

Blitzstoßspannungsverläufe bei der Transformatorprüfung

Anne Pfeffer • Thomas Steiner • Stefan Tenbohlen

Für die Bemessung der Isolierungen von Betriebsmitteln sind neben der höchsten, dauernd zulässigen Betriebsspannung auch kurzzeitig wirkende Überspannungen von großer Bedeutung. Daher werden die Betriebsmittel mit Stoßspannungen, wie volle und abgeschnittene Blitzstoßspannungen, geprüft. In der DIN IEC 60060-1 (VDE 0432-1):1994-06 [1] sind die dafür notwendigen Prüfbedingungen und Auswertungen festgelegt. Aufgrund der Verwendung digitaler Messtechnik ist der Normentwurf E DIN IEC 60060-1 (VDE 0432-1):2005-09 [2] für Stoßspannungen entwickelt worden und soll die Auswertung vereinfachen und verbessern.

Der k -Faktor regelt die Handhabung des Überschwingens im Scheitel mithilfe der Frequenz des Oszillierens oder der Zeitdauer des Überschwingens. Wenn die Frequenz der Oszillationen kleiner als 500 kHz oder die Dauer des Überschwingens größer als 1 μ s ist, nimmt man den Scheitelwert der gemessenen Kurve \hat{U}_e . Wenn aber die Frequenz die 500-kHz-Grenze überschreitet oder das Überschwingen unter 1 μ s andauert, zeichnet man eine mittlere Kurve und nimmt den Scheitelwert der mittleren Kurve \hat{U}_{mp} als Parameterwert des Blitzstoßimpulses. Für die Scheitelwertauswertung \hat{U}_t liegt folgende Gleichung zugrunde:

gruppe befasste sich mit experimentellen Messreihen, um den physikalischen Einfluss überlagerter Oszillationen auf die Durchschlagsspannung unterschiedlicher Isoliermaterialien, z. B. Luft, SF₆, Polyethylen und Öl, bei Beanspruchung mit Blitzstoßspannung zu untersuchen [3]. Aus diesen Ergebnissen wurde ein neuer frequenzabhängiger k -Faktor eingeführt (Bild 1) und wie folgt definiert:

$$k(f) = \frac{1}{1 + (a \cdot f)^2}, \text{ mit } a = 2,2 \text{ und } f \text{ in MHz.}$$

Dieser k -Faktor wird mithilfe digitaler Filterung FIR (Finite Impulse Response)

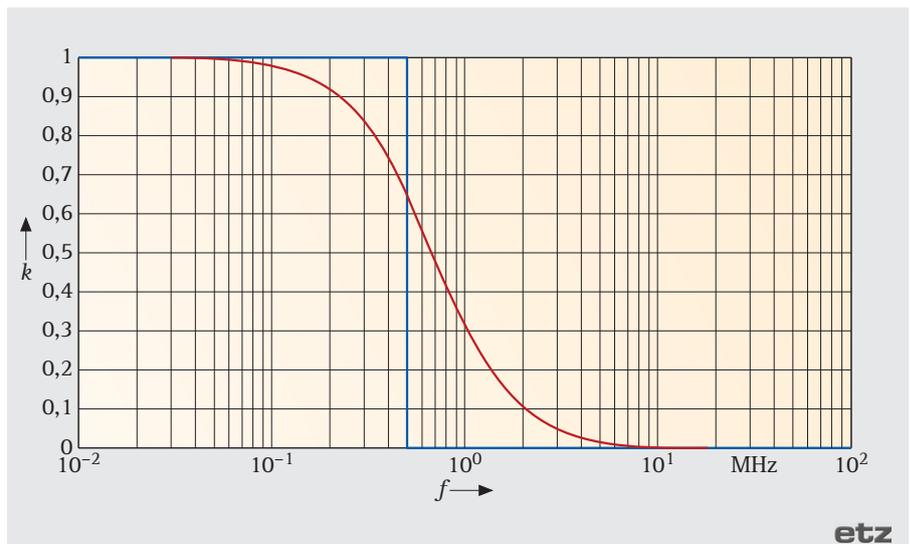


Bild 1. Definition des k -Faktors nach DIN IEC 60060-1 (VDE 0432-1):1994-06 (blau) und nach Entwurf E DIN IEC 60060-1 (VDE 0432-1):2005-09 (rot)

