch nur während einer Dauer von 0,6% der angenommenen Betriebszeit von 40 a anliegt, führt diese Beanspruchung zu einer Lebensdauerverkürzung von etwa 2 Monaten.

Ergänzend soll das Alterungsverhalten von Transformatoren bei erhöhter Spannung anhand des Lebensdauerverhaltens von in Transformatoren typischen Isolieranordnungen betrachtet werden. Die Lebensdauer in Abhängigkeit der Belastungsfeldstärke E wird durch das Lebensdauergesetz (6.1) beschrieben [48].

$$E^N \cdot t = \text{const.} \quad (6.1)$$

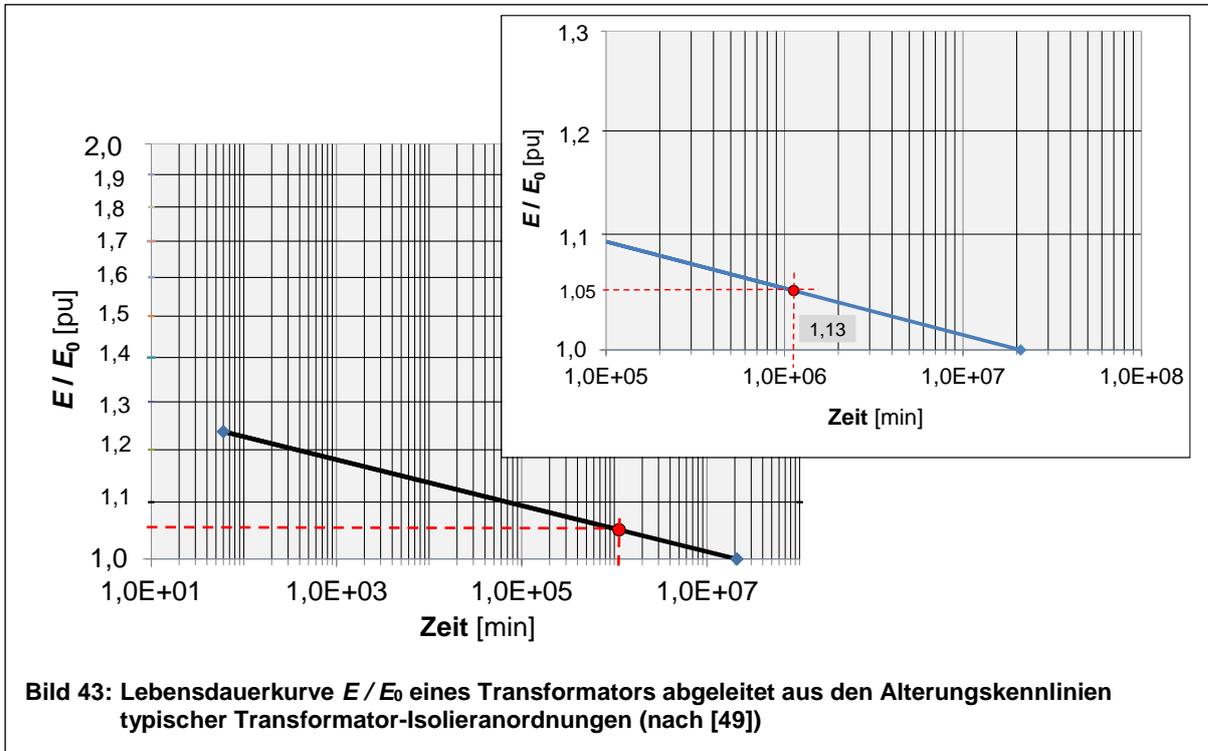
N ist der Alterungsindex und t die Beanspruchungsdauer. Für die typischen Isolieranordnungen zur Nachbildung der Windungsisolation, der Spulenisolation und der Barrierenisolation mit Ölkanal sind in der Literatur die in Tabelle 10 angeführten Alterungsindizes zu finden, wobei zwischen Kurzzeitbeanspruchung $< 1 \text{ h}$ und Langzeitbeanspruchung $\geq 1 \text{ h}$ unterschieden wird [49]. Da hier das Langzeitverhalten von Interesse ist, wird der Alterungsindex für die Langzeitbeanspruchung verwendet.

Tabelle 10: Alterungsindizes für verschiedene typische Transformator-Isolieranordnungen bei Langzeitbeanspruchung (nach [49])

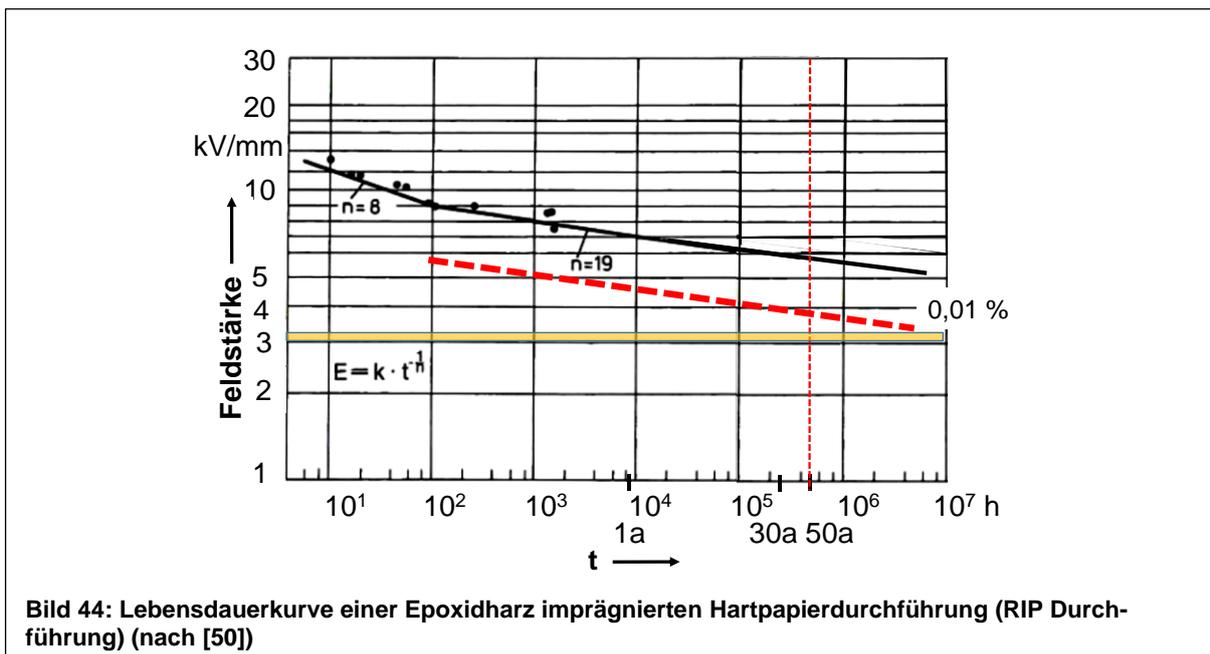
		typischer Wert	für Auswertung betrachtet
N1 (<1h)	25...53	36	30
N2 ($\geq 1 \text{ h}$)	60...120	83	60

6 Einfluss von Spannungen $> U_m$ auf das Langzeit- und Alterungsverhalten abhängig von Dauer und Häufigkeit des Auftretens

Bei einer angenommenen Lebensdauer von mindestens 40 a ergibt sich eine Kennlinie gemäß Bild 43. Auch aus dieser Lebensdauerkurve geht hervor, dass eine auf 105% angehobene Dauerbeanspruchung des Transformators zu einer deutlichen Reduzierung der Lebensdauer auf ca. 35% führen würde. Da diese erhöhte Beanspruchung aber nur während 0,6% der Betriebszeit auftritt, ist der hierdurch hervorgerufene zusätzliche Lebensdauerverbrauch von weniger als einem Vierteljahr vernachlässigbar.



