

Grundsätzliche Kalibrierverfahren in der Hochspannungs-Meßtechnik – eine Aufgabe der PTB

K. Schon, W. Lucas, R. Marx
Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

Einleitung

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig und Berlin ist oberste, dem Wirtschaftsministerium zugeordnete Bundesbehörde für das Meßwesen in Deutschland. Sie ist für die Darstellung, Bewahrung und Weitergabe der Einheiten des Meßwesens in Deutschland zuständig. Die PTB steht mit allen anderen metrologischen Staatsinstituten der Welt in enger Verbindung. Eine Reihe internationaler Vereinbarungen stellt sicher, daß die Meßgrößen in allen Bereichen der Industrie und des täglichen Lebens innerhalb geringer Unsicherheiten in jedem Land einheitlich gemessen werden. Es war allerdings ein jahrhundertelanger Weg bis zu dieser international erreichten Vereinheitlichung im Meßwesen.

Die Normenreihen ISO 9000 bzw. EN 29000 und EN 45000 in Verbindung mit der neuen Prüfvorschrift IEC 60-2 verlangen die Rückführung der in einem Prüflabor eingesetzten Meßmittel auf die entsprechenden nationalen (oder internationalen) Meßnormale. Diese Rückführung der Labor-Meßmittel erfolgt gewöhnlich mit Bezugs- oder Referenznormalen, die ihrerseits entweder direkt oder über weitere Bezugsnormale höherer Genauigkeit mit dem PTB-Normal höchster Genauigkeit regelmäßig verglichen werden (Hierarchie der Meßnormale). Als wichtiges Bindeglied zwischen einem Prüflabor und der PTB ist in Deutschland der Deutsche Kalibrierdienst (DKD) mit seinen inzwischen mehr als 120 akkreditierten Kalibrierlaboratorien für nahezu alle Meßgrößen tätig. Die von einem DKD-Labor für ein Meßgerät ausgestellten Kalibrierscheine werden in den meisten westeuropäischen Ländern durch Übereinkunft mit deren nationalen Kalibrierdiensten anerkannt.

Dieser Beitrag gibt an Hand einiger Beispiele einen kurzen Überblick über die Aktivitäten der PTB, um die im Hochspannungsbereich benötigten Meßnormale zu entwickeln und bereitzustellen /1/.

1 Grundsätzliche Arbeitsweise

Die Meßgrößen im Bereich Hochspannung stellen im Grunde keine besonderen Meßgrößen dar, sondern werden auf die gleichen Meßgrößen, wie sie im Niederspannungsbereich gelten, mit Hilfe von Spannungsteilern oder Wandlern zurückgeführt. Gelegentlich wurde und wird versucht, einzelne Meßgrößen direkt bei Hochspannung durch Ausnutzen bestimmter physikalischer Zusammenhänge zu realisieren. Hierbei handelt es sich meist um Vorgänge im Zusammenhang mit der Beschleunigung elektrisch geladener Teilchen durch Hochspannung. Trotz des großen experimentellen Aufwandes ist es jedoch bisher nicht zu einem für die Praxis geeigneten Verfahren mit der erforderlichen geringen Meßunsicherheit gekommen /2/.

Bei der Entwicklung eines Meßnormal und der Ausarbeitung des anzuwendenden Meßverfahrens in der PTB stehen fachbezogene Gesichtspunkte im Vordergrund. Wirtschaftliche Belange sind ebenfalls zu berücksichtigen, jedoch wird aufgrund der gesetzlichen Vorgabe das zu erreichende Ziel einer echten Kosten-Nutzen-Analyse häufig untergeordnet. Zunächst werden in der Regel umfangreiche Voruntersuchungen durchgeführt, um die Vor- und Nachteile verschiedener Lösungsmöglichkeiten auszuarbeiten. Eine entscheidende Komponente bei der Auswahl des geeignetsten Meßnormal und -verfahrens stellt die erreichbare Meßunsicherheit dar. Die ausgesuchte Lösungsmöglichkeit läßt sich in der Regel nur durch hohen personellen Aufwand realisieren. Wenn die benötigten Geräte, soweit sie kommerziell erhält-

lich sind, nicht den Genauigkeitsanforderungen genügen, werden sie in der PTB selbst entwickelt und gebaut oder in Zusammenarbeit mit geeigneten Herstellern gefertigt.