$$\hat{U}_t = \hat{U}_{mp} + k(f) \cdot (\hat{U}_e - \hat{U}_{mp}).$$

Für die grafische Auswertung der Blitzstoßspannungsimpulse nach DIN IEC 60060-1 (VDE 0432-1):1994-06 [1] ist diese Definition des k -Faktors ausreichend, da die diesbezüglich enthaltenen Regeln auf Anforderungen der analogen Messtechnik basieren. Da mittlerweile aber digitale Messtechnik zur automatisierten Auswertung von Blitzstoßspannungen zur Verfügung steht, ist die bisherige Regelung des k -Faktors nicht zufriedenstellend. Für eine Änderung dieses Zustands wurde ein europäisches Forschungsprojekt gestartet. Diese Arbeits-

und IIR (Infinite Impulse Response) realisiert.

Auswerteverfahren für volle Blitzstoßspannungen

Die Auswertung erfolgt mit einer dafür eigens entwickelten Software, die gemäß dem Normentwurf programmiert ist. Die zu vergleichenden Parameter sind Scheitelwert \hat{U}_t , Stirnzeit T'_1 , Rückenhalbwertzeit T'_2 und Überschwingen β . Die mittlere Kurve u_m wird durch Kurvenanpassung einer doppelexponentiellen Funktion mit vier Anfangsbedingungen an die Blitzstoßspannung ermittelt:

Dipl.-Ing. Anne Pfeffer arbeitet am Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart auf dem Gebiet der Teilentladungsmesstechnik an Leistungstransformatoren. E-Mail: anne.pfeffer@ieh.uni-stuttgart.de



Dipl.-Ing. (FH) Thomas Steiner ist Technischer Direktor für die Bereiche R&D, Prüffeld und Service bei der Highvolt Prüftechnik Dresden GmbH. E-Mail: steiner@highvolt.de



Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen wurde 2004 an die Universität Stuttgart als ordentlicher Professor berufen und ist Direktor des Instituts für Energieübertragung und Hochspannungstechnik. E-Mail: stefan.tenbohlen@ieh.uni-stuttgart.de



$$u_m(t) = A \cdot \left(e^{\frac{t-D}{B}} - e^{\frac{t-D}{C}} \right).$$

Der *Levenberg-Marquardt-Algorithmus* hat sich für das Fitting (engl. fit – anpassen) als gut geeignet erwiesen. Nach der Bestimmung der mittleren Kurve entsteht durch Subtrahieren von der gemessenen Blitzstoßspannung die sogenannte Differenzkurve (Bild 2). Der neue *k*-Faktor wird durch die digitale Filterung (FIR- oder IIR-Filter) der Differenzkurve in die Auswertung eingebracht. Nach der Filterung der Differenzkurve wird diese gefilterte Kurve mit der mittleren Kurve addiert und von dieser Kurve werden die Parameter Scheitelwert \hat{U}_t , Stirnzeit T_1 , Rückenhalbwertszeit T_2 und Überschwüngen β' bestimmt:

$$T_1' = 1,67 \cdot (t_{90} - t_{30}),$$

$$t_0 = t_{30} - \frac{U_{30}}{(U_{90} - U_{30})} \cdot (t_{90} - t_{30}),$$

$$T_2' = t_{50} - t_0,$$

$$\beta' = \frac{\hat{U}_t - \hat{U}_{mp}}{\hat{U}_t} \cdot 100 \text{ \%}.$$

Auswerteverfahren für abgeschnittene Blitzstoßspannungen

Eine abgeschnittene Blitzstoßspannung wird bei einer Hochspannungsprüfung durch einen Durchschlag einer dem Prüfling parallelgeschalteten Funkenstrecke

erzeugt, der einen steilen Zusammenbruch der Spannung bewirkt. Dieser Zusammenbruch kann in der Stirn oder im Rücken der Blitzstoßspannung auftreten. Der frontabgeschnittene Blitzstoß bleibt in der Betrachtung außen vor, da der *k*-Faktor in diesem Fall nicht angewendet wird. Die Definition in der DIN IEC 60060-1 (VDE 0432-1): 1994-06 [1] bleibt also erhalten.

