

Internationale Vergleichsmessungen mit Stoßspannungen

K. Schon

Kurzfassung: Anlässlich der Revision der internationalen Prüfvorschriften IEC-Publikation 60 wurden mehrere internationale Vergleichsmessungen an Stoßspannungsteilern durchgeführt. Hierbei sollten insbesondere Erfahrungen mit einem Meßverfahren gesammelt werden, bei dem die Fehler eines Teilers bei Stoßspannungsmessungen direkt durch Vergleich mit einem genauen Referenzteiler bestimmt werden. Zusätzlich wurde das zweite nach IEC 60 zulässige und bisher überwiegend eingesetzte Beurteilungsverfahren für Stoßspannungsteiler, das auf der Ermittlung eines erweiterten Satzes von Parametern der Sprungantwort beruht, untersucht. Über die Ergebnisse dieser Ringvergleiche und über die erreichbaren Meßunsicherheiten beider Verfahren wird hier berichtet.

1. Einleitung

Die bei Stoßspannungsprüfungen eingesetzten Meßsysteme müssen nach IEC 60 folgende Gesamtfehlergrenzen einhalten /1/:

- $\pm 3 \%$ für den Scheitelwert von vollen und nach dem Scheitel abgeschnittenen Stößen,
- $\pm 5 \%$ für den Scheitelwert von in der Stirn abgeschnittenen Stößen
- $\pm 10 \%$ für die Zeitparameter von vollen und abgeschnittenen Stößen.

Diese Anforderungen gelten für das gesamte Meßsystem, also für den Teiler und das Meßgerät auf der Niederspannungsseite. Für die verschiedenen Arten von Meßgeräten (Stoßvoltmeter, Stoßoszilloskop und in Zukunft auch Digitalrecorder) bestehen zusätzliche Anforderungen /2,3/. Bei der Kalibrierung des vollständigen Meßsystems wird aus praktischen Gründen das Meßgerät selbst häufig als fehlerlos angesehen und der gesamte Meßfehler dem Teiler zugeordnet. Im allgemeinen steigen die Fehler des Teilers und des Meßgerätes wegen ihres begrenzten Übertragungsverhaltens mit zunehmender Steilheit

der Prüfspannung an. Obwohl diese Übertragungsfehler systematischer Natur, also reproduzierbar und damit korrigierbar sind, ist deren rechnerische Berücksichtigung - z. B. durch unterschiedliche Teilungsverhältnisse bei Scheitelmessungen von vollen und in der Stirn abgeschnittenen Stoßspannungen - nach IEC 60 nicht vorgesehen.

Nach IEC 60 ist der Nachweis, daß der Teiler die festgelegten Fehlergrenzen einhält, nach zwei Verfahren möglich. Die neue, revidierte Fassung der Prüfvorschrift empfiehlt vorzugsweise, den Teiler (Prüfling) mit einem genauen Referenzteiler bei Stoßspannung zu vergleichen. Die Vergleichsmessung erfolgt bei relativ kleinen Stoßpegeln, so daß der Referenzteiler nur eine geringe Bauhöhe und damit - bei optimaler Dimensionierung - vernachlässigbare Übertragungsfehler aufweist. Die Fehler des Prüflings bei der Messung des Scheitelwertes und der Zeitparameter, z. B. der Stirnzeit, von vollen und abgeschnittenen Stößen lassen sich so durch die Vergleichsmessung direkt ermitteln. Die Vergleichsmessung ist grundsätzlich nicht neu, sie wurde bisher aber nur selten auf Stoßspannungsteiler angewendet, da die Einzelheiten dieses Meßverfahrens nicht in den Prüfvorschriften enthalten sind.

Das zweite, bisher überwiegend eingesetzte Beurteilungsverfahren für Stoßspannungsteiler geht von der Messung der Sprungantwort und der Ermittlung mehrerer Antwortparameter aus. Für diese sind in IEC 60 jeweils Grenzwerte festgelegt, deren Einhaltung gewährleistet, daß der Prüfling die IEC-Fehlergrenzen für den Scheitelwert und die Zeitparameter bei Stoßprüfungen einhält. Die von derzeit zwei in der zukünftigen Fassung von IEC 60 auf fünf erhöhte Anzahl von Antwortparametern stellt sicher eine deutliche Verbesserung dieses Beurteilungsverfahrens dar, das in der Vergangenheit Fehlentscheidungen nicht ausschließen konnte.

Ziel der internationalen Ringvergleiche an Stoßspannungsteilern war in erster Linie, die Brauchbarkeit des Vergleichsmeßverfahrens in der Praxis und die erreichte Übereinstimmung in den Meßwerten der beteiligten Laboratorien zu untersuchen. Zusätzlich wurden die Antwortparameter der untersuchten Teiler ermittelt, was ebenfalls zu einer Aussage über die Meßunsicherheit dieses Beurteilungsverfahrens führte.

2. Vergleichsmessung mit Referenzteiler

2.1 Prinzip des Meßverfahrens

Der Referenzteiler A und der Prüfling (Teiler B) werden mit ihren Hochspannungszuleitungen entsprechend Bild 1 an die gemeinsame Meßstelle P angeschlossen, die den Kopf einer Abschneidefunkenstrecke darstellt /4,5/. Von oben betrachtet, bilden beide Teiler mit ihren Zuleitungen und der Stoßgenerator ein Y; in dieser Schaltung ist die gegenseitige elektromagnetische Beeinflussung meist vernachlässigbar. Die Funkenstrecke wird, wenn sie nicht extern getriggert wird, zweckmäßigerweise mit einer UV-Lampe bestrahlt, um die Streuung der Abschneidezeiten zu reduzieren. Für jeden Stoß werden die Ausgangsspannungen beider Teiler simultan mit zwei Recordern oder Oszilloskopen aufgezeichnet. Die nominellen Werte der Zeitparameter, wie sie mit dem Referenzteiler gemessen werden, betragen für die Stirnzeit der vollen Stöße $T_1 = (1 \pm 0,1) \mu s$ und für die Abschneidezeiten $T_c = 0,5 \mu s$, $1 \mu s$ und $1,5 \mu s$. Der Scheitelwert der vollen und abgeschnittenen Stöße wird auf etwa 100 kV konstant gehalten.

Die Auswertung der mit beiden Teilern simultan aufgezeichneten Kurvenverläufe umfaßt den Scheitelwert und die Stirnzeit (Bild 2). Unter Berücksichtigung der Teilungsverhältnisse und der Skalenfaktoren der eingesetzten Recorder oder Oszilloskope ist der relative Fehler des Prüflings B in Bezug zum Referenzteiler A für den Scheitelwert der Stoßspannung:

$$\delta_u (T_c) = \frac{U_B - U_A}{U_A} \quad (1)$$

und für die Stirnzeit:

$$\delta_f (T_c) = \frac{T_{1A} - T_{1B}}{T_{1A}} \quad (2)$$

Die Stirnzeit wird hier als wichtiger Zeitparameter gewählt, der sowohl für volle als auch abgeschnittene Stöße durch die Werte bei 30 % und 90 % des Scheitelwertes eindeutig definiert ist. Oszillationen, die dem Stoß möglicherweise überlagert sind, sollen entsprechend der IEC-Publ. 60 bei der Auswertung durch Einzeichnen oder Berechnen einer mittleren Kurve eliminiert werden.