Neben dem Alterungsverhalten des Aktivteils ist auch das der Durchführungen als wichtige Transformatorbestandteile von Interesse. Bild 44 zeigt Ergebnisse von Lebensdaueruntersuchungen an Epoxidharz imprägnierten Hartpapierdurchführungen (RIP Durchführungen), wie sie in gasisolierten Schaltanlagen und Transformatoren zum Einsatz kommen [50].



6 Einfluss von Spannungen > Um auf das Langzeit- und Alterungsverhalten abhängig von Dauer und Häufigkeit des Auftretens

Für das Langzeitverhalten wird ein Alterungsindex von $n = 19$ angegeben. Aus den dargestellten Durchschlagswerten (99,99%-Durchschlagswahrscheinlichkeit) kann man die Haltewerte (0,01%-Durchschlagswahrscheinlichkeit) und damit die rot gestrichelte Lebensdauerkennlinie ableiten (bei Annahme von $E_{d99,99\%} = E_{d50\%} + 3,7\sigma$; $E_{d0,01\%} = E_{d50\%} - 3,7\sigma$; $\sigma = 6\%$).

Die Betriebsfeldstärke liegt bei 3 kV/mm. Bei diesen Betriebsfeldstärken würden die Durchführungen aufgrund der Reserven auch einer dauernden Spannung von $1,05 \cdot U_m$ bei einer angenommenen Betriebszeit von 50 a standhalten. Geht man von einer verstärkten Alterung aus und nimmt einen Alterungsindex $N = 15$ an, würde auch bei einem dauernden Betrieb mit $1,05 \cdot U_m$ die Lebensdauer noch über der angenommenen Betriebszeit von 50 a liegen.

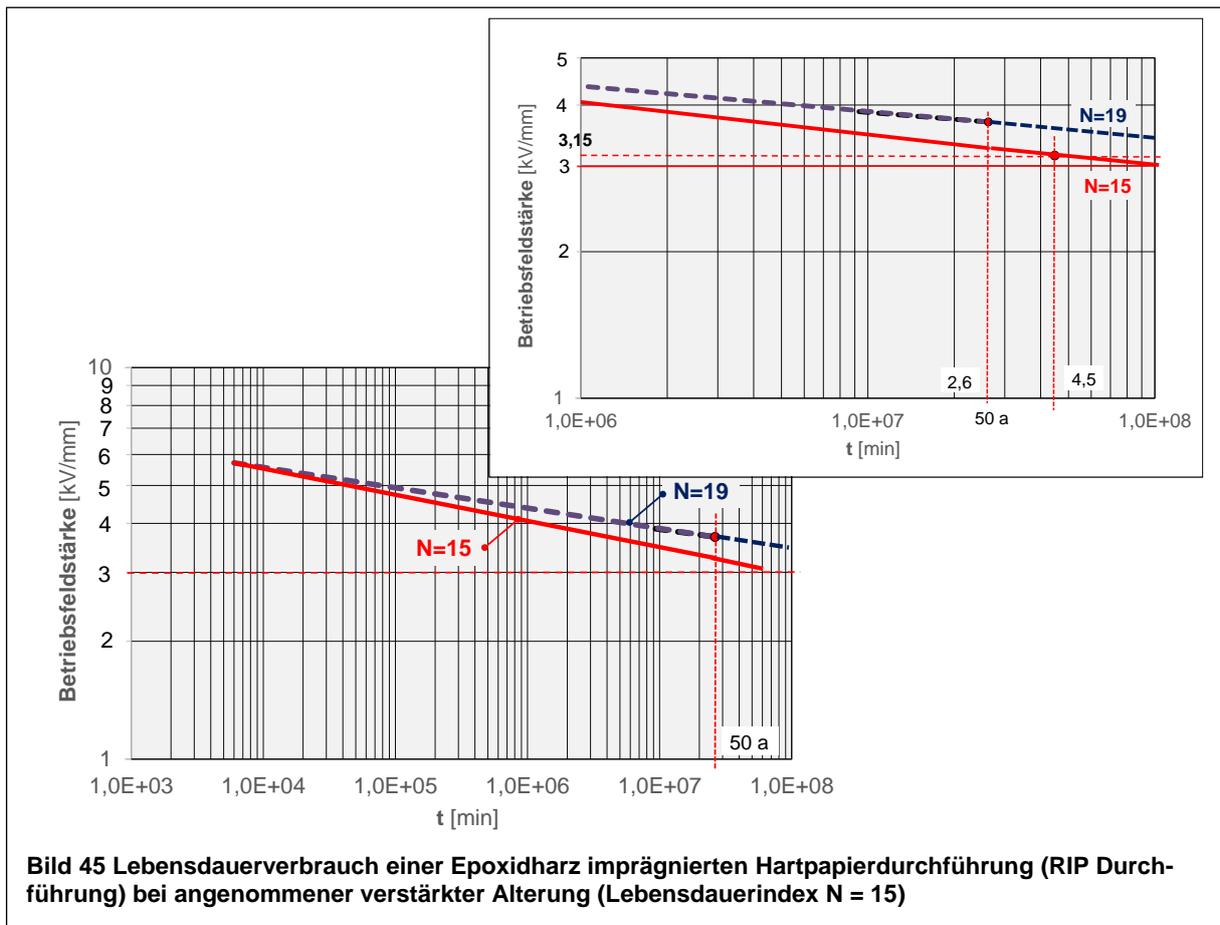


Bild 45 Lebensdauerertrag einer Epoxidharz imprägnierten Hartpapierdurchführung (RIP Durchführung) bei angenommener verstärkter Alterung (Lebensdauerindex $N = 15$)