Die im Rücken abgeschnittenen Blitzstoßspannungen sind von großem Interesse, da es zwei verschiedene Vorschläge gibt, um den *k*-Faktor anzuwenden. Dies kann aber nur mithilfe eines vollen Blitzstoßes desselben Prüfkreises geschehen, da die Kurvenanpassung an die abgeschnittene Kurve mit einer Doppelsexponentialfunktion eine viel zu kurze Rückenhalbwertszeit liefert. Bei Blitzstoßspannungstests gilt allgemein, dass bei Verwendung desselben Prüfkreises und Steigerung der Spannung die Form der Stöße erhalten bleibt. Auf dieser Annahme basieren die Verfahren zur Auswertung abgeschnittener Blitzstoßspannungen.

Die Parameter der abgeschnittenen Blitzstoßspannung unterscheiden sich nur geringfügig vom vollen Blitzstoß. Statt der Rückenhalbwertszeit wird der Zeitpunkt des Abschneidens T_c verwendet. Die Berechnung des Scheitelwerts \hat{U}_c und die Stirnzeit T_1 bleiben gleich.

Es werden nun zwei Verfahren vorgestellt, um die abgeschnittenen Blitzstoßspannungen mit der *k*-Faktor-Kurve auszuwerten.

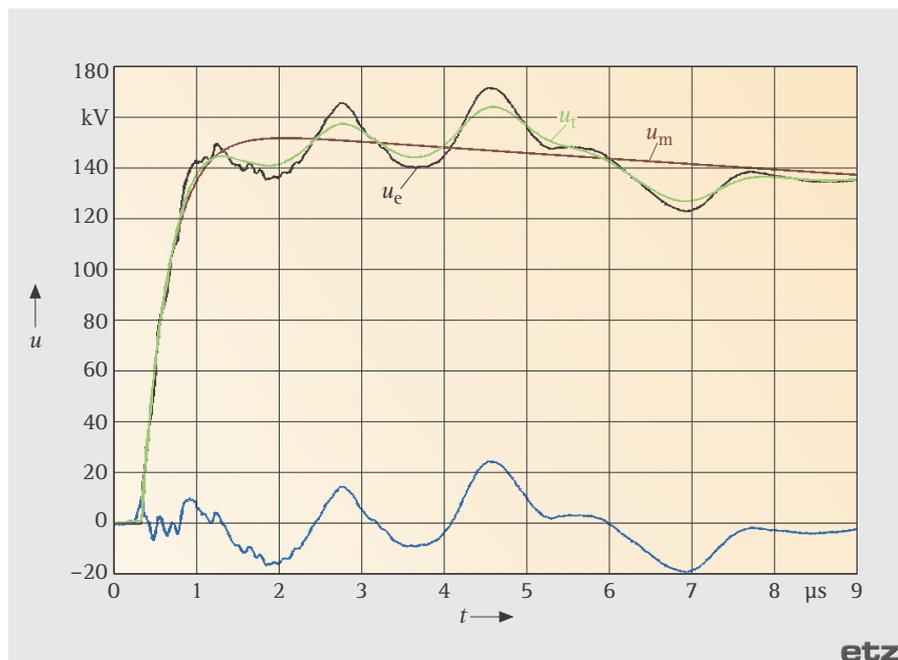


Bild 2. Blitzstoßspannungsimpuls einer Transformatorprüfung (u_e) (schwarz), mittlere Kurve (u_m) (braun), Differenzkurve (blau) und gefilterte Kurve (u_t) (grün)