Für jede Abschneidezeit T_c werden 10 Messungen durchgeführt, für die die Mittelwerte der Fehler nach Glg. 1 und 2 und deren Standardabweichung angegeben werden. Trägt man diese Mittelwerte von δ_u und δ_f über T_c auf, ergibt sich ein sehr einfaches und anschauliches Fehlerdiagramm für den Teiler.

Die Ergebnisse der Vergleichsmessung hängen natürlich wesentlich von der Qualität des Referenzteilers ab /6/. Dieser braucht selber nur für relativ geringe Prüfspannungen – der Entwurf der IEC Publ. 60 sieht 20 % der Nennspannung des Prüflings vor – ausgelegt zu sein, was ein befriedigendes Übertragungsverhalten auch für die kürzesten Blitzstöße mit Abschneidezeiten von $0,5 \mu s$ erzielbar macht. Allerdings muß der Referenzteiler meist mit einer unverhältnismäßig langen Hochspannungszuleitung entsprechend den Abmessungen des Prüflings versehen sein, wodurch das Übertragungsverhalten des Referenzteilers beeinflußt werden kann.

2.2 Ergebnisse internationaler Ringvergleiche

In den vergangenen 3 Jahren wurden insgesamt 4 internationale Ringvergleiche an Stoßspannungsteilern mit über 20 Hochspannungslaboratorien durchgeführt. Die Ergebnisse aller Ringvergleiche liegen inzwischen vor, sie sind bisher allerdings nur zu einem geringen Teil veröffentlicht /7/.

In einem der umfangreichsten Ringvergleiche wurden zunächst die Fehler eines ohmschen 1-MV-Teilers (Prüfling B) im Vergleich zu einem 200-kV-Teiler (Referenzteiler A) ermittelt. Beide Teiler wiesen annähernd gleiche Daten für den Gesamtwiderstand, das Teilungsverhältnis und die Hochspannungszuleitung auf, wobei die kleinere Bauhöhe des Referenzteilers A durch eine vertikale Zuleitung auf die Gesamthöhe $H = 2,8 \text{ m}$ erhöht wurde (Bild 3). Der Referenzteiler A wurde mit und ohne einen zusätzlichen Dämpfungswiderstand betrieben. Beide Teiler wurden den 7 beteiligten Laboratorien zugeschickt und dort über laboreigene Koaxialkabel an deren zweikanalige Aufzeichnungssysteme angeschlossen.

Die Ermittlung der Teilungsverhältnisse beider Teiler, die überwiegend bei Gleichspannung gemessen wurden, führte bei keinem der beteiligten Laboratorien zu Schwierigkeiten. Die Teilungsverhältnisse stimmten relativ innerhalb von $\pm 0,1 \%$ überein.

Die Ergebnisse der Vergleichsmessungen sind in Bild 4 als Fehlerdiagramm von Teiler B für den Scheitelwert und die Stirnzeit wiedergegeben. Für

volle und im Rücken abgeschnittene Stöße ergibt sich offenbar eine sehr gute Übereinstimmung der meisten Laboratorien hinsichtlich der Scheitelwertfehler δ_U ; nur zwei Laboratorien weisen Abweichungen auf, die aber weniger als 1 % betragen und daher tolerierbar sind. Für in der Stirn abgeschnittene Stöße ergeben sich für Teiler B negative Scheitelwertfehler, d. h. der Scheitelwert wird mit Teiler B zu niedrig gemessen. Die Werte der einzelnen Laboratorien weichen stärker voneinander ab, insbesondere für $T_c = 0,5 \mu s$, und zwei δ_U -Werte liegen sogar außerhalb der schraffiert eingezeichneten IEC-Fehlergrenze von -5 % (Bild 4a). Läßt man die Werte der beiden mit ● und o gekennzeichneten Laboratorien außer acht, so ergibt sich für $T_c = 0,5 \mu s$ als gemeinsamer Mittelwert und Standardabweichung der übrigen Laboratorien $\bar{\delta}_U = -(4,1 \pm 1,4) \%$ nach Bild 4a (Referenzteiler ohne R_d) und $\bar{\delta}_U = -(3,3 \pm 0,5) \%$ nach Bild 4b (Referenzteiler mit R_d). Der Dämpfungswiderstand des Referenzteilers A macht sich also mit einem Fehleranteil von 0,8 % bemerkbar und verringert offenbar die Streuung der Meßwerte.

Die Stirnzeitfehler von Teiler B betragen nach Bild 4a im Mittel $\bar{\delta}_U = -(0,1 \pm 2,3) \%$ für volle Stöße und $-(5,7 \pm 2,2) \%$ für nach $T_c = 0,5 \mu s$ abgeschnittene Stöße. Die Streuung der Stirnzeitfehler ist wiederum kleiner, wenn der Referenzteiler A mit Dämpfungswiderstand betrieben wird (ohne Berücksichtigung des mit o gekennzeichneten Laboratoriums). Der Dämpfungswiderstand von Teiler A trägt nur mit 1 % zum Stirnzeitfehler bei. Die teilweise beträchtlichen Unterschiede in den Ergebnissen einiger Laboratorien, insbesondere nach Bild 4a für die Scheitelwertfehler bei abgeschnittenen Stößen und für die Stirnzeitfehler, sind unbefriedigend und bedürfen noch der Klärung. Da allen Laboratorien stets die selben Teiler - Referenzteiler A und Prüfling B - für die Vergleichsmessungen zur Verfügung standen, lassen sich die Unterschiede vermutlich auf die verwendeten Recorder bzw. Oszilloskope und deren Kalibrierung zurückführen.

Das Problem der derzeit noch unzulänglichen Kalibriermöglichkeiten für die Meßgeräte ist auch in den zuständigen Arbeitskreisen von CIGRE und IEC bekannt. Nach Absprache mit zwei Herstellern werden hierfür in naher Zukunft Kalibrierimpulsgeneratoren mit Scheitelwerten bis 1500 V angeboten, die eine einfache und schnelle Überprüfung der Digitalrecorder und Oszilloskope entsprechend den Prüfvorschriften ermöglichen. Seit einigen Jahren gibt es zwar bereits programmierbare Signalgeneratoren für beliebige Kurvenverläufe, die aber nur Ausgangsspannungen von wenigen Volt erzeugen können. Mit den für Sprungantwortmessungen eingesetzten Sprunggeneratoren mit quecksil-

berbenetzten Reed-Kontakten lassen sich Sprünge bis etwa 1000 V erzeugen, die für die Kalibrierung der Recorder einschließlich der Abschwächer sehr gut geeignet sind.

Die in den Bildern 4a und 4b gezeigten Fehlerwerte sind jeweils Mittelwerte von 10 oder teilweise 20 Einzelmessungen der einzelnen Laboratorien. Die Einzelwerte selbst streuen um diesen Mittelwert, wobei die Standardabweichung bei den meisten Laboratorien kleiner als 0,5 % für die Scheitelwertfehler, aber häufig 2 ... 3 % für die Stirnzeitfehler ist. Eine Ursache für die große Streuung der Stirnzeiten kann in der Wirkung überlagerter Schwingungen begründet sein. Die bei einem Teilnehmer sehr ausgeprägten Schwingungen in der Stoßstirn (Bild 5) wurden zunächst manuell entsprechend IEC 60 eliminiert, wobei die Stirnzeiten jedoch relativ stark mit $\sigma_f = 2,5 \%$ streuten. Die rechnergestützte Datenauswertung mit digitaler Filterung führte dann zu einer deutlichen Verringerung der Standardabweichung auf Werte unter 1 %.