6.1.7. Überspannungsableiter

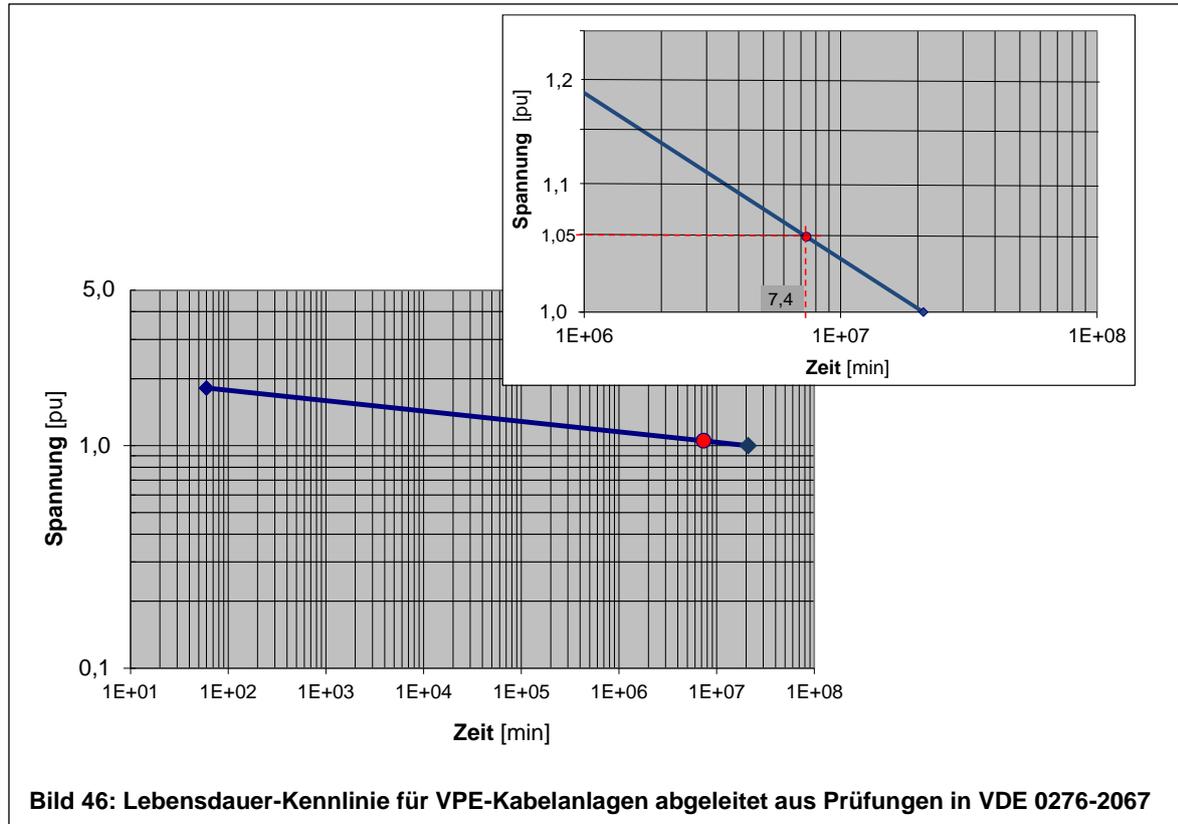
Wie in Kapitel 5.7 dargestellt, wird die Dauerspannung der Ableiter auch bei einer Betriebsspannung von 440 kV nicht überschritten, sodass keine thermische Überbeanspruchung und somit auch keine Lebensdauerverkürzung zu erwarten sind.

6.1.8. Kabelanlagen

Im Folgenden sollen nur Kabel mit VPE-Isolierung betrachtet werden. An diesen Kabeln erfolgen gemäß VDE 0276-2067 [47] eine Hochspannungsprüfung und eine Teilentladungsprüfung als Stückprüfung an jeder Kabellänge sowie an der Hauptisolierung der Garnituren. Bei der Hochspannungsprüfung beträgt die Prüfspannung 440 kV bei einer Prüfdauer von 60 min. Daneben wird an jedem Kabelsystem eine Präqualifikationsprüfung durchgeführt, bei

6 Einfluss von Spannungen $> U_m$ auf das Langzeit- und Alterungsverhalten abhängig von Dauer und Häufigkeit des Auftretens

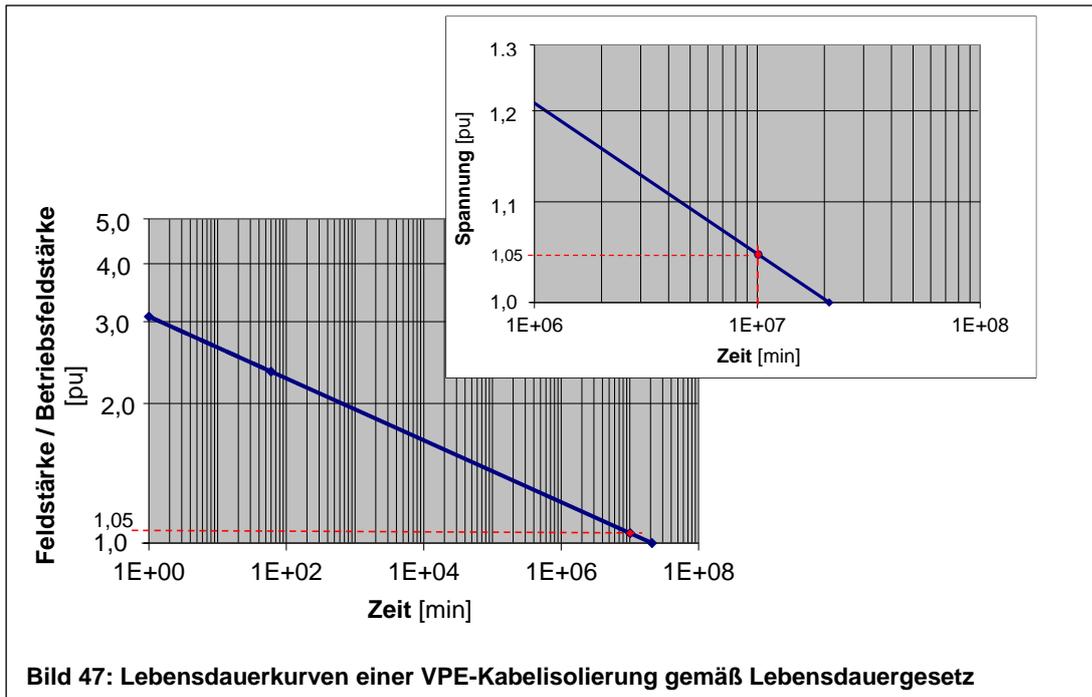
der für die Prüfdauer von einem Jahr eine Prüfspannung von $1,7 \cdot U_0 = 1,7 \cdot 220 \text{ kV} = 374 \text{ kV}$ angelegt wird. Darüber hinaus wird die Kabelanlage nach Montage mit einer Wechselspannung von $1,7 \cdot U_0 = 374 \text{ kV}$, Prüfdauer eine Stunde, geprüft.



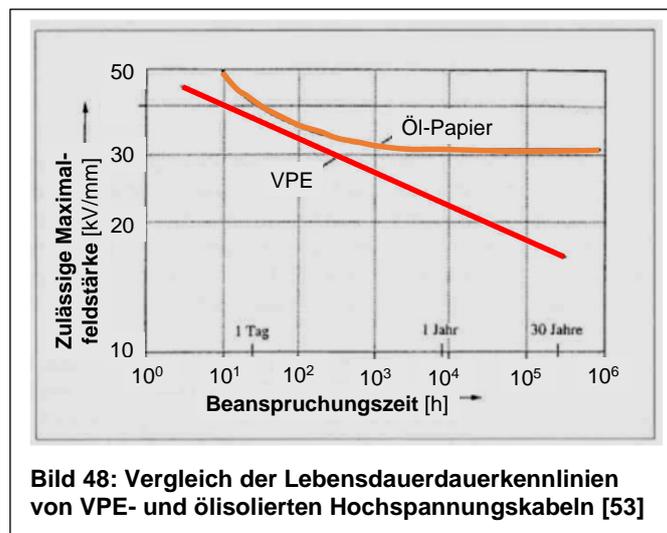
Unterstellt man eine Lebensdauer von ≥ 40 a, so ergibt sich mit den Prüfwerten aus der o. a. Norm die in Bild 46 dargestellte Kennlinie. Bei einer dauernden Spannungsbeanspruchung von $1,05 \cdot U_m$ würde sich eine deutliche Lebensdauerverkürzung auf etwa 35% ergeben. Da diese Beanspruchung aber nur während 0,6% der Betriebszeit auftritt, kann die Lebensdauerverkürzung (ca. 2 Monate) durch die erhöhte Beanspruchung vernachlässigt werden.

Die Lebensdauer der VPE-Isolierung eines Kabels in Abhängigkeit der angelegten Spannung kann man ebenfalls durch das bereits in Abschnitt 3.1.4 und 3.1.6 angeführte Lebensdauer-gesetz (3) beschreiben [48]. Für ein VPE-Kabel kann man einen Alterungsindex $N = 15$ annehmen [51], [52]. Bei einer Lebensdauer von mindestens 40 Jahren ergibt sich eine Kennlinie gemäß Bild 47.