Alle Geräte werden vor ihrem Einsatz einer umfangreichen Erprobung und Kalibrierung unterworfen, um ihre Eigenschaften so genau wie möglich zu ermitteln. Der vollständig aufgebaute Meßplatz mit Meßnormal wird im praktischen Einsatz hinsichtlich der erzielbaren Gesamtunsicherheit untersucht. Alle möglichen Einflußparameter werden in ihrer Wirkung auf das Meßergebnis experimentell untersucht oder zumindest rechnerisch abgeschätzt. In den letzten Jahren wurde hierfür ein international anerkanntes, für die praktische Meßtechnik stark vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung von Meßunsicherheiten vereinbart.

Trotz des großen Aufwands und aller Sorgfalt ist die Richtigkeit des PTB-Meßnormals und -Meßverfahrens innerhalb der angegebenen Meßunsicherheit nicht zwangsläufig gewährleistet. Erst die Bestätigung in internationalen Vergleichsmessungen mit anderen kompetenten Laboratorien gibt hierüber eine ausreichende Sicherheit. Durch regelmäßige interne Rekalibrierung, langjährige Kontrolle der Meßwerte und stete Verbesserung des Meßplatzes gelingt es, die Meßunsicherheit weiter zu verringern.

Die Forderung nach Rückführung in den Qualitätssicherungsnormen bezieht sich in erster Linie auf die Gebrauchsnormale der Prüflaboratorien. Selbstverständlich wird diese Forderung auch bei Messungen im PTB-Labor selbst eingehalten. Alle Spannungsgrößen und Zeitparameter, auch die der Stoßspannung, werden auf die Einheit Volt bei Gleichspannung bzw. die Zeiteinheit bezogen. Für die meisten Hochspannungs-Meßsysteme gelten besondere Anforderungen entsprechend nationaler oder internationaler Vorschriften. Obwohl diese Vorschriften nicht direkt auf die Tätigkeiten der PTB anzuwenden sind, werden sie soweit wie möglich berücksichtigt und in den Kalibrierverfahren umgesetzt. Mitarbeiter der PTB arbeiten daher intensiv in den mit hochspannungstechnischen Fragen befaßten Gremien wie CIGRE 33.03, IEC TC 42 und DKE K 124 mit.

2 Gleichspannung

Das PTB-Labor "Hochspannung" verfügt über mehrere Spannungsquellen und Normalteiler für Gleichspannungen bis 300 kV und einen transportablen 400-kV-Teiler für auswärtige Kalibrierungen. Die Kalibrierung der PTB-Normalteiler und Rückführung der Spannungsmessung auf die Spannungseinheit erfolgt in mehreren Schritten.

Bild 1 zeigt die Meßschaltung zur Ermittlung des Nenn-Teilungsverhältnisses des Hochspannungsteilers HST bei Niederspannung. Die hochstabile Kalibrierspannung $U_1 = 1000 \text{ V}$ wird mit dem Digitalvoltmeter DVM über den genauen Referenzteiler RT gemessen. Die Ausgangsspannung des Teilers HST wird mit Hilfe des Nullvoltmeters NVM und der Kompensationspannung U_2 , die ebenfalls mit dem umschaltbaren DVM gemessen wird, ermittelt. Das Teilungsverhältnis von HST berechnet sich hieraus als Quotient U_1/U_2 . Die Messungen werden zur Mittelwertbildung mehrmals wiederholt. Für den ölisierten 300-kV-Normalteiler ergab sich so bei einer Umgebungstemperatur von 20°C ein mittleres Nenn-Teilungsverhältnis von $k_{20} = 301,0076$ mit einer Unsicherheit von $5 \cdot 10^{-6}$. Dieser Wert wird regelmäßig überprüft, insbesondere nach jeder neuen Ölfüllung des Teilers.

Die Rückführung der Messungen ist dadurch gewährleistet, daß das Digitalvoltmeter mit dem laboreigenen Spannungsnormale U_0 kalibriert wird, das wiederum mit einer Unsicherheit von $5 \cdot 10^{-7}$ an das PTB-Spannungsnormale im Labor „Spannungseinheit“ angeschlossen ist.