Im zweiten Teil dieses Ringvergleichs wurde der Teiler A einschließlich $R_d = 200 \Omega$ mit dem jeweiligen Referenzteiler C von 5 der teilnehmenden Laboratorien verglichen, d. h. Teiler A war hierbei der Prüfling. Mit einer Ausnahme stimmen diese Laboratorien hinsichtlich der Scheitelwert- und Stirnzeitfehler für volle und abgeschnittene Stöße mit $T_c \geq 1 \mu s$ sehr gut überein (Bild 6), d. h. beide Fehler von Teiler A sind praktisch vernachlässigbar klein. Für die bei $T_c = 0,5 \mu s$ abgeschnittenen Stöße ergeben sich dagegen größere Unterschiede zwischen den Laboratorien, die mit der unterschiedlichen Qualität der laboreigenen Referenzteiler erklärbar sind. Diese waren teilweise für deutlich höhere Nennspannungen ausgelegt und wiesen daher ein weniger gutes Übertragungsverhalten als Teiler A auf. Die mit Teiler A gemessenen Scheitelwerte sind dann größer, so daß ein positiver Fehler δ_u entsteht. Da in der Vergangenheit die Hersteller von Stoßspannungsteilern ihr Augenmerk eher auf die ultrahohen Spannungen richteten, gibt es derzeit nur wenige kommerziell erhältliche Referenzteiler kleiner Nennspannung und mit geringen Übertragungsfehlern. Die Hersteller werden daher in Kürze ihr Programm mit kleinen Referenzteilern ergänzen.

Bild 7 zeigt die Ergebnisse eines weiteren Ringvergleichs mit anderen Laboratorien. Als Prüfling diente wiederum ein ohmscher 200-kV-Teiler mit Dämpfungswiderstand $R_d = 200 \Omega$, der sich in einigen Eigenschaften von dem

Teiler des zuvor beschriebenen Ringvergleichs unterschied. So wurde eine schräge Hochspannungszuleitung mit zwei unterschiedlichen Längen $L = 1,5 \text{ m}$ und $3,5 \text{ m}$ verwendet, und der Unterspannungsteil setzte sich aus einer Vielzahl von Schichtwiderständen zusammen, die nur ein geringes Überspringen der Sprungantwort verursachten. Die Fehler des Prüflings wurden im Vergleich zu dem jeweiligen Referenzteiler des Laboratoriums als Mittelwerte angegeben.

Die Ergebnisse in Bild 7 führen im Prinzip zu den gleichen Schlußfolgerungen wie bei den anderen Ringvergleichen. Wiederum stimmen die Fehlerwerte der meisten Laboratorien innerhalb bestimmter Grenzen überein, während ein bzw. zwei Laboratorien (\blacktriangle in Bild 7a, o in Bild 7b) größere Abweichungen aufweisen. Für die Stirnzeitfehler ergeben sich grundsätzlich größere Streuungen als für die Scheitelwertfehler. Bei längerer Zuleitung verringert sich der Scheitelwertfehler des Prüflings um knapp 1 %, was auf das größere Überspringen in der Sprungantwort und Verringerung der Antwortzeiten zurückzuführen ist.

Auffällig ist, daß der Prüfling bereits für volle Stöße einen negativen Scheitelwertfehler von ungefähr -1 % aufweist (Bild 7a). Bei eingehender Betrachtung der Sprungantwort zeigte sich, daß deren Endwert erst nach mehr als $10 \text{ } \mu\text{s}$ erreicht wurde. Im Zeitbereich zwischen 1 bis $2 \text{ } \mu\text{s}$, in dem der Scheitel der vollen Stöße auftrat, betrug die relative Abweichung zum Endwert noch -1 %, was den Scheitelwertfehler damit erklärte.

Bei zumindest einem Teilnehmer des Ringvergleichs mit kurzer Hochspannungszuleitung des Prüflings traten elektromagnetisch eingekoppelte Störungen infolge der geringen Entfernung der Abschneidefunkenstrecke auf, die teilweise den Scheitelwert abgeschnittener Stöße verfälschten. Dieser Störeffekt trat bei den längeren Zuleitungen nicht auf.

Als vorteilhaft bei allen Vergleichsmessungen hat sich häufig der Wechsel der Aufzeichnungskanäle nach der halben Anzahl der Stöße ergeben. Bei der anschließenden Mittelwertbildung für den Scheitelwert und die Stirnzeit werden die systematischen Fehler, die von den Recordern bzw. Oszilloskopen herrühren, größtenteils eliminiert. Soll der Vergleich nur bei vollen Stößen vorgenommen werden, können die Messungen bei guter Reproduzierbarkeit des Stoßgenerators auch alternierend mit nur einem Aufzeichnungskanal durchgeführt werden.

Der vollständige Prüfaufbau für die Vergleichsmessung eignet sich weiterhin gut zum Nachweis elektromagnetischer Störungen im Niederspannungskreis bei teilerseitig kurzgeschlossenem Meßkabel, wobei mit dem Referenzteiler der Stoß selbst aufgezeichnet werden kann. Nach Bild 8 sind die Störungen auf beiden Meßsystemen nur 0,2 % relativ zum Scheitelwert des Störsignals (abgeschnittener Stoß 100 kV). Grundsätzlich ließe sich in dem selben Prüfkreis mit Referenzteiler auch nachweisen, daß der Prüfling die geforderte Meßunsicherheit hinsichtlich hochfrequenter Oszillationen einhält. Diese könnten mit Hilfe der Abschneidefunkenstrecke und eines Schwingkreises erzeugt werden.

Da der Referenzteiler nur eine relativ geringe Nennspannung aufweist, muß der Nachweis der Spannungsabhängigkeit des Prüflings bis zu dessen höchsten Betriebsspannung mit Hilfe eines zweiten, spannungsfesten Referenzteilers erfolgen. Dieser braucht dann natürlich keine hohen Anforderungen an das Übertragungsverhalten zu erfüllen. Eingehende Untersuchungen bei der EdF in Frankreich haben übrigens gezeigt, daß Kugelfunkenstrecken sich nicht als verlässliche Referenz eignen. Die Vergleichsmessungen zwischen mehreren Teilern und einer Funkenstrecke bis 1,4 MV differierten zum Teil bis zu 9 % im Scheitelwert.

3. Ergebnisse der Ringvergleiche für Antwortparameter

Bild 9 zeigt die Sprungantworten der beiden Teiler A und B nach Bild 3, wie sie von einem Teilnehmer aufgezeichnet wurden. Obwohl auch dieser Prüfkreis mit hochgestelltem Sprunggenerator für alle Teilnehmer weitgehend festgelegt war, lieferte die Auswertung teilweise sehr unterschiedliche Ergebnisse. So betrugen die Antwortzeiten für Teiler A ohne R_d : -18 ns ... 8,1 ns und für Teiler A mit R_d : -0,4 ns ... 10,8 ns. Auch für Teiler B gab es große Unterschiede, die sich in diesem Fall aber hauptsächlich auf die unterschiedliche Festlegung des virtuellen Nullpunktes O' zurückführen ließ. Nach IEC 60 sind drei Möglichkeiten für O' in Bild 10 eingezeichnet, wobei die ersten beiden praktisch als identisch angesehen werden können. Im Vergleich hierzu führt der dritte O' -Wert zu einer großen Anfangsverzerrungszeit $T_o / 1/$ und zu einer deutlich kleineren Antwortzeit. Diese Mehrdeutigkeit bei der Wahl des virtuellen Nullpunktes wurde von den Laboratorien teilweise erkannt und bei der Auswertung berücksichtigt. Abgesehen von Ausreißern, stimmt die Mehrzahl der Teilnehmer aber innerhalb von ± 5 ns hinsichtlich der Antwortzeiten beider Teiler überein.