Eine merkliche Verkürzung der Lebensdauer der Kabelisolierung ist demnach nur zu erwarten, wenn das Kabel dauernd mit der 105% der Bemessungsspannung betrieben würde. Der kurzzeitige Betrieb mit dieser Spannung trägt nur unwesentlich zur Kabelalterung bei und würde die Lebensdauer nicht merklich verkürzen.



Neben den bisher betrachteten VPE-Kabeln sind im deutschen Hochspannungs- und Höchstspannungsnetz noch Gasaußendruckkabel und Ölkabel im Einsatz. Die Betriebsfeldstärken sind zwar vergleichbar mit denen der VPE-Kabel [51], doch die Lebensdauerkennlinien unterscheiden sich deutlich (Bild 48) [53]. Der degressive Verlauf der Lebensdauerkurve von VPE-Kabeln ist bei Gasaußendruckkabeln und Ölkabeln nicht festzustellen. Kleine Hohlräume in Öl-Papier-Isoliersystemen werden durch nachströmendes Tränkmittel immer wieder aufgefüllt, wohingegen ein vergleichbarer Selbstheilungseffekt bei kunststoffisolierten Kabeln nicht auftritt. Es ist daher davon auszugehen, dass die angenommenen kurzzeitigen Beanspruchungen nicht zu einer nennenswerten Verringerung der Lebensdauer dieser Kabelsysteme führen. Neben der hier betrachteten dielektrischen Alterung ist aber deren thermische Alterung zu bedenken, die möglicherweise zu einer verringerten Lebensdauer führen kann.



6.2. Zusammenfassende Bewertung der Lebensdauer von Betriebsmitteln des 380-kV-Netzes sowie des 220-kV- und 110-kV-Netzes bei kurzzeitiger Beanspruchung mit $1,05 \cdot U_m$

Die angenommene kurzzeitige Beanspruchung von Betriebsmitteln des 380-kV-Netzes mit 105 % der dauernd zulässigen Betriebsspannung zweimal pro Woche für jeweils 30 min führt zu keiner signifikanten Lebensdauerverkürzung. Eine dauernde Beanspruchung mit 105 % würde hingegen bei den meisten Betriebsmitteln eine deutliche Lebensdauerverkürzung bewirken. Daher könnte eine solche Beanspruchung nicht nur auf Grund der geltenden Vorschriften, sondern auch aus physikalischen Gründen nicht zugelassen werden.

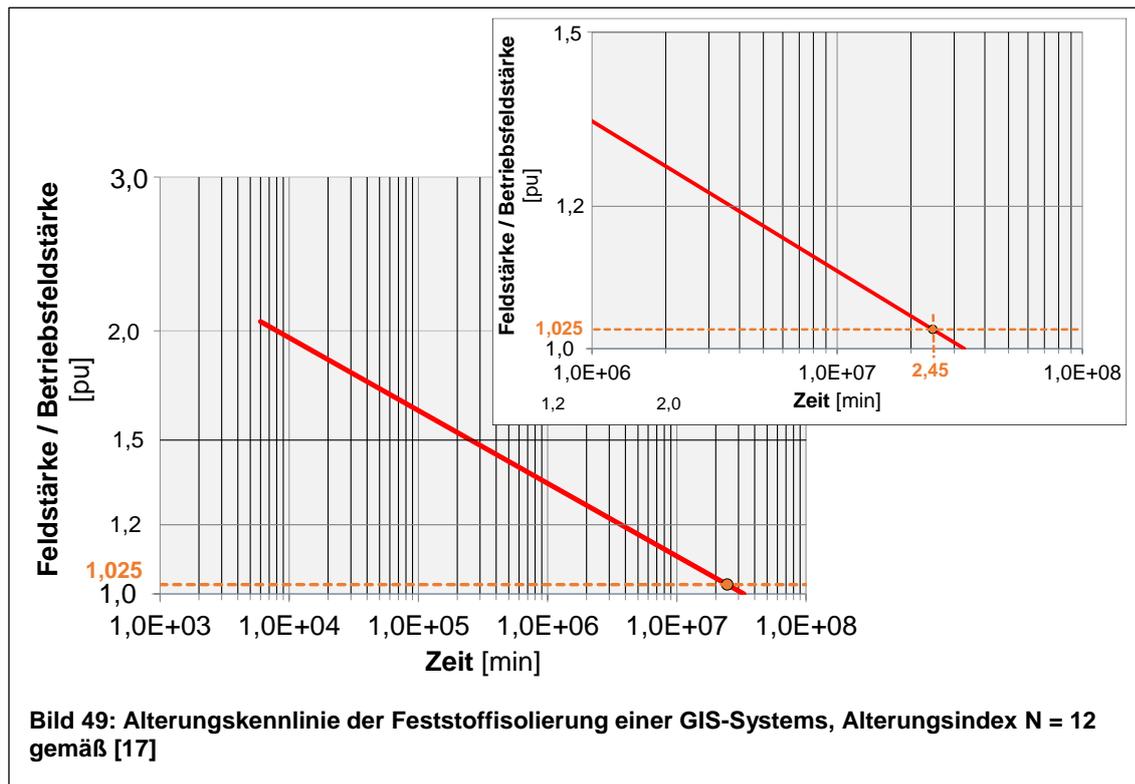
Die Aussage kann auch auf Betriebsmittel des 110-kV- und 220-kV-Netz übertragen werden, da für diese Betriebsmittel das Verhältnis Kurzzeitwechselfeldstärke zu Bemessungsfeldstärke in der Regel größer als ist als das für Betriebsmittel des 380-kV-Netzes.

6.3. Szenario 2: Mögliche Alterung bzw. Lebensdauerverkürzung durch zeitweilige Überspannung von $1,025 \cdot U_m$ mit längerer Beanspruchungsdauer

Im Folgenden wird das Lebensdauerverhalten von drei Betriebsmitteln bei zeitweiligen Überspannungen von $1,025 \cdot U_m$ untersucht, für deren Isoliersystem die Alterungsindices aus der Literatur bekannt sind. Da die Literaturangaben meist in Abhängigkeit der Betriebsfeldstärke bzw. Prüffeldstärke erfolgen, sind die folgenden Untersuchungsergebnisse feldstärkeabhängig dargestellt. Sie können aber auf die Betriebsspannung umgerechnet werden.