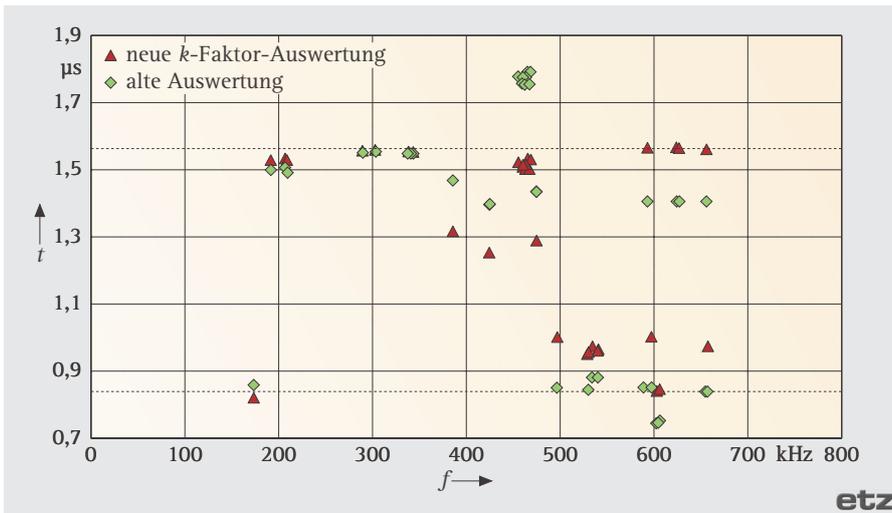


Bild 3. Differenz der Ergebnisse der Stirnzeit T_1 von vollen Blitzstoßspannungen mit neuer (rot) und alter k -Faktor-Kurve (grün)

Methode Spannungsverringerungsverhältnis

Bei der ersten Methode wird ein Spannungsverhältnis berechnet. Das Spannungsverringerungsverhältnis (Voltage Reduction Ratio) erhält man durch Auswertung der Parameter T_1 , T_2 , \hat{U}_t und β' des vollen Blitzstoßes und dem Extremwert \hat{U}_e des Originalimpulses. Damit ergibt sich für das Verhältnis Scheitelwert der neuen k -Faktor-Auswertung zu max. Spannungswert des vollen Blitzstoßes

$$R_v = \frac{\hat{U}_t}{\hat{U}_e}. \text{ Aus dem Scheitelwert des abge-}$$

schnittenen Blitzstoßes $\hat{U}_{e,LIC}$ lässt sich dann mithilfe von R_v der Scheitelwert $\hat{U}_{t,LIC}$ nach der k -Faktor-Analyse berechnen:

$\hat{U}_{t,LIC} = \hat{U}_{e,LIC} \cdot R_v$. Die Parameter der Stirnzeit T_1 , und β' des vollen Blitzstoß-

spannungsimpulses bilden auch die Parameter des abgeschnittenen. Der Abschneidezeitpunkt T_c wird mit dem gemessenen Impuls mit den oben aufgeführten Gleichungen ermittelt.

Methode Differenzkurve

Die zweite Möglichkeit ist die Differenzkurvenbildung der abgeschnittenen Blitzstoßspannung und der mittleren Kurve einer vollen Blitzstoßspannung (Residual Curve). Die volle Blitzstoßspannung wird zuerst verwendet, um die mittlere Kurve zu berechnen und diese abzuspeichern. Zusätzlich zur mittleren Kurve benötigt man den Scheitelwert $\hat{U}_{e,LI}$ der vollen Blitzstoßspannung, um die mittlere Kurve u_m des vollen Blitzstoßes auf den abgeschnittenen Impuls zu skalieren und damit die mittlere Kurve $u_{m,LIC}$ für den abgeschnittenen Blitzstoß zu erhalten:

$$u_{m,LIC}(t) = \frac{\hat{U}_{e,LIC}}{\hat{U}_{e,LI}} \cdot u_m(t). \text{ Somit bleibt das}$$

Verhältnis von Scheitelwert der Originalkurve und der mittleren Kurve gleich. Die Differenzkurve der abgeschnittenen und der mittleren Kurve wird wieder berechnet, gefiltert und danach mit der mittleren Kurve addiert. Auch hier stehen die beiden digitalen Filter zur Verfügung. Die Stirnzeit T_1 , der Scheitelwert \hat{U}_t und β' werden mit der gefilterten Kurve berechnet. Der Abschneidezeitpunkt T_c wird aber weiterhin mit der Originalkurve bestimmt, da die Filterung die Kurve deformiert.