Unerwartet große Streuungen ergaben sich für die Werte des Überschwingens β und der Beruhigungszeit T_S . Für Teiler A ohne R_d ergab sich z. B. $\beta = 59\%$ bis 102% , und für Teiler B $\beta = 12\%$ bis 18% . Die T_S -Werte der Teilnehmer wichen im Extremfall sogar um den Faktor 7 voneinander ab. Zum Teil lassen sich diese Abweichungen auf unterschiedliche Bandbreiten der Recorder bzw. Oszilloskope und Längen der Meßkabel erklären.

4. Schlußfolgerungen

Die internationalen Ringvergleiche an Stoßspannungsteilern haben zunächst grundsätzlich die Brauchbarkeit des Vergleichsmeßverfahrens in der Praxis gezeigt. Die Mehrzahl der teilnehmenden Laboratorien stimmt hinsichtlich der ermittelten Scheitelwertfehler innerhalb von $\pm 0,5\%$ für volle Stöße und innerhalb von $\pm 1,5\%$ für in der Stirn abgeschnittene Stöße überein. Die Stirnzeitfehler streuen dagegen mit $\pm 3\%$ für volle und abgeschnittene Stöße weit stärker. Insgesamt betragen damit die Abweichungen unter den meisten Laboratorien nur ein Drittel der jeweils für Scheitelwert- und Stirnzeitmessungen festgelegten IEC-Fehlergrenzen. Die Ausreißer, die bei wenigen Laboratorien aufgetreten sind, lassen sich größtenteils auf eine unzureichende Kalibrierung der Recorder bzw. Oszilloskope sowie auf das Fehlen eines guten Referenzteilers kleiner Nennspannung zurückführen. Hier werden in Zukunft die neu ausgearbeitete IEC-Publikation über Digitalrecorder sowie die von der Industrie in naher Zukunft angebotenen Kalibrierimpulsgeneratoren und Referenzteiler für Abhilfe sorgen. Ein weiterer wichtiger Schritt ist der im Entwurf der revidierten IEC-Publikation 60 geplante Ausbau von akkreditierten Kalibrierstellen, die dann für die regelmäßige Überprüfung der Meßeinrichtungen zuständig sein werden.

Die Ergebnisse der Ringvergleiche für die Antwortparameter können nicht befriedigen, da die Werte der beteiligten Laboratorien teilweise sehr voneinander abweichen. Immerhin gehört die Messung und Auswertung der Sprungantwort seit mehreren Jahrzehnten zu den wichtigsten Kriterien in IEC 60 zur Beurteilung von Stoßspannungsteilern, so daß eine entsprechend lange Meßpraxis vorausgesetzt werden kann. Es ist sicher zu begrüßen, wenn auch dieses Beurteilungsverfahren zukünftig von akkreditierten Kalibrierstellen überwacht wird.

Literaturverzeichnis

- /1/ IEC 60: High-voltage test techniques; Teil 1 bis 4 (1973/1977);
z. Z. in Revision
- /2/ IEC 790: Oscilloscopes and peak voltmeters for impulse tests
(1984)
- /3/ IEC Draft: Digital recorders for measurements in high-voltage
impulse tests (1990)
- /4/ Kind, D.; Korff, H. und Schon, K.: Abschneidefehler zur Beurteilung
von Stoßspannungsteilern. In: Neuere Entwicklungen der Stoßspan-
nungsmeßtechnik II, PTB-Bericht E-28 (Dezember 1986)
- /5/ Kind, D.; Korff, H.; Schmidt, A. und Schon, K.: Chopping errors for
characterizing hv impulse dividers. 5. ISH, Braunschweig (1987),
Beitrag 71.02
- /6/ Kind, D.; Schon, K. und Schulte, R.: The calibration of standard
impulse dividers. 6. ISH, New Orleans (1989), Beitrag 41.10
- /7/ McComb, T.R. et al.: International comparison of hv impulse measuring
systems. IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 4 (1989), S. 906-915

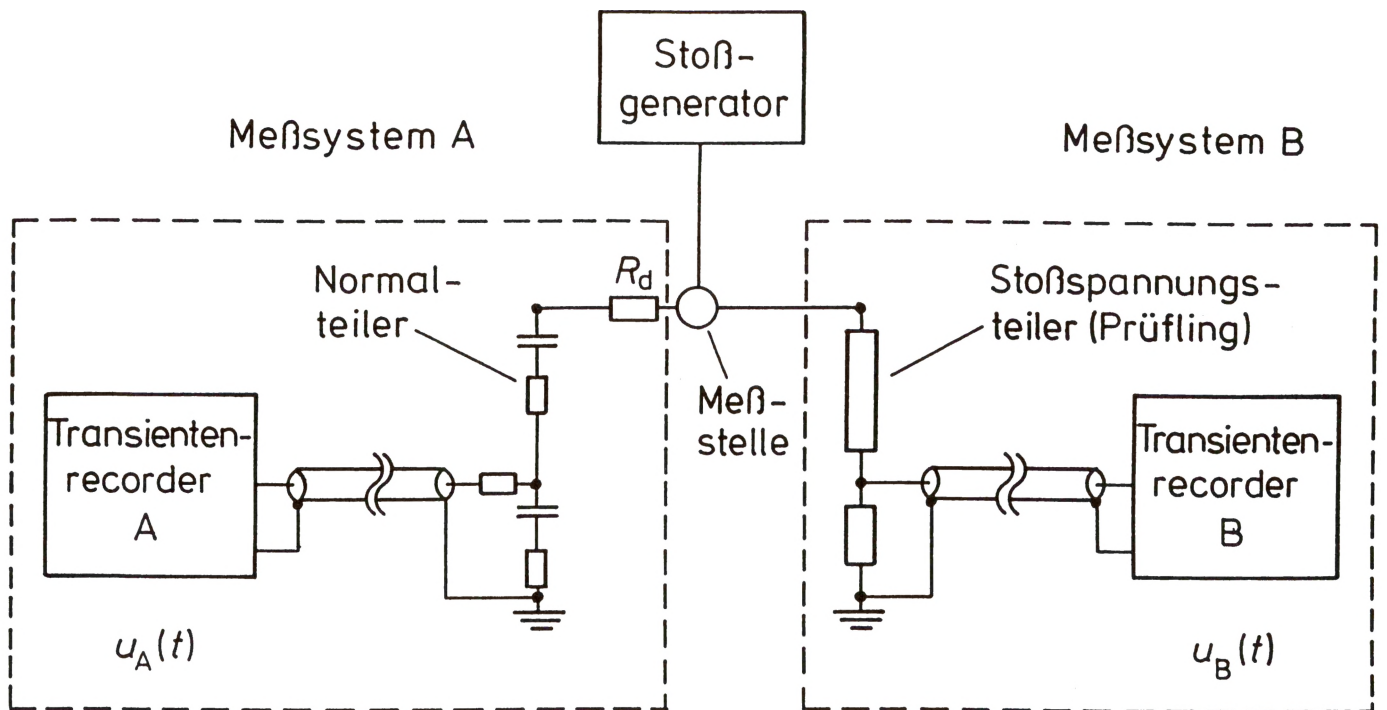


Bild 1: Prinzipieller Prüfkreis für die Vergleichsmessung zwischen zwei Stoßspannungsteilern