6.3.1. GIS-Schaltanlagen

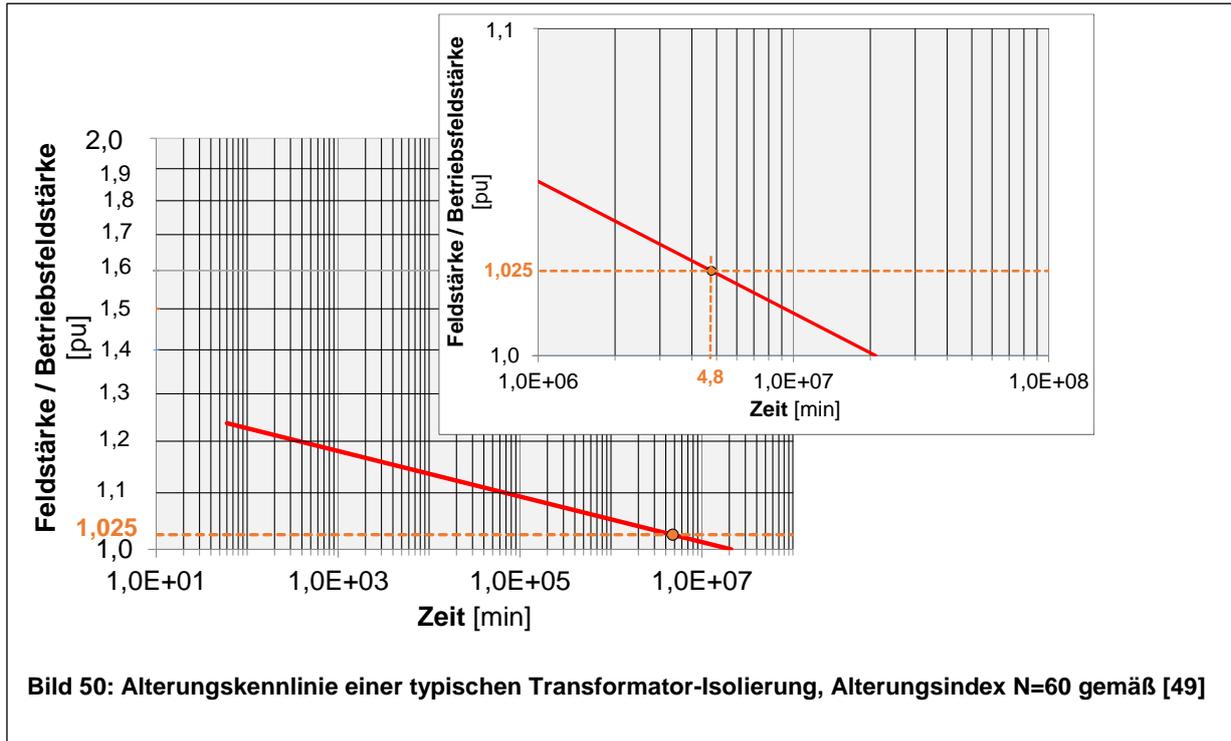
Für die Lebensdauer von gasisolierten Schaltanlagen ist das Alterungsverhalten der Isolierelemente aus Epoxidharz maßgebend. Der Literatur, z.B. [17], können Lebensdauerkurven mit einem Alterungsindex von $N = 12$ entnommen werden. Bild 49 zeigt eine auf dieser Basis ermittelte Alterungskennlinie.



Es ist zu erkennen, dass sich durch Anheben der Feldstärke auf $1,025 \cdot U_m$ ein zusätzlicher Lebensdauerverbrauch von 26 % gegenüber dem bei $1,0 \cdot U_m$ ergeben würde. Ein dauernder Betrieb bei dieser Feldstärke würde die Lebensdauer des Isoliersystems um ca. 10 Jahre verkürzen. Geht man davon aus, dass eine Lebensdauerverkürzung von höchstens 10 % zulässig ist, dürfte das GIS-System höchstens 40 % der Betriebszeit mit einer Spannung von $1,025 \cdot U_m$ betrieben werden. Ansonsten muss mit einer deutlichen Lebensdauerverkürzung gerechnet werden.

6.3.2. Leistungstransformatoren

Für die transformator-typischen Isolieranordnungen der Windungsisolierung, der Spulenisolierung und der Barrierenisolierung mit Ölkanal wird in der Literatur [49] ein Alterungsindex $N = 60$ für das Langzeitverhalten angenommen. Mit diesem Alterungsindex ergibt sich unter Annahme einer Lebensdauer von 40 Jahren die Alterungskennlinie gemäß Bild 50.



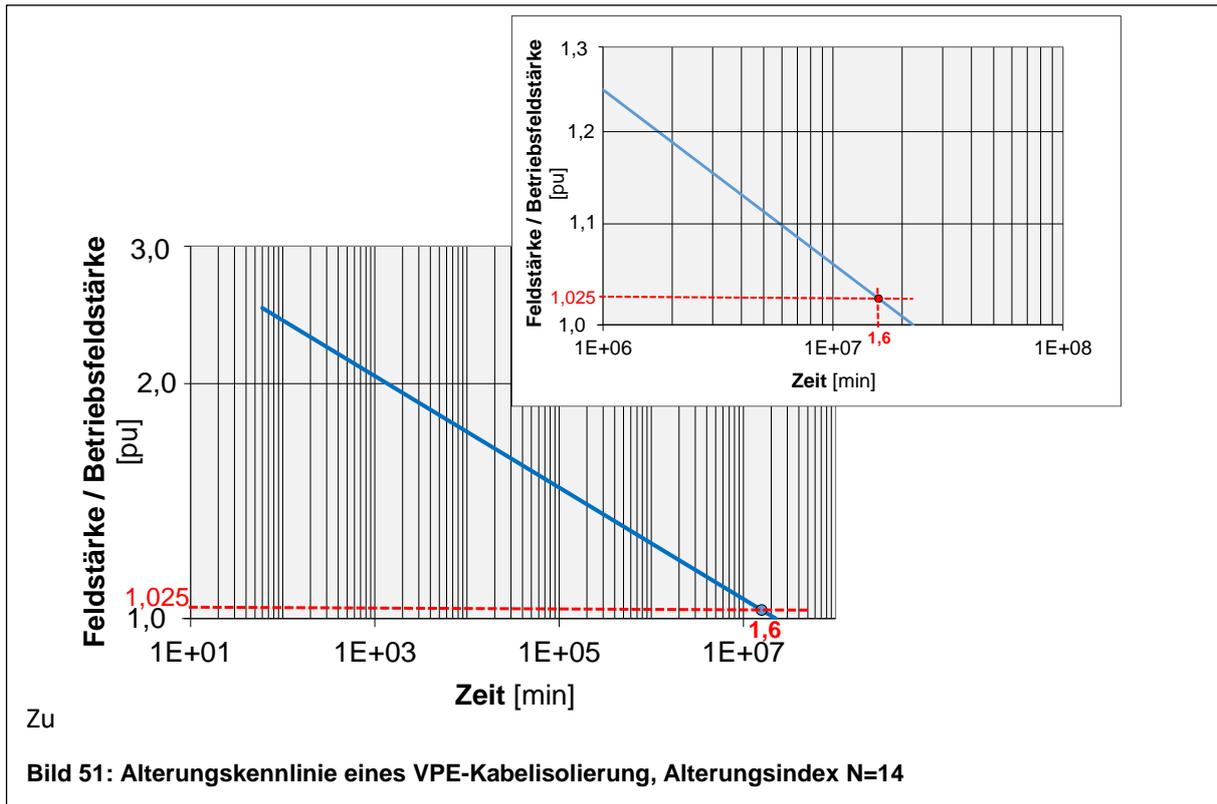
Der Betrieb mit einer Feldstärke von 1,025*Betriebsfeldstärke würde zu einer erheblichen dielektrischen Alterung und damit zu einer Lebensdauerreduzierung von über 70% führen. Um eine als zulässig angenommene Lebensdauerreduzierung von 10% zu gewährleisten, wäre eine akkumulierte Betriebszeit mit der erhöhten Spannung von 1,025* U_m von 2,7 a zulässig, d.h. z.B. ein Betrieb zweimal pro Woche über 8 h mit der erhöhten Spannung von 1,025* U_m .

6.3.3. Kabelanlagen

In [51] werden folgende Werte für die Isolationsbemessung von Kabelanlagen bis 500 kV mit VPE-Isolierung angegeben:

- Prüfwechselspannungsbeanspruchung: 40 kV/mm
- Betriebsbeanspruchung 16 kV/mm
- Alterungsindex N 12...20

Ausgehend von einer Prüfwechselspannungsbeanspruchung mit 40 kV/mm für 60 min ergibt sich mit einem Alterungsindex N = 14 eine Lebensdauer von 43 Jahren (Bild 51). Auf Basis dieser Alterungskennlinie wird eine Beanspruchung mit 1,025* U_m betrachtet.