Das Teilungsverhältnis bei Hochspannung und die erreichbare Gesamt-Meßunsicherheit wird von einer Reihe zusätzlicher Einflußgrößen bestimmt. Die vor dem Zusammenbau des Teilers sorgfältig ausgemessenen Einzelwiderstände zeigen eine relative Spannungsabhängigkeit von weniger als $1 \cdot 10^{-5}$, wobei der Hauptanteil der Widerstandsänderung auf die mit höheren Spannungen verbundenen Temperatureffekte zurückzuführen ist. Der Temperaturkoeffizient

der Einzelwiderstände liegt innerhalb von nur $\pm 1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Aufgrund der Selbsterwärmung eines Teilers bei höheren Betriebsspannungen muß im allgemeinen mit einem Temperaturanstieg und insbesondere Temperaturgradienten längs der Widerstandssäule gerechnet werden, wodurch das Teilungsverhältnis beeinflusst werden kann. Der Temperatureinfluß auf das Teilungsverhältnis des ölsolierten 300-kV-Normalteilers wurde in zwei unabhängigen Untersuchungen ermittelt. Der Teiler wurde mit einer flexiblen Heizbandage umwickelt und auf bestimmte Temperaturen gleichmäßig erwärmt. Infolge der Ölumwälzung ist der Temperaturgradient im Teiler vernachlässigbar gering. Für jede am Teilerfuß gemessene Temperatur wurde das Teilverhältnis bei 1 kV nach Bild 1 ermittelt. Unter diesen Meßbedingungen ergab sich der Temperaturkoeffizient des Teilungsverhältnisses zu $-2,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Dieses Ergebnis wurde auch bei Hochspannung durch Vergleichsmessungen mit einem zweiten Teiler, der schon längere Zeit vor der Messung an Spannung lag und sich daher im stabilen Endzustand befand, bestätigt. Bei Hochspannungsmessungen werden daher die mit dem 300-kV-Normalteiler ermittelten Spannungswerte entsprechend der Temperatur am Teilerfuß und dem Temperaturkoeffizienten korrigiert. Teilentladungen waren bis zur Bemessungsspannung innerhalb der Auflösung von 1 pC nicht nachweisbar.

Unter Abschätzung des restlichen, nicht weiter korrigierbaren Einflusses aller Einflußgrößen beträgt die relative Gesamtunsicherheit der 300-kV-Normalmeßeinrichtung mit Nullvoltmeter und Kompensationsspannungsquelle weniger als $1 \cdot 10^{-5}$. Dieser Wert wurde im Rahmen internationaler Vergleichsmessungen mit den Staatsinstituten anderer Länder in Europa bis 100 kV bestätigt [3].

Die PTB-Normalmeßeinrichtung wird vorwiegend zur Kalibrierung von Gleichspannungs-Meßeinrichtungen, gelegentlich auch von Hochspannungs-Beschleunigeranlagen eingesetzt. Die dem Antragsteller bestätigte Gesamtunsicherheit hängt natürlich vom Kalibriergegenstand selbst und, bei auswärtigen Kalibrierungen, von der Stabilität und Welligkeit der verfügbaren Spannungsversorgung ab. Im Rahmen des DKD sind derzeit sechs Laboratorien für Gleichspannungsmessungen bis maximal 50 kV mit relativen Unsicherheiten von $1 \cdot 10^{-4}$ bis $1 \cdot 10^{-3}$ akkreditiert. Die Akkreditierung eines weiteren DKD-Labors für weit höhere Spannungen mit der nach IEC 60 erforderlichen Meßunsicherheit von 1 % für Referenzsysteme steht unmittelbar bevor.

3 Wechselfeldspannung

Im PTB-Labor "Hochspannung" können Wechselfeldspannungen bis 800 kV bei 50 Hz und bis zu einigen hundert kV bei Frequenzen zwischen $16^{2/3}$ Hz und 400 Hz erzeugt und gemessen werden. In der Hochspannungstechnik interessiert vorwiegend der Scheitelwert, der für die Isolationsfestigkeit eines Betriebsmittels der Energietechnik maßgebend ist. Im Bereich der Meßwandler für Verrechnungszwecke steht dagegen die Messung des Effektivwertes im Vordergrund.

Scheitelwerte werden heute nur noch selten mit Kugelfunkenstrecken gemessen. Bei sorgfältiger Berücksichtigung aller Einflußgrößen können damit, wie auch frühere Messungen in der PTB ergaben, reproduzierbare Messungen innerhalb von 1 % durchgeführt werden. Anlässlich der Revision von IEC 52 werden allerdings die vor mehreren Jahrzehnten international ermittelten Werte für Kugelfunkenstrecken überprüft.