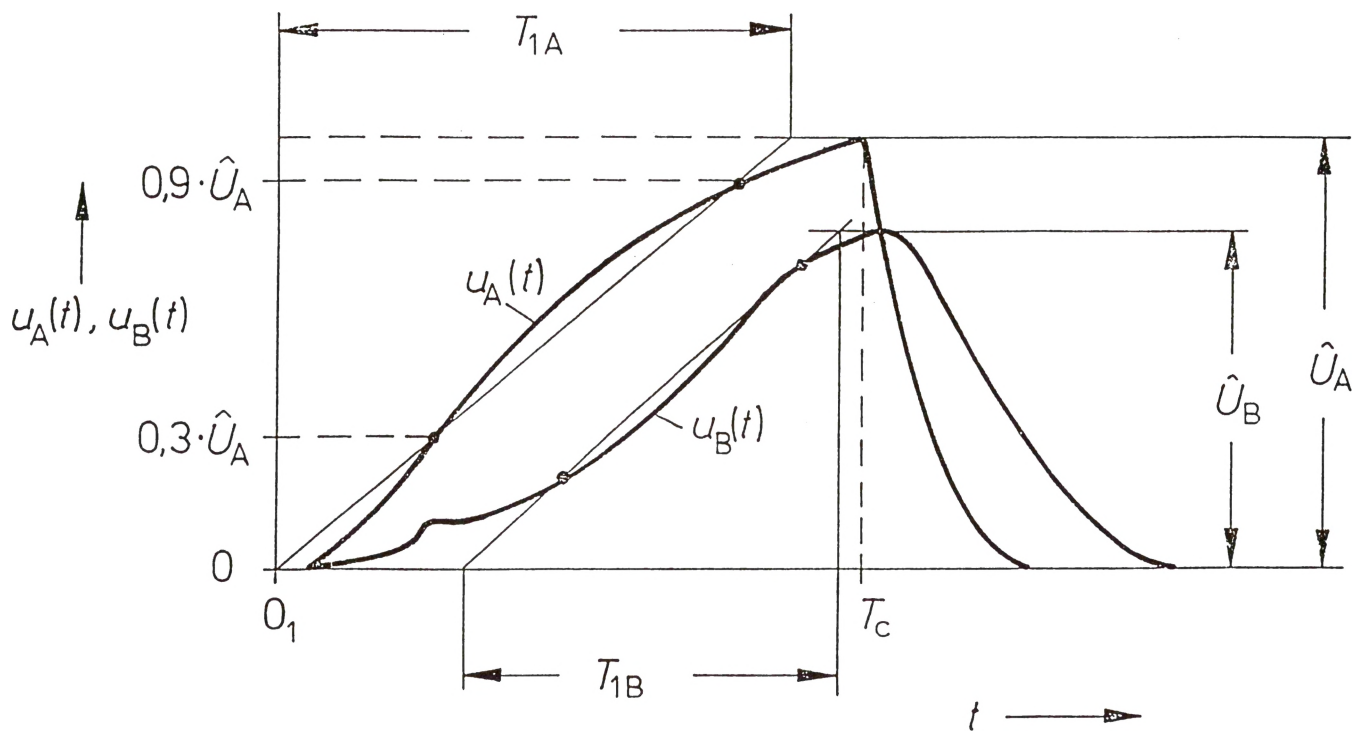


Bild 2: Abgeschnittener Stoß (Prinzip), gemessen mit den Teilern A und B

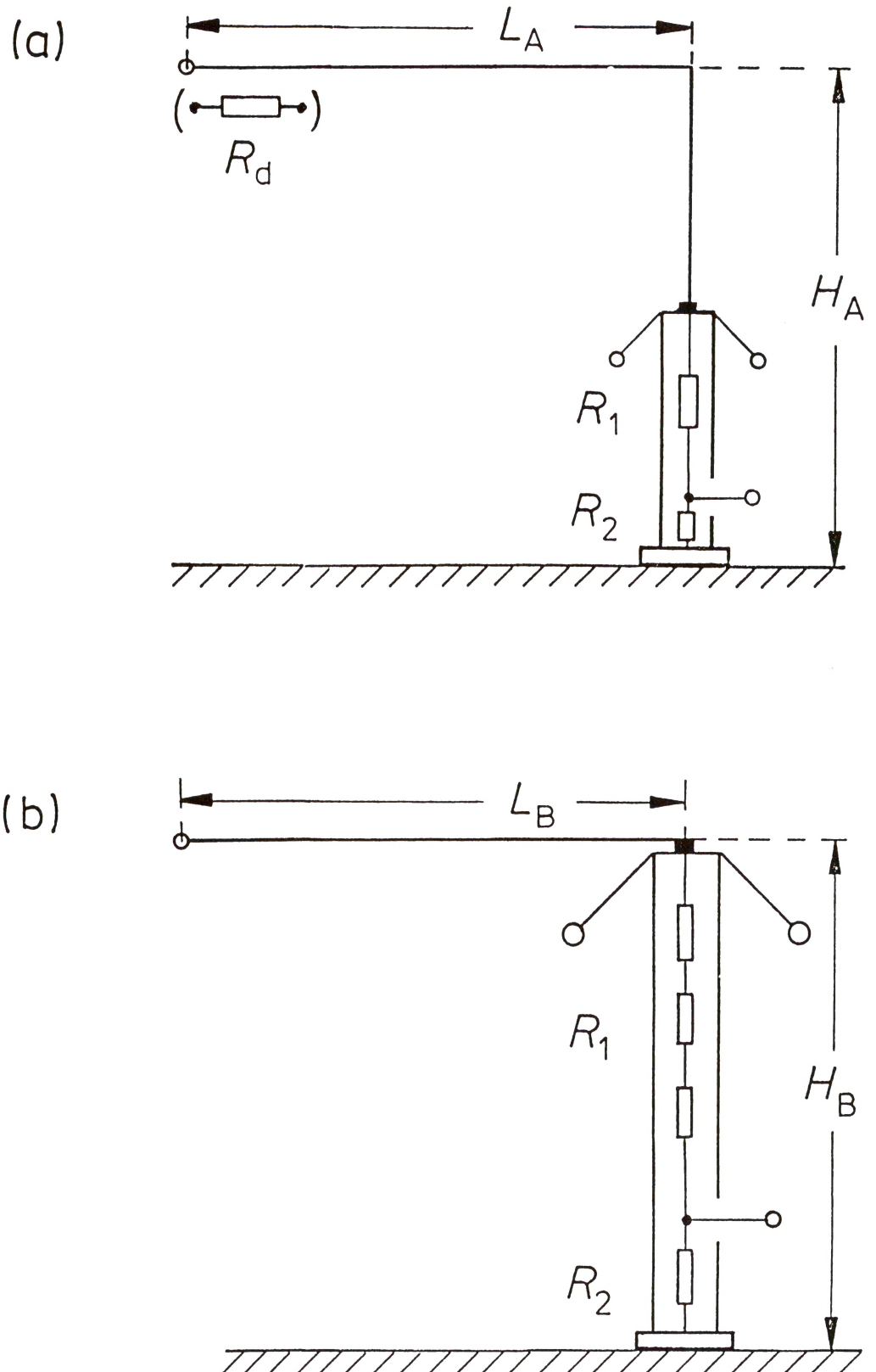


Bild 3: Referenzteiler A und Prüfling B mit Hochspannungszuleitung

- a) Teiler A ($R_1 = 8 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 75 \text{ }\Omega$, $R_d = 200 \text{ }\Omega$, $L_A = H_A = 2,8 \text{ m}$)
 b) Teiler B ($R_1 = 8,4 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 75 \text{ }\Omega$, $L_B = H_B = 2,8 \text{ m}$)