Aus Bild 51 ist bei dauernder Beanspruchung mit $1,025 \cdot$ Betriebsfeldstärke ein zusätzlicher Lebensdauerverbrauch von 12 Jahren, also eine deutliche Lebensdauerverkürzung, zu entnehmen. Eine als zulässig angenommene Lebensdauerreduzierung von 10% könnte erreicht werden, wenn die akkumulierte Betriebszeit mit der erhöhten Spannung von $1,025 \cdot U_m$ höchstens 4 Jahre betragen würde.

6.4. Zusammenfassende Bewertung der Lebensdauer von 420-kV-Betriebsmitteln bei längerer Beanspruchung mit 102,5% der dauernd zulässigen Betriebsspannung

Ein Dauerbetrieb mit 102,5% der dauernd zulässigen Betriebsspannung führt bei den Isoliersystemen der hier betrachteten Betriebsmittel GIS, Transformator und Kabel zu einer deutlichen Lebensdauerverkürzung. Der Lebensdauerverbrauch liegt bei den Isoliersystemen der Betriebsmittel GIS und Kabel bei 10 Jahren bzw. 12 Jahren. Die Lebensdauer des Transformator-Isoliersystems wird sogar um mehr als zwei Drittel verkürzt. Derartige Betriebszustände müssen daher zeitlich begrenzt werden. Lässt man eine Lebensdauerverkürzung um 10% zu, so darf die akkumulierte Betriebszeit mit einer Spannung von $1,025 \cdot U_m$ höchstens 4 Jahre betragen.

7. Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Ein dauernder Betrieb des Hoch- und Höchstspannungsnetzes mit Spannungen größer U_m kann nicht nur aufgrund der geltenden Vorschriften, sondern auch aus physikalischen Gründen nicht zugelassen werden. Ein zeitweiliger Betrieb mit Spannungen von $1,05 \cdot U_m$ stellt einen Betrieb bei zeitweiliger Überspannung dar. Dieser ist zulässig, muss aber in Dauer und Häufigkeit begrenzt werden. Funktionseinschränkungen sind in den meisten Fällen nicht zu erwarten, da unter realen Netzbedingungen die dann auftretenden Betriebsbedingungen durch die Annahmen in den betreffenden Normen größtenteils noch abgedeckt sind. Die angenommene Beanspruchung mit $1,05 \cdot U_m$ zweimal pro Woche für jeweils 30 Minuten würde über eine Betriebszeit von 40 Jahren akkumuliert keine signifikante Lebensdauerverringerung verursachen. Auch unter Gesichtspunkten der Alterung der eingesetzten Isoliermedien ist mit keiner technisch relevanten Verkürzung der Lebensdauer zu rechnen.

Die Funktionsfähigkeit der Betriebsmittel bei Betriebsspannung $1,05 \cdot U_m$ profitiert von den Sicherheitsmargen, die sich aus den in den Normen getroffenen Annahmen ergeben. Diese Sicherheitsmargen werden während eines Betriebs bei $1,05 \cdot U_m$ nun betrieblich genutzt und sind damit als Margen „verbraucht“. Es ist zwar nicht davon auszugehen (wenngleich auch nicht völlig auszuschließen), dass damit ein erhöhtes Ausfallrisiko einhergeht, jedoch ist unter diesen Bedingungen kein Spielraum mehr für noch weiter erhöhte Betriebsspannungen von $> 1,05 \cdot U_m$ vorhanden.

Bei den im Folgenden aufgeführten Betriebsmitteln können bei Betrieb mit $1,05 \cdot U_m$ unter den genannten besonderen Betriebsbedingungen gewisse Funktionseinschränkungen auftreten. In diesen Fällen werden die angegebenen Maßnahmen empfohlen.

Leistungsschalter

Sind in Anlagen mit Kurzschlussströmen im Bereich des Bemessungs-Kurzschlussstromes der installierten Leistungsschalter erhöhte Betriebsspannungen nicht auszuschließen, sollte anhand der konkreten Netzbedingungen geprüft werden, ob Schaltfälle im Grenzleistungsbereich, insbesondere Klemmenkurzschlüsse, beherrscht werden. Gegebenenfalls müssen Leistungsschalter mit höherem Bemessungs-Kurzschlussstrom eingesetzt werden.

Beim Abschalten von Transformator nahen Fehlern muss mit Einschwingbedingungen gerechnet werden, die nicht durch die Norm abgedeckt sind, sofern der Transformator-Sternpunkt nicht geerdet ist. In diesen Fällen sollte eine Analyse der der Einschwingbedingungen unter Berücksichtigung der Eigenfrequenz des betreffenden Transformators durchgeführt und geklärt werden, ob der eingesetzte Leistungsschalter den Schaltfall beherrscht.

Werden leerlaufende, nicht kompensierte Leitungen bei erhöhter Spannung von $1,05 \cdot U_m$ ausgeschaltet, so sind Rückzündungen nicht mehr auszuschließen, insbesondere wenn die eingesetzten Leistungsschalter in der Lage sind, den kapazitiven Strom mit sehr kurzen Lichtbogenzeiten zu unterbrechen. Rückzündungen können in diesen Fällen durch gesteuertes Schalten der Leistungsschalter vermieden werden.

Beim Schalten von kleinen induktiven Strömen bei einer Spannung von $1,05 \cdot U_m$ können vermehrt Wiederzündungen auftreten. Diese lassen sich durch gesteuertes Schalten vermeiden. Es sollte aber überprüft werden, ob mit dem eingestellten Auslösezeitpunkt das Ausschalten ohne Wiederzündungen auch bei erhöhter Betriebsspannung sichergestellt ist.

Transformatoren

Bei Transformatoren muss bei Betrieb mit $1,05 \cdot U_m$ mit deutlich höheren Geräuschen gerechnet werden. Eine Übererwärmung ist wegen der Dauer der erhöhten Spannung von nur 30 Minuten unwahrscheinlich. Ob eine im Kurzzeitbetrieb unzulässige Übererregung auftreten kann, ist gegebenenfalls zu klären [54].

Drosselspulen

Beim Betrieb von Drosselspulen mit $1,05 \cdot U_m$ sind neben verstärkten Geräuschen auch höhere Kupfer- und Eisenverluste zu erwarten. Es ist zu überprüfen, ob die zusätzlichen Verluste zu einer unzulässigen Übererwärmung im Kurzzeitbetrieb führen können.

Spannungswandler

Zur Vermeidung von stationären Kippschwingungen wird der Einsatz von induktiven Spannungswandlern mit Luftspalt-Kernen empfohlen. Bei diesen Wandlern sollten auch bei Betrieb mit $1,05 \cdot U_m$ keine stationären Kippschwingungen angeregt werden. Dennoch sollte das ausreichende Dämpfungsverhalten bei $1,05 \cdot U_m$ versuchstechnisch oder durch Simulation nachgewiesen werden.

Überspannungsableiter

Tritt im gelöschten betriebenen 110-kV-Netz ein Erdschluss bei der erhöhten Spannung von $1,05 \cdot U_m$ auf, so ist bei einer Fehlerdauer von 30 Minuten eine thermische Überbeanspruchung der Ableiter nach Norm nicht gänzlich auszuschließen. In solchen Fällen ist das thermische Verhalten der Ableiter anhand der Herstellerangaben genauer zu überprüfen. Erleichternd würde wirken, wenn man eine Belastung der Ableiter mit voller Nennenergie ausschließen kann. Eine Überbeanspruchung der Ableiter durch Lastabwurf bei $1,05 \cdot U_m$ ist auszuschließen, sofern der Spannungsregler die einspeisende Maschine innerhalb von 10 Sekunden auf U_m zurückfährt. Gegebenenfalls ist das Reglerkonzept zu prüfen.