Auswirkungen auf die Auswertung der Blitzstoßspannungen

Um die Auswirkungen des neuen Auswerteverfahrens zu überprüfen, wurden volle und abgeschnittene Blitzstoßspannungsverläufe ausgewertet, die in verschiedenen Transformatorenprüffeldern gemessen wurden. Um die Tauglichkeit des Algorithmus auch für schwierige Kurven zu prüfen, wurden Blitzstoßspannungsimpulse untersucht, die auffällig

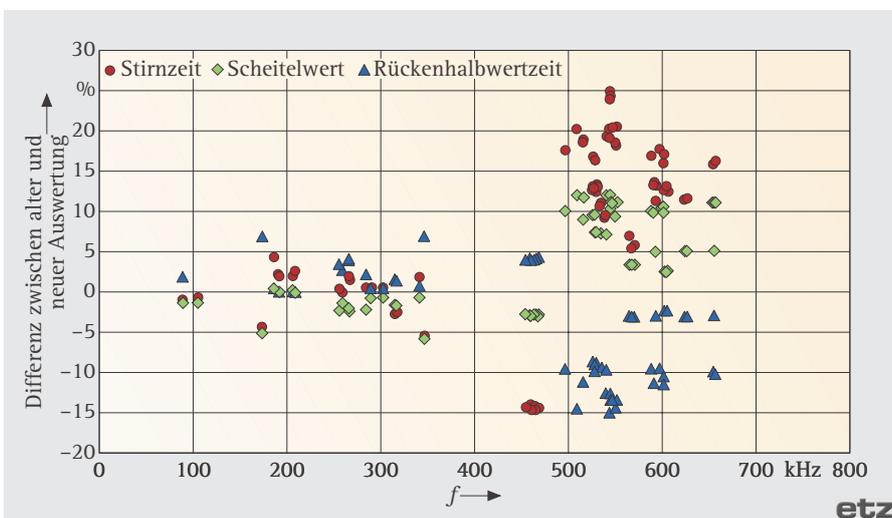


Bild 4. Prozentuale Differenz der Werte T_1 , T_2 und U mit alter und neuer Auswertung

Formelzeichen

| | |
|--------------------------|---|
| a | Koeffizient zur Beschreibung der k -Faktor-Kurve |
| A | Spannungswertvorgabe für Kurvenfitting |
| B, C, D | Zeitwertvorgabe für Kurvenfitting |
| f | Frequenz |
| k | Spannungsfaktor $k(f)$ |
| R_v | Spannungsverringerungsfaktor (Reduction Voltage) |
| t_0 | Zeitpunkt Nulldurchgang |
| t_{30}, t_{50}, t_{90} | Zeitpunkt 30 %, 50 % bzw. 90 % des Scheitelwerts |
| T_1 | Stirnzeit |
| T_2 | Rückenhalbwertzeit |
| T_c | Abschneidezeit |
| U_{30}, U_{90} | statistische 30 %- bzw. 90 %-Stehstoßspannung |
| \hat{U}_e | Spannungs-Scheitelwert der aufgezeichneten, störungsfreien Kurve |
| $\hat{U}_{e,LIC}$ | Scheitelwert des abgeschnittenen Blitzstoßes |
| \hat{U}_{mp} | Spannungsscheitelwert der mittleren Kurve |
| \hat{U}_t | Scheitelwert nach k -Faktor-Analyse |
| $\hat{U}_{t,LIC}$ | Scheitelwert der abgeschnittenen Blitzstoßspannung nach k -Faktor-Analyse |
| β | Überschwingen |