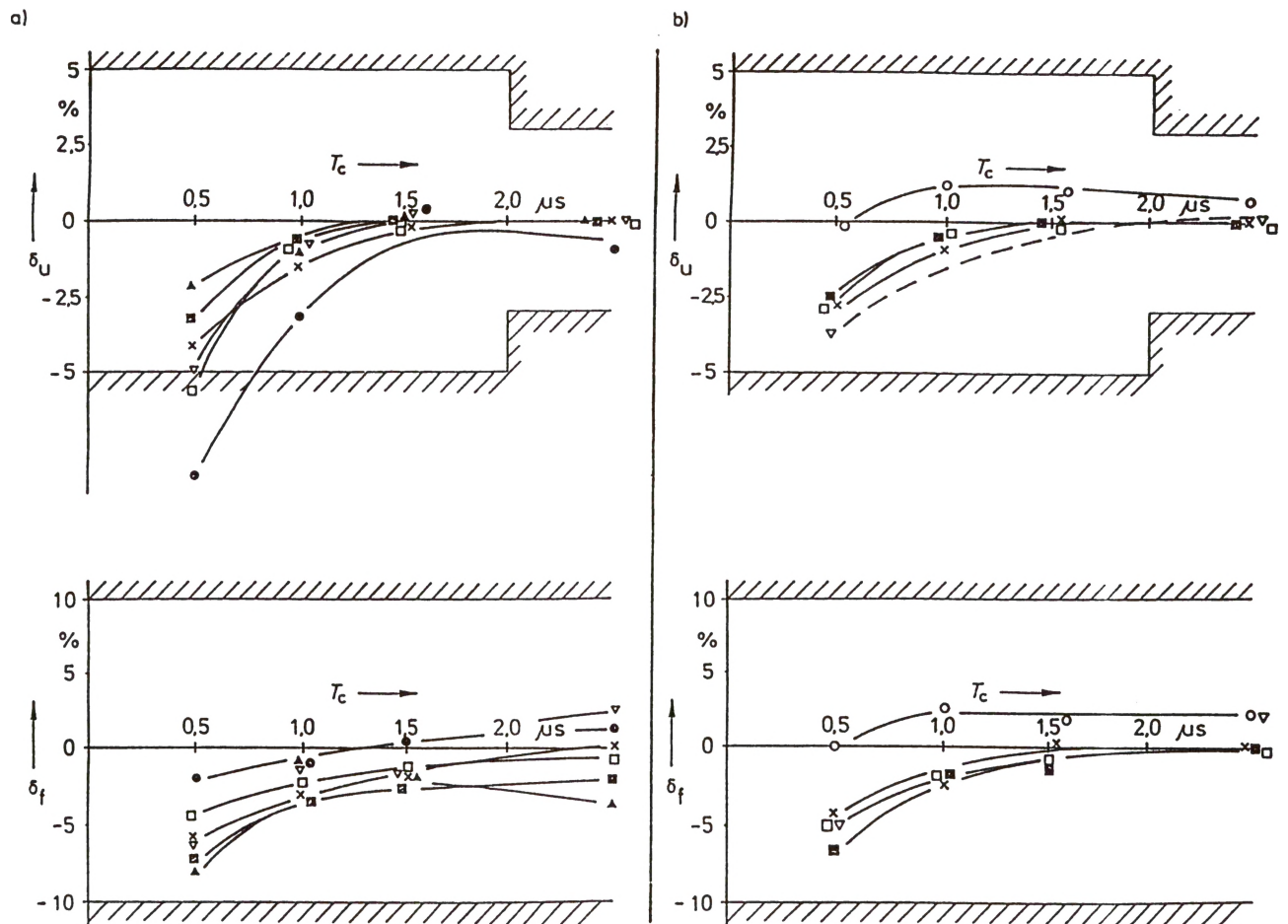


Bild 4: Scheitelwertfehler δ_U und Stirnzeitfehler δ_f in Abhängigkeit von der Abschneidezeit T_c für Teiler B im Vergleich zum