Das Prinzip der PTB-Normalmeßeinrichtung für den Scheitelwert hoher Wechselfeldspannungen ist in Bild 2 wiedergegeben. Der Meßkondensator C wandelt die Hochspannung zunächst in einen proportionalen Kondensatorstrom i_c um. Entsprechend dem Meßprinzip von Chubb und Fortescue ist unter bestimmten Voraussetzungen der arithmetische Mittelwert des Kondensatorstroms \bar{i}_c dem Scheitelwert \hat{u} und der Frequenz f der Hochspannung proportional:

$$\bar{i}_c = 2fC\hat{u}. \quad (1)$$

Das vor einigen Jahren im PTB-Labor entwickelte Scheitelspannungs-Meßgerät mit elektronischem Meßumformer erfaßt i_c und f und ermittelt in mehreren Zwischenstufen den gesuchten Scheitelwert \hat{u} /4/. Der elektronische Meßumformer des Meßgerätes hat den Vorteil, daß an seinen Eingangsklemmen praktisch kein Spannungsabfall auftritt. Dadurch liegt die gesamte zu messende Spannung $u(t)$ am Kondensator C an und die Kapazität des Koaxialkabels ist ohne Einfluß. Durch die Frequenzunabhängigkeit des Meßgerätes zwischen 0 Hz und 300 Hz kann die Kalibrierung und Rückführung bei Gleichspannung mit einer Unsicherheit von $5 \cdot 10^{-5}$ erfolgen. Das Gerät wurde weiterhin mit Sinusspannungen über einen AC/DC-Transfer ebenfalls auf das PTB-Gleichspannungsnormale rückgeführt.

Als Meßkondensator stehen mehrere Druckgaskondensatoren bis 800 kV zur Verfügung. Deren grundsätzlich hervorragendes Meßverhalten wurde in umfangreichen Untersuchungen vor einigen Jahren erneut bestätigt /5, 6/. Die Kapazität im Bereich von 20 pF bis 100 pF wird regelmäßig bei Niederspannung durch Brückenvergleich mit dem laboreigenen 100-pF-Normalkondensator, der mit einer Unsicherheit von $5 \cdot 10^{-6}$ an das PTB-Normal C_{PTB} im Labor "Kapazitätseinheit" angeschlossen ist, gemessen. Diese Kalibrierung wird vor der eigentlichen Hochspannungsmessung wiederholt, so daß der Einfluß der Umgebungstemperatur und des Gasdrucks des Kondensators automatisch mitberücksichtigt wird. Die relative Gesamtunsicherheit der Kapazität der PTB-Druckgaskondensatoren beträgt weniger als $1 \cdot 10^{-5}$. In einem internationalen Ringvergleich an einem Druckgaskondensator bis 100 kV wurde diese Meßunsicherheit grundsätzlich bestätigt /7/.

Die geringe Gesamtunsicherheit der vollständigen Meßeinrichtung von weniger als $1 \cdot 10^{-4}$ kann häufig wegen der Instabilität des Hochspannungstransformators, insbesondere bei auswärtigen Kalibrierungen, nicht ausgenutzt werden. Oberschwingungen der zu messenden Wechselspannung bis zu einem Gesamtanteil von 5 %, der nach den Prüfvorschriften maximal zulässig ist, werden wegen der geringen Frequenzabhängigkeit des elektronischen Umformers bei der Scheitelwertmessung richtig erfaßt und verursachen keinen zusätzlichen Beitrag zur Gesamtunsicherheit.

4 Stoßspannung

Die Messung von Stoßspannungen ist grundsätzlich schwieriger und mit größerer Unsicherheit behaftet als Gleich- oder Wechselspannungsmessungen. Anders als bei Gleich- und Wechselspannungen kann sich das Labor "Hochspannung" bei der Rückführung von Impulsmessungen nicht auf Normale anderer PTB-Laboratorien im Niederspannungsbereich stützen. Durch Einführung der Referenzsysteme in der neuen IEC 60-2 /8/ haben sich die Anforderungen an die Meßunsicherheit zudem deutlich erhöht. Während bisher eine Meßunsicherheit von 3 % und 5 % für die Messung des Scheitelwertes von vollen bzw. abgeschnittenen Stoßspannungen ausreichend war, dürfen Referenzsysteme nur noch eine Abweichung von maximal 1 % bzw. 3 % aufweisen. Für die Weitergabe dieser Meßgröße an DKD-Laboratorien müssen sogar noch deutlich geringere Unsicherheiten erreicht werden.