hinsichtlich Form und Einhaltung der Normgrenzen waren. Der Vergleich der k -Faktor-Auswertung zur DIN-IEC-Norm [1] brachte deutliche Veränderungen zum Vorschein. Besonders interessant sind Blitzstoßspannungen, die mit einer Frequenz zwischen 300 kHz bis 800 kHz überschwingen und nach jetziger Norm [1] am oberen bzw. unteren Grenzbereich des jeweiligen Normparameters liegen. Bei der Stirnzeit T_1 liegt die untere Grenze bei 0,84 μs und die obere bei 1,56 μs . Die vollen Blitzstoßspannungsimpulse aus Prüfungen von Leistungstransformatoren liegen hauptsächlich bei der Stirnzeit im oberen Grenzbereich der Norm [1]. Die Unterschiede der Ergebnisse zwischen 300 kHz bis 800 kHz sind mit der neuen k -Faktor-Definition zu erklären. Während sich bei der alten DIN IEC 60060-1 (VDE 0432-1):1994-06 [1] mit dem Sprung bei 500 kHz der Spitzenwert verändert, wird der Extremwert mit Verwendung der neuen frequenzabhängigen k -Faktor-Kurve kontinuierlich kleiner. Somit ändert sich auch die Stirnzeit.

In Bild 3 sind die Stirnzeiten bei Auswertung nach alter Norm [1] und neuem Normenvorschlag [2] dargestellt. Für Frequenzen größer als 500 kHz des Überschwingens sind die Stirnzeiten mit dem neuen k -Faktor größer. So können Blitzstoßspannungen im oberen Grenzbereich nun außerhalb des Grenzwerts von 1,56 μs liegen und sind daher nicht mehr normgerecht. Dafür sind im Bereich zwischen 300 kHz bis 500 kHz die Vorteile im oberen Grenzbereich zu finden, da die Stirnzeiten nach neuer k -Faktor-Auswertung hier kleiner werden. Der prozentuale Unterschied der beiden Auswerteverfahren ist in Bild 4 dargestellt. Für den vollen Blitzstoß kommt es bei Anwendung des neuen Verfahrens zu Abweichungen von maximal 20 % bei den Stirnzeiten.

Bei der Auswertung der Rückenhalbwertzeiten T_2 sind im Vergleich zur Stirnzeit die Effekte genau entgegengesetzt. Das bedeutet, dass bei Oszillationsfrequenzen unter 500 kHz die Rückenhalbwertzeit des Normentwurfs [2] größer ist. Vorteilhaft ist das wiederum für Rückenhalbwertzeiten im unteren Grenzbereich, da diese dann definitiv im Bereich der Norm [2] liegen. Im oberen Grenzbereich wiederum schlägt diese Abhängigkeit in einen Nachteil um, der Impuls ist dann nicht mehr normgerecht. Die maximale Abweichung beträgt bei den Rückenhalbwertzeiten 15 %.

Die Scheitelwerte der Kurven weisen bis 300 kHz keine Unterschiede auf. Erst bei Frequenzen von 300 kHz bis 500 kHz sieht man eine maximale Abweichung der beiden Scheitelwerte von 7 %. Dabei ist \hat{U}_e , der Scheitelwert der Originalkurve, größer als \hat{U}_f . Ab der Frequenz von 500 kHz ist wiederum der Scheitelwert der gefilterten Kurve um bis zu 13 % höher.

Bei den abgeschnittenen Blitzstößen ergibt sich für beide vorgestellten Methoden eine Abweichung von maximal 20 % bei Scheitelwerten und Stirnzeiten. Die Abschneidezeit T_c bleibt aufgrund der Auswertung mit der Originalkurve und dem geringen Einfluss der Stirnzeit bis auf geringe Abweichungen von maximal 4 % gleich.

Literatur

- [1] DIN IEC 60060-1 (VDE 0432-1): 1994-06 Hochspannungs-Prüftechnik – Teil 1: Allgemeine Festlegungen zu Prüfbedingungen. Berlin · Offenbach: VDE VERLAG
- [2] E DIN IEC 60060-1 (VDE 0432-1): 2005-09 Hochspannungs-Prüftechnik – Teil 1: Allgemeine Begriffe und Prüfbedingungen. Berlin · Offenbach: VDE VERLAG
- [3] Garnacho, F.; Simón, P.; Gockenbach, E.; Hackemack, K.; Berlijn, S.; Werle, P.: Evaluation of lightning impulse voltages based on experimental results. *Electra* 32 (2002) H. 204, S. 31–39 (ISSN 1286-1146) ■