- a) Referenzteiler A ohne R_D
- b) Referenzteiler mit $R_D = 200 \Omega$

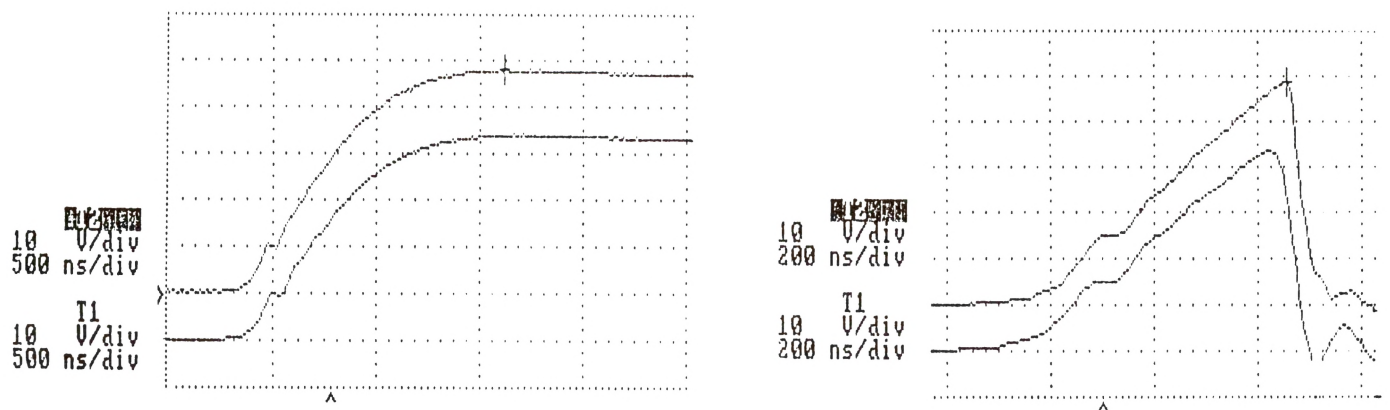


Bild 5: Beispiel für Stoßspannung mit überlagelter Oszillation in der Stirn

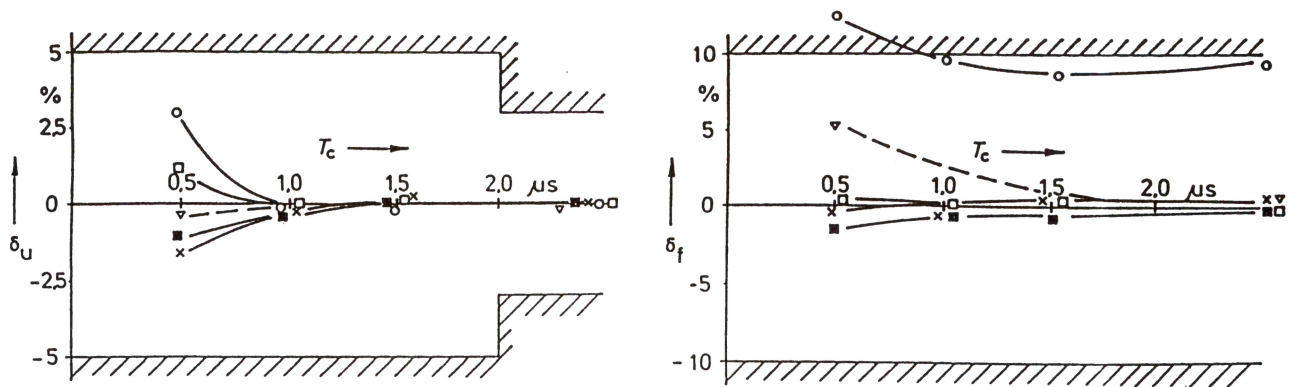


Bild 6: Scheitelwertfehler δ_U und Stirnzeitfehler δ_f in Abhängigkeit von der Abschneidezeit T_c für Teiler A mit $R_d = 200 \, \Omega$ im Vergleich zum jeweiligen Referenzteiler C des Laboratoriums

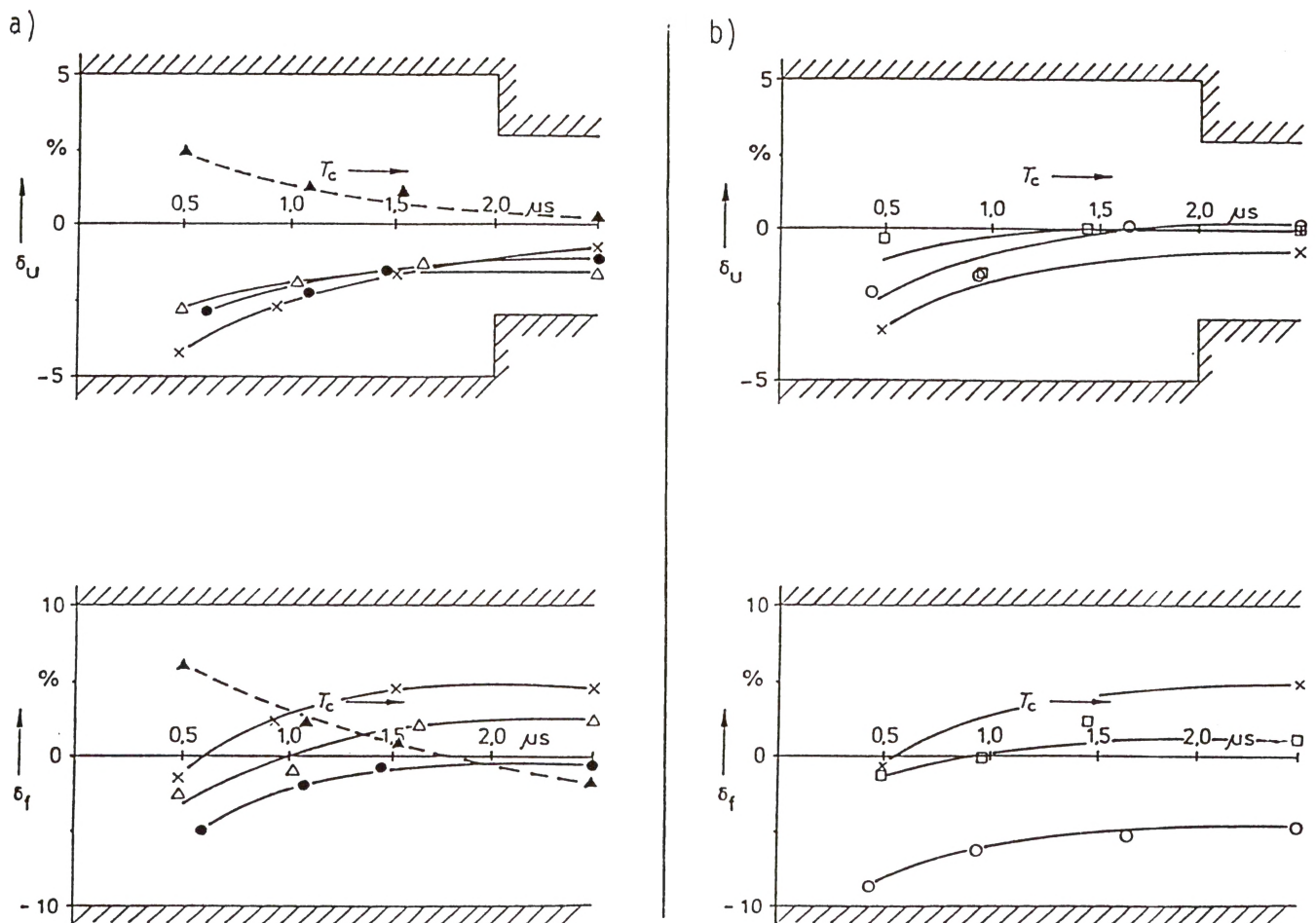


Bild 7: Scheitelwertfehler δ_U und Stirnzeitfehler δ_f in Abhängigkeit von der Abschneidezeit T_c für einen ohmschen 200-kV-Teiler mit $R_d = 200 \, \Omega$

a) Zuleitungslänge $L = 1,5 \, \text{m}$

b) Zuleitungslänge $L = 3,5 \, \text{m}$

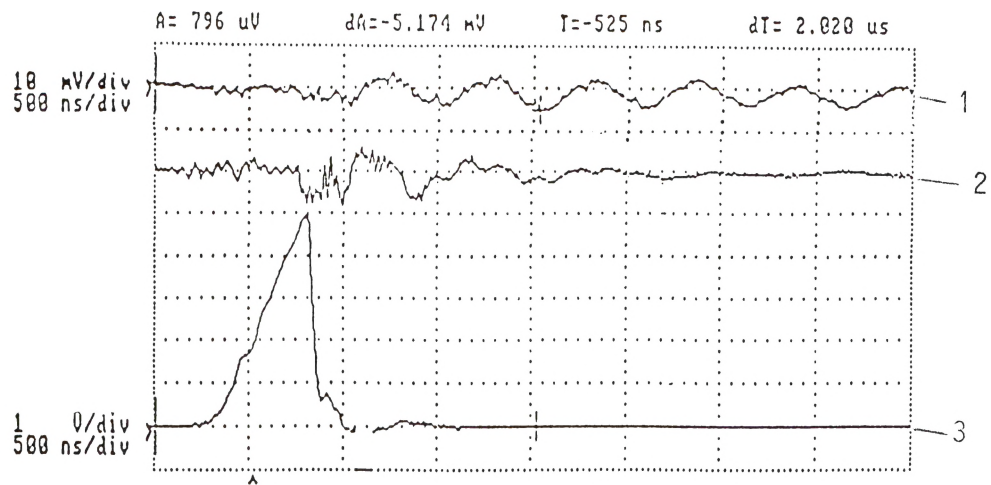


Bild 8: Elektromagnetische Beeinflussung des Niederspannungsmeßsystems bei teilerseitig kurzgeschlossenem Meßkabel