Der für Stoßspannungsmessungen verwendete Normalteiler mit einer Bemessungsspannung von 500 kV ist ein im PTB-Labor gebauter gedämpft-kapazitiver Teiler vom Zaengl-Typ mit zusätzlichem Dämpfungswiderstand am Anfang der Hochspannungszuleitung /9/. Die einzelnen Komponenten des Normalteilers sind so abgeglichen, daß die experimentelle Antwortzeit der Sprungantwort den Wert Null erreicht /10/. Die Teiler Ausgangsspannung wird mit einem kalibrierten Digitalrecorder mit abgeglichenem Tastkopf aufgezeichnet und mit einer im Labor entwickelten Software ausgewertet. Die Nennauflösung und das kleinste Abtastintervall des für Blitzstoßspannungen verwendeten Digitalrecorders sind 8 Bit und 0,5 ns. Für Schaltstoßspannungen steht zusätzlich ein Recorder mit 12 Bit und 200 ns zur Verfügung.

Die Rückführung von Stoßspannungsmessungen erforderte eine Vielzahl von Kalibrierungen des Normalteilers und Digitalrecorders. Das Nenn-Teilungsverhältnis des vollständigen Normalteilers mit Dämpfungswiderstand und Meßkabel wurde mit einer 1-kHz-Wechselspannung

bei etwa 200 Volt durch Messung der Ein- und Ausgangsspannung mit einer Unsicherheit von weniger als 0,1 % ermittelt. Der Nachweis, daß das bei 1 kHz bestimmte Nenn-Teilungsverhältnis auch für Stoßspannungen, insbesondere im Zeitbereich von abgeschnittenen Blitzstoßspannungen gilt, wurde rechnerisch mit dem Faltungsintegral auf der Grundlage der experimentellen Sprungantwort $g(t)$ geführt. Für die Messung von $g(t)$ war der Teiler mit horizontaler Zuleitung und hochgestelltem Sprunggenerator versehen, einem quecksilberbenetzten Reedkontakt zum Kurzschließen der Gleichspannung von einigen hundert Volt. Länge und Neigungswinkel der Zuleitung hatten nur einen geringen Einfluß auf $g(t)$. Für diese Sprungantwort wurde die Ausgangsspannung $u_2(t)$ des Normalteilers für volle und abgeschnittene Stoßspannungen $u_1(t)$ mit einer numerischen Lösung des Faltungsintegrals

$$u_2(t) = \int_0^t u_1(\tau) \frac{dg(t-\tau)}{d\tau} d\tau \quad (2)$$

berechnet [9]. Die relativen Abweichungen des Scheitelwertes \hat{u} bzw. der Stirnzeit T_1 der berechneten Teiler-Ausgangsspannung $u_2(t)$ sind für Abschneidezeiten $T_c \geq 0,5 \mu\text{s}$ kleiner als 0,2 %. Das Teilungsverhältnis des Normalteilers kann daher im gesamten interessierenden Zeitbereich gleich dem Nenn-Teilungsverhältnis angesetzt werden. Vergleichsmessungen mit einem Hochspannungstastkopf an Impulsen von einigen kV bestätigten das Rechenergebnis.

Zum Nachweis der Linearität wurden die RC-Glieder des 20-stufigen Normalteilers zunächst einzeln mit Stoßspannungen bis zum doppelten Scheitelwert der vorgesehenen Spannungsbeanspruchung geprüft. Für den vollständigen Normalteiler wurde ein Linearitätstest mit einem ohmschen 2-MV-Teiler bis zur Bemessungsspannung von 500 kV durchgeführt. Hierbei wurde die vollständige Kurvenform aufgezeichnet, so daß nicht nur die Linearität des Scheitelwertes sondern auch die der Stirnzeit T_1 überprüft werden konnte.