Die angenommene Häufigkeit und Dauer der Beanspruchungen mit $1,05 \cdot U_m$ ruft keine signifikante Lebensdauerverkürzung der betrachteten Betriebsmittel hervor. Eine deutlich größere Häufigkeit und/oder Beanspruchungsdauer hätte aber negative Auswirkungen auf die Lebensdauer der Betriebsmittel. Ein dauernder Betrieb mit $1,05 \cdot U_m$ kann zum einen unter physikalischen Gesichtspunkten nicht zugelassen werden, da dieser basierend auf der in den Vorschriften zugrunde gelegten Bemessung zu einer deutlichen Lebensdauerverringerung führen würde. Zum anderen ist ein dauernder Betrieb bei Spannungen oberhalb der Bemessungsspannung gemäß den einschlägigen Normen nicht zulässig, sondern nur der Betrieb bei zeitweiligen Überspannungen. Dieser Betriebsfall ist im Rahmen der Isolationskoordination zu berücksichtigen.

Selbst der dauernde Betrieb mit einer geringeren Spannung oberhalb der Betriebsspannung, z. B. mit $1,025 \cdot U_m$, würde zu einer beschleunigten Alterung und damit zu einer Lebensdauerverkürzung auf z.T. unter 50% führen. Betriebszustände mit Spannungen oberhalb von U_m sind daher auf das für die Netzsicherheit notwendige Maß zu beschränken. Sie dürfen nicht zur Lastflusssteuerung oder zum Vermeiden von Überlastsituationen eingesetzt werden.

8. Schrifttum

- [1] Transmission Code 2007, Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber. Version 1.1, August 2007
- [2] GRIDCODE 2000 Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber. DVG DEUTSCHE VERBUNDGESELLSCHAFT E. V.. Heidelberg, 20. April 2000
- [3] EU VERORDNUNG 2016/631: Festlegung eines Netzkodex mit Netzanschlussbestimmungen für Stromerzeuger. 14. April 2016.
- [4] EU VERORDNUNG 2016/1388: Netzkodex für den Lastanschluss. 17. August 2016
- [5] VDE-AR-N 4120: Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Hochspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Hochspannung). November 2018
- [6] VDE-AR-N 4130: Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Höchstspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Höchstspannung). November 2018
- [7] VDE 0175-1: CENELEC-Normspannungen. April 2012
- [8] VDE 0111-1: Isolationskoordination, Teil 1: Begriffe, Grundsätze und Anforderungen. September 2010.
- [9] M. Kizilcay, P. Malicki, S. Papenheim, M. Lösing, K. Vennemann: Influence of shunt compensated EHV transmission lines consisting of overhead line and XLPE cable sections on system performance. CIGRE Symposium Aalborg, Denmark, 4-7 June 2019. Paper 11.
- [10] VDE 0210-1 (EN 50341-1): Freileitungen über AC 45 kV – Teil1: Allgemeine Anforderungen – Gemeinsame Festlegungen. April2010.
- [11] P.S. Maruvada: Corona Performance of High Voltage Transmission Lines. Research Studies Press Ltd, Baldock, Hertfordshire, England, 2000.
- [12] IEC 60815-2: Selection and Dimensioning of High-Voltage Insulators Intended for Use in Polluted Conditions – Part 2: Ceramic and glass insulators for a.c. systems. 2008.
- [13] VDE 0101-1: Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV –Teil 1: Allgemeine Bestimmungen. Dezember 2014.
- [14] VDE 0671-1: Hochspannungs-Schaltgeräte und –Schaltanlagen, Teil 1: Gemeinsame Bestimmungen. Dezember 2012.
- [15] VDE 0671-203: Hochspannungs-Schaltgeräte und –Schaltanlagen, Teil 203: Gasisolierte Schaltanlagen mit Bemessungsspannungen über 52 kV. November 2012.
- [16] CIGRE Working Group D1.03: Very Fast Transient Overvoltages (VFTO) in Gas-Insulated UHV Substations. Technical Brochure 519, December 2012.
- [17] CIGRE brochure 360: Insulation co-ordination related to internal insulation of gas insulated systems with SF6 and N2/SF6 gas mixtures under AC condition. CIGRE WG C4.302, October 2008.
- [18] VDE 0102: Kurzschlussströme in Drehstromnetzen, Dez. 2016.
- [19] VDE 0671-100: Hochspannungs-Schaltgeräte und –Schaltanlagen, Teil 100: Wechselstrom-Leistungsschalter. August 2013.
- [20] VDE 0671-100: Hochspannungs-Schaltgeräte und –Schaltanlagen, Teil 100: Wechselstrom-Leistungsschalter. Entwurf Nov. 2018.
- [21] H. H. Schramm: Schalten im Hochspannungsnetz. VDE Verlag GmbH, Berlin, Offenbach. 2015. ISBN 978-3-8007-3879-3.

-
- [22] FFN-Störungs- und Verfügbarkeitsstatistik, Berichtsjahr 2017.
- [23] A. Braun, K.H. Hinterthür, H. Lipken, B. Stein, O. Völker.: Characteristic values of the transient recovery voltage for different types of short circuits in an extensive 420 kV system. *etz-a* 97, S. 489-493.
- [24] G. Frind: Experimental investigation of limiting curves for current interruption of gas blast breakers. Proceedings of Symposium "Current Interruption in High-Voltage Networks". Edited by Klaus Ragaller. Plenum Press, New York and London, 1978.
- [25] G. Balzer, C. Neumann: Switching of transformer limited faults in HV and EHV Systems. Paper no. 77, CIGRE Symposium Recife, April 2011.
- [26] CIGRE WG A3.11: Guide for application of IEC 62271-100 and IEC 62271-1, Part 2: Making and breaking tests. Technical Brochure 305, October 2006.
- [27] C. Neumann: Manuskript zur Vorlesung Hochspannungsschaltgeräte und Anlagen an der TU Darmstadt.
- [28] E. Ruoss: Überspannungen beim Einschalten von Hochspannungsleitungen. BBC-Mitteilungen Band 66, April 1979, S. 262-270.
- [29] CIGRE W 13.02: Interruption of small inductive currents. Technical Brochure 50, December 1995.
- [30] VDE 0671-110: Hochspannungs-Schaltgeräte und -Schaltanlagen –Teil 110: Schalten induktiver Lasten. August 2018.
- [31] VDE 0671-102: Hochspannungs-Schaltgeräte und -Schaltanlagen –Teil 102: Wechselstrom-Trennschalter und –Erdungsschalter. Juni 2012.
- [32] CIGRE Working Group 33/13.09: MONOGRAPH ON GIS VERY FAST TRANSIENTS. Technical Brochure 035.
- [33] C. Neumann: Nichtstandardisierte betriebliche Beanspruchungen beim Schalten von Trenn- und Erdungsschaltern im Hochspannungsnetz. Dissertation Technische Hochschule Darmstadt, Juni 1992.
- [34] R. Witzmann: Schnelle transiente Spannungen in metallgekapselten, SF6-isolierten Schaltanlagen. Dissertation TU München. VDI Fortschritt-Berichte Reihe 21, Nr. 55.
- [35] W.J. Chen et al.: Study of the Influence of Disconnecter Characteristics on Very Fast Transient Overvoltages in 1100-kV Gas-insulated Switchgear. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 30, No. 4, August 2014, S. 2037-2044.
- [36] VDE 0532-76-1: Leistungstransformatoren - Teil 1: Allgemeines. März 2012
- [37] VDE 0532-76-3: Leistungstransformatoren, Teil 3: Isolationspegel, Spannungsprüfungen und äußere Abstände in Luft. August 2014.
- [38] G. Balzer, C. Neumann: Schalt- und Ausgleichsvorgänge in elektrischen Netzen. Springer Vieweg, Springer Verlag Berlin, Heidelberg. Juni 2015. ISBN 978-3-662-44547-1.
- [39] VDE 0414-9-1: Messwandler - Teil 1: Allgemeine Anforderungen. April 2010.
VDE 0414-9-2: Messwandler - Teil 2: Zusätzliche Anforderungen für Stromwandler. Juli 2013.
VDE 0414-9-3: Messwandler - Teil 3: Zusätzliche Anforderungen für induktive Spannungswandler. Mai 2012.
VDE 0414-9-4: Messwandler - Teil 4: Zusätzliche Anforderungen für kombinierte Wandler. April 2015.