- 1: Meßkabel des Referenzteilers kurzgeschlossen und geerdet
- 2: wie 1 für Prüfling
- 3: Prüfstoß 100 kV

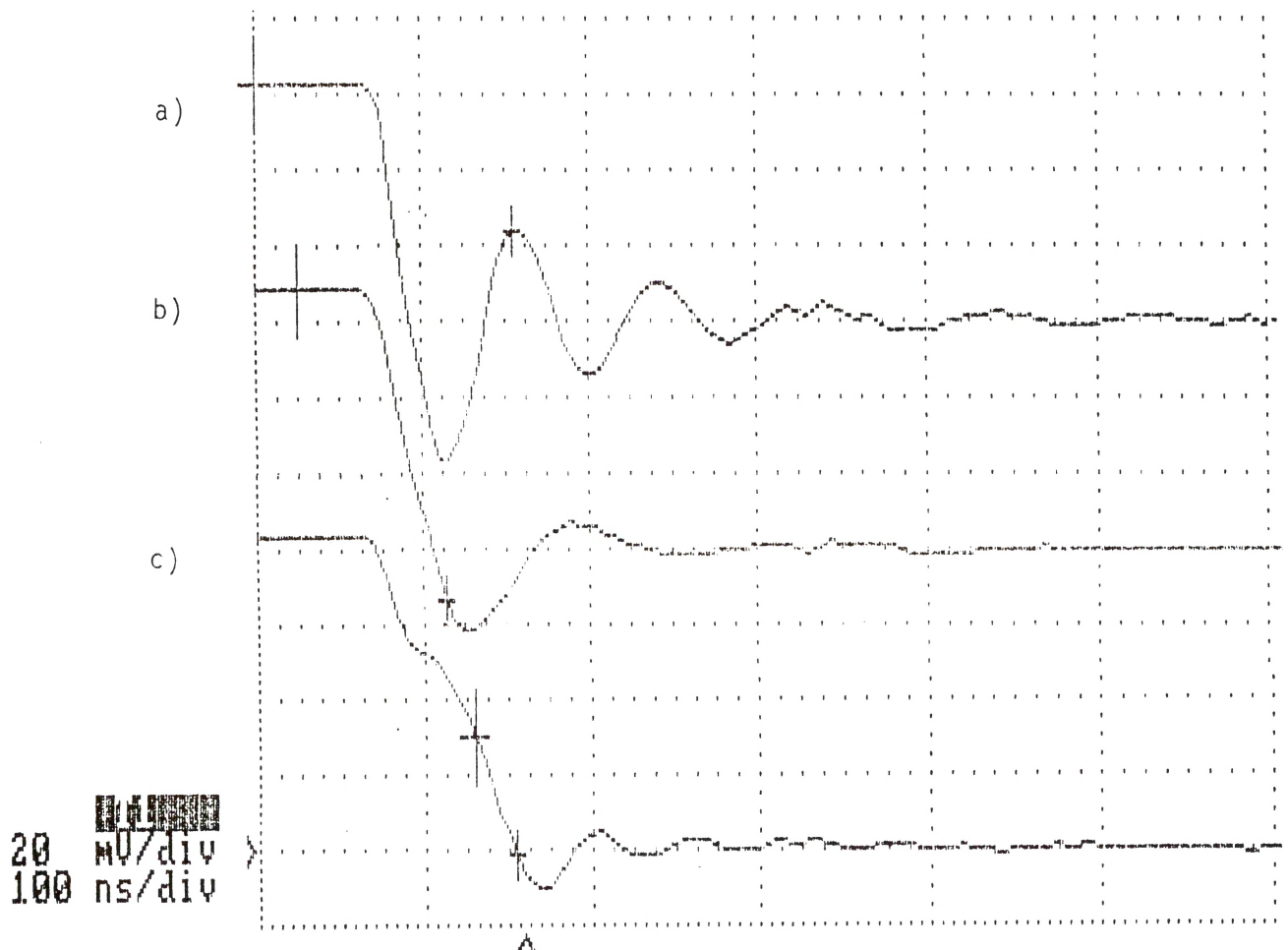


Bild 9: Sprungantworten der Teiler nach Bild 3

- a) Teiler A ohne R_d
- b) Teiler A mit R_d
- c) Teiler B

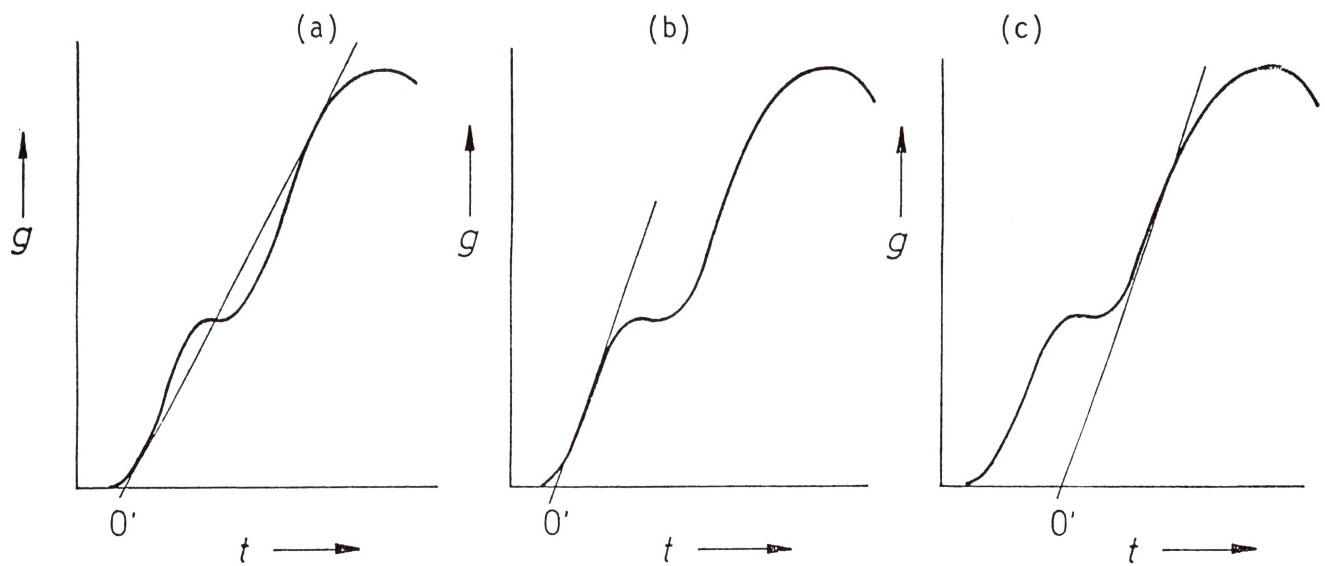


Bild 10: Mehrdeutigkeit für virtuellen Nullpunkt $0'$

- a) Mittlere Kurve durch Oszillation
- b) Tangente an ersten Teil der Stirn von $g(t)$
- c) Tangente an zweiten Teil der Stirn von $g(t)$