Ein weiterer wichtiger Schritt bei der Rückführung von Stoßspannungsmessungen war die Kalibrierung des Digitalrecorders einschließlich Tastkopf mit Sprungspannungen, die durch Kurzschließen einer Gleichspannung von einigen hundert Volt mit einem quecksilberfilmbenetzten Reed-Kontakt erzeugt wurden. Die Gleichspannung, die der angelegten Sprungamplitude entsprach, wurde mit einem Digitalvoltmeter gemessen, das mit dem laboreigenen Bezugsnormalkalibriert und damit auf das PTB-Spannungsnormale zurückgeführt wurde. Zunächst erfolgte ein Abgleich des Tastkopfes auf die jeweilige Eingangskapazität des benutzten Recorderbereiches so, daß der aufgezeichnete Sprung nach dem Spannungskurzschluß möglichst wenig von der Nulllinie abwich. Nach dem Abgleich wurden 20 Aufzeichnungen hinsichtlich des Mittelwertes der Sprungamplitude und der Standardabweichung ausgewertet. Der Quotient aus der Gleichspannung und diesem Mittelwert ergab den Maßstabsfaktor des Digitalrecorders einschließlich Tastkopf. Diese Kalibrierung wird routinemäßig nach jedem Einschalten des Recorders wiederholt.

Weitere Untersuchungen des Digitalrecorders mit und ohne vorgeschaltetem Tastkopf wurden durchgeführt, um die Linearität der Aussteuerung und des Frequenzgangs, die Konstanz des Impuls-Maßstabsfaktors für unterschiedliche Impulsformen nach IEC 1083-1 [11] und die elektromagnetische Störfestigkeit nachzuweisen. Bild 3 zeigt Ausschnitte von den mit Gleichspannung ermittelten Quantisierungscharakteristiken des derzeit in der PTB eingesetzten 8-Bit-Recorders und von zwei 10-Bit-Recordern im Vergleich zu dem idealen treppenförmigen Verlauf eines fehlerfreien AD-Wandlers. Alle drei Recorder werden von den Herstellern für Niederspannungsmessungen vertrieben. Während der 8-Bit-Recorder nur eine geringe integrale Nichtlinearität von 0,1 % aufweist, beträgt diese für die beiden 10-Bit-Recorder 0,5 % bzw. sogar 0,8 %. Der zulässige Grenzwert von 0,5 % nach IEC 1083-1 wird somit von einem Gerät deutlich überschritten. Dies bedeutet, daß bei unterschiedlicher Aussteuerung dieses Recorders durch das Meßsignal Abweichungen in der Größe der Nichtlinearität auftreten können. Der theoretische Vorteil der höheren Auflösung des 10-Bit-Recorders geht dadurch verloren. Der 8-Bit-Recorder weist auch eine deutlich geringere dynamische differentielle Nichtli-

nearität als die beiden 10-Bit-Recorder auf (Bild 4). Der IEC-Grenzwert von $d_d = 0,8$ wird von den drei Recordern eingehalten.

Die Rückführung der Stirnzeit T_1 als wichtigstem Zeitparameter von Stoßspannungen erfolgte durch Vergleich mit dem Teilverlauf einer Sinusspannung im Zeitintervall T_x , das durch die Punkte bei 30 % und 90 % der doppelten Sinusamplitude definiert ist. Bei einer Frequenz von 295,9 kHz entspricht T_x theoretisch dem entsprechenden Wert für die Stoßspannung 1,2/50, also $T_x = T_1/1,667 = 0,72 \mu\text{s}$. Für den verwendeten 8-Bit-Recorder konnte dieser Wert innerhalb von 0,5 % für die vom Recorder aufgezeichnete Sinusspannung bestätigt werden /12/.

In mehreren internationalen Ringvergleichen mit Stoßspannungsteilern ergab sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Werten der PTB und denen der meisten anderen Laboratorien. Bild 5 zeigt das Ergebnis von Vergleichsmessungen mit zwei von der PTB zur Verfügung gestellten Teilern A und B unterschiedlicher Bemessungsspannung bei vollen und abgeschnittenen Stoßspannungen in 15 Laboratorien in Europa, Australien, Japan und China /13/. Aufgetragen sind die in diesen Laboratorien unter gleichen Bedingungen ermittelten Abweichungen des Scheitelwertes δu und der Stirnzeit δT_1 von Teiler B im Vergleich zum Referenzteiler A. Die Kreuze geben den berechneten Mittelwert aller Teilnehmerwerte an. Für die jeweilige Abschneidezeit T_c stimmen die von der PTB ermittelten δu - und δT_1 -Werte innerhalb von 0,5 % bzw. 1 % mit den entsprechenden Mittelwerten überein. Die Mittelwerte können als gute Näherung für die tatsächlichen Abweichungen von Teiler B angesehen werden, wie sie aus den Antwortparametern abgeschätzt werden können.