-
- [40] K. Kunde, L. Niedung, A. Umlauf, C. Neumann, H. Lipken, R. Bayer: Einphasige Kippschwingungen in Netzen mit induktiven Spannungswandlern. Elektrizitätswirtschaft. Jahrgang 95 (1996), S. 162-170.
- [41] R. Bayer, J. Luhmann, J. Mentel, C. Neumann: Simulation von einphasigen Kippschwingungen in Spannungswandlern mittels EMTP/ATP. *Elektrie* 56 1-4 (2002); S. 79-87
- [42] V. Hinrichsen: Metalloxid-Ableiter in Hochspannungsnetzen. Grundlagen. Siemens AG, Energy Sector, Power Transmission Division, High Voltage Products. 3. Auflage, Sept. 2011.
- [43] VDE 0675-1: Überspannungsableiter – Überspannungsableiter mit nichtlinearen Widerständen für Wechselspannungsnetze. August 2000.
- [44] VDE 0675-5: Überspannungsableiter. Empfehlung für die Auswahl und die Anwendung. September 2000.
- [45] D. Oeding, B.R. Oswald: Elektrische Kraftwerke und Netze. Springer Heidelberg, Dordrecht, London, New York, 7. Auflage 2011. ISBN 978-3-642-19246-3.
- [46] VDE 0276-632: Starkstromkabel mit extrudierter Isolierung und ihre Garnituren für Nennspannungen über 36 kV ($U_m = 42$ kV) bis 150 kV ($U_m = 170$ kV).
- [47] VDE 0276-2067: Starkstromkabel mit extrudierter Isolierung und ihre Garnituren für Nennspannungen über 150 kV ($U_m = 170$ kV) bis einschließlich 500 kV ($U_m = 550$ kV) - Prüfverfahren und Anforderungen. August 2013.
- [48] A. Kuchler: Hochspannungstechnik. Grundlagen – Technologie – Anwendungen. Springer Verlag, 2004.
- [49] Y. Shirasaka, H. Murase, S. Okabe, H. Okubo: Cross-sectional Comparison of Insulation Degradation Mechanisms and Lifetime Evaluation of Power Transmission Equipment. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 16, No. 2; April 2009.
- [50] F. Hammer, A. Kirch: Design, manufacture and testing of RIP-bushings and their special application as components of SF6 insulated HV equipments. International conference on Sulphur hexafluoride gas filled high voltage equipments, Kerala 1978. Pp. F1-F19.
- [51] CIGRE WG 21/33: Insulation Coordination for HV AC underground cable system. Cigre Brochure 189, June 2001.
- [52] E. Peschke, R. von Olshausen, Cable Systems for High and Extra-High Voltage, Publicis MCD Verlag, Erlangen & Munich, 1999.
- [53] R. Schwarz: Messtechnik und Diagnostik an elektrischen Betriebsmitteln. Habilitationsschrift TU Graz, 2009.
- [54] VDE 0532-76-1 Beiblatt 1: Leistungstransformatoren – Teil 1: Allgemeines; Beiblatt 1: Spannungspegel oberhalb der höchsten Spannung für Betriebsmittel U_m .

Anhang: Zu den Autoren

Prof. Dr.-Ing. Claus Neumann war bis 2010 in verschiedenen Positionen auf dem Gebiet Hochspannungsgeräte und –systeme bei RWE und zuletzt beim Übertragungsnetzbetreiber Amprion als Leiter des operativen Assetmanagements tätig. Er ist Honorarprofessor an der TU Darmstadt und hält dort die Vorlesung „Hochspannungsschaltgeräte & -anlagen“. Z.Z. arbeitet er als Senior Consultant. Seine Arbeitsgebiete sind Assetmanagement, AC- & DC-Systemauslegung, Betriebsmitteltechnik, Monitoring & Diagnose. Er war bisher für folgende Auftraggeber tätig: AXPO Power AG / Netze, Baden (CH); Amprion, Dortmund (DE); Swissgrid, Frick (CH); Fichtner, Stuttgart (DE); Dubai Electricity and Water Authority (DEWA); SWM München (DE); Swedish Neutral AB, Stockholm (SWE); Siemens Erlangen (DE).

Prof Neumann war viele Jahre deutsches Mitglied im CIGRE Studienkomitee (SC) 33 (Insulation Coordination) und im SC C4 (System Technical Performance) Convenor der Advisory Group „Insulation Coordination“. Z. Z ist er Convenor der Joint Working Group D1/B3.57 (“Dielectric Testing of HVDC gas-insulated Systems”) und Mitglied der WG D1.66 (“Requirements for partial discharge monitoring systems for gas insulated systems”). Er ist CIGRE Distinguished Member und erhielt 2004 den TC Award des SC C4.

Prof. Dr.-Ing Volker Hinrichsen ist Universitätsprofessor an der TU Darmstadt und Leiter des Fachgebiets Hochspannungstechnik. Seine Forschungsschwerpunkte sind Blitz- und Überspannungsschutz, neue Isolier- und Feldsteuermaterialien, Hochspannungs-Leistungsschalter, neue Sensoren, Diagnoseverfahren und Zustandsbewertung von Geräten und Anlagen, Hochspannungs- und Hochstrom-Prüf- und Messtechnik.

Prof. Hinrichsen ist bei DKE, IEC und CIGRE tätig. Er ist u. a. Chairman des IEC Technical Committee TC 37 (Surge Arresters), Convenor des TC 37 MT 4 (Surge Arresters), dort verantwortlich für alle Hochspannungsableiter-Prüfvorschriften, Mitglied im TC 28 (TC 99) MT 9 (Insulation Co-ordination – Application Guide). 2007 erhielt er den „IEC1906 Award“.

Bei DKE/VDE leitet er als Obmann das K 441 (Überspannungsableiter) und ist Mitglied im K 183 (Bewertung und Qualifizierung von elektrischen Isolierstoffen und Isoliersystemen), K 451 (Isolatoren) und K 122 (Isolationskoordination). 2012 wurde er mit der „DKE-Nadel“ ausgezeichnet.

Er ist Vorsitzender der Forschungsvereinigung Elektrotechnik (FE) des ZVEI.

Bei CIGRE ist er z. Z. Convenor der Working Group D1.56 (Field grading in electrical insulation systems) und Mitglied in den Working Groups WG C4.39 (Effectiveness of line surge arresters for lightning protection of overhead transmission lines), WG D1.58 (Evaluation of dynamic hydrophobicity of polymeric insulating materials under AC and DC voltage stress). 2018 wurde er zum CIGRE Distinguished Member ernannt.