Im Zusammenhang mit der Ausarbeitung der zukünftigen IEC 1083-2 /11/, die die Anforderungen an die rechnergestützte Auswertung von Stoßspannungen festlegt, wurden mehrere Ringvergleiche über die in den Laboratorien verwendete Software durchgeführt. Hierzu wurden die auf Diskette gespeicherten Daten von synthetischen und gemessenen Testimpulsen in den beteiligten Laboratorien ausgewertet. Auch die mit dem IEC Test Data Generator (IEC-TDG) erzeugten Referenzimpulse wurden herangezogen. Während für die meisten glatten Kurvenverläufe die Werte der PTB und die der meisten anderen Teilnehmer innerhalb von 0,5 % für den Scheitelwert und 2 % für die Zeitparameter übereinstimmten, ergaben sich größere Abweichungen der Teilnehmerwerte immer dann, wenn die Testimpulse hochfrequente Oszillationen ($>500 \text{ kHz}$) oder kurzzeitiges Überspringen ($<1 \mu\text{s}$) aufwiesen /14/. Nach IEC 60-1 muß dann die Auswertung für die mittlere Kurve, die durch die Oszillationen bzw. Überspringen zu legen ist, erfolgen. Als Beispiel ist in Bild 6 die Auswertung des Referenzimpulses Nr. 12 von IEC-TDG wiedergegeben /15/. Der Punkt bei 30 % in der Stirn der abgeschnittenen Stoßspannung, der zur Berechnung der Stirnzeit T_1 herangezogen wird, liegt augenscheinlich auf der mittleren Kurve. Da in IEC 60-1 nicht näher festgelegt ist, wie die „mittlere Kurve“ zu bestimmen ist, kann es zu unterschiedlichen Auslegungen hierzu kommen. Die Ergebnisse aller Teilnehmer, die diese Referenzkurve ausgewertet haben, weisen daher für T_1 eine Streuung von $\pm 5 \%$ auf.

5 Impulsladung

Die Impulsladung ist die entscheidende Meßgröße bei der Kalibrierung von Meßeinrichtungen für Teilentladungen (TE). In der Prüfpraxis haben sich batteriebetriebene TE-Kalibriergeneratoren bewährt, mit denen der komplette Prüfkreis und auch das Meßgerät allein kalibriert werden. Die Ausgangsimpulse haben eine meist im Bereich 2 pC bis 5000 pC einstellbare Ladung. Anforderungen hinsichtlich der Genauigkeit von TE-Kalibratoren sind in der derzeit noch gültigen Vorschrift IEC 270 nicht enthalten, werden aber mit Sicherheit in die revidierte Fassung aufgenommen.

Bild 7 zeigt die in der PTB verwendete Meßschaltung zur Überprüfung der Impulsladung von Kalibriergeneratoren. Der Impuls ruft am Meßwiderstand $R_m = 50 \Omega$ den Spannungsabfall $u(t)$ hervor, der von dem auch für Stoßspannungsmessungen verwendeten 8-Bit-Digitalrecorder

mit einer Abtastrate bis zu $2 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}$ aufgezeichnet wird. Aus dem zeitlichen Verlauf wird durch numerische Integration die Ladung

$$q = \frac{1}{R_m} \int_0^{\infty} u \, dt \quad (3)$$

ermittelt. Diese Meßschaltung ist im Prinzip relativ einfach und mit den heute verfügbaren Digitalrecordern mit hoher Abtastrate und ausreichend großer Speichertiefe leicht zu realisieren. Die erreichbare Meßunsicherheit muß jedoch sorgfältig abgeschätzt werden.

Die Kalibrierung des Recorders selbst erfolgt mit Ladungsimpulsen, die mit der Sprungspannung U_0 und dem Kondensator C_0 erzeugt werden /16/. Die Sprungspannung wird durch Kurzschließen einer genau bekannten Gleichspannung U_0 mit einem quecksilberbenetzten Reed-Kontakt erzeugt. U_0 und C_0 werden mit geringer Unsicherheit gemessen und auf die laboreigenen Meßnormale für die Spannung und die Kapazität rückgeführt. Eine berechenbare Kalibrierladung

$$q_0 = C_0 \cdot U_0 \quad (4)$$

wird so in den Meßwiderstand R_m eingespeist. Mit dieser Kalibrierung wird gleichzeitig die Software zur Berechnung der Impulsladung überprüft. Die Gesamtunsicherheit der Ladungsmessung ergibt sich zu $\pm(0,5 \text{ pC} + 0,03 \text{ q})$.

Als Beispiel zeigt Bild 8a den zeitlichen Verlauf des Ladungsimpulses eines TE-Kalibrators. Darüberhinaus wird auch das Spektrum des Impulses ermittelt (Bild 8b). Hierbei interessiert die Grenzfrequenz, bis zu der die Amplitudendichte annähernd konstant ist, z. B. 1 MHz in Bild 8b. Der Kalibrator sollte somit nur zur Kalibrierung von TE-Meßgeräten mit einer Mittenfrequenz bzw. oberen Bandgrenze von maximal 1 MHz verwendet werden. Das Spektrum läßt sich schnell und bequem mit kommerzieller Software aus den Daten des Ladungsimpulses berechnen. Dieses Verfahren ist einfacher als das nach IEC 270, bei dem die Anstiegszeit des für die Impulserzeugung verwendeten Rechteckimpulses gemessen werden soll, der allerdings bei den meisten TE-Kalibratoren der Messung nicht direkt zugänglich ist.

6 Abschätzen von Meßunsicherheiten

Jeder Meßwert wird grundsätzlich mit einer gewissen Unsicherheit ermittelt. Die Meßunsicherheit kennzeichnet den Bereich, innerhalb dessen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit der wahre Wert der Meßgröße liegt. Die Angabe eines Meßwertes ist daher nur mit der zugehörigen Meßunsicherheit als vollständiges Meßergebnis ausreichend, also z.B.:

$$\hat{U} = (667 \pm 20) \text{ kV} \text{ bzw. } \hat{U} = 667 (1 \pm 0,03) \text{ kV}$$

in Relativschreibweise. Zur Abschätzung von Meßunsicherheiten hat man sich vor einigen Jahren auf eine einheitliche Vorgehensweise für den Bereich der westeuropäischen Kalibrierlaboratorien im WECC geeinigt /17/. Dies ist auch die Grundlage des zukünftigen Anhangs zu IEC 60 bei der Abschätzung von Meßunsicherheiten im Hochspannungsbereich /18/.

In der Meßtechnik gelten folgende Grundsätze:

- die Messung soll sorgfältig und möglichst genau durchgeführt werden
- der Meßwert ist für die bekannten systematischen Abweichungen zu korrigieren
- die Meßunsicherheit aufgrund nicht genau bekannter Einflußgrößen ist abzuschätzen.

Bei der Meßunsicherheit unterscheidet man zwei Anteile, die gemeinhin als zufällig und systematisch bekannt sind. Da eine strenge Abgrenzung der beiden Anteile häufig nicht möglich ist, werden sie entsprechend neuerer Vorschläge als Typ A und Typ B benannt. Vom Typ A ist der Anteil der Meßunsicherheit, der sich aus der statistischen Auswertung einer Serie von Einzelmessungen ergibt. Mit Typ B werden alle anderen Anteile bezeichnet, die nicht durch statistische Auswertung ermittelt werden. Inwieweit diese Begriffe in Zukunft in den nationalen und internationalen Vorschriften übernommen werden, bleibt abzuwarten.

6.1 Meßunsicherheit Typ A (statistischer Anteil)

Der Meßwert wird häufig aus einer Meßreihe unter Wiederholbedingungen gewonnen. Bei n unabhängigen Einzelmessungen ist der Schätzwert für den wahren Wert der Meßgröße durch den arithmetischen Mittelwert \bar{x} der Einzelmeßwerte x_i gegeben:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (5)$$

Der Schätzwert für die Standardabweichung der Einzelmessung ist:

$$s_r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (6)$$

Für die Normalverteilung nach Gauß sind \bar{x} und s_r in Bild 9a eingetragen. Hieraus ergibt sich die Meßunsicherheit Anteil A unter der Voraussetzung $n \geq 10$ zu:

$$u_r = k \frac{s_r}{\sqrt{n}} = k \bar{s}_r. \quad (7)$$

Innerhalb des Bereichs der WECC wurde der Wert $k = 2$ vereinbart. Für eine Normalverteilung nach Gauß entspricht dies einem Vertrauensniveau von rund 95 %. Bei älteren Meßergebnissen wurde noch häufig $k=1$ entsprechend einem Vertrauensniveau von nur 68,3 % verwendet. Der Ausdruck $\bar{s}_r^2 = s_r^2/n$ ist die empirische Varianz des Mittelwertes.

Liegen nur wenige Einzelmessungen vor ($n < 10$), dann ist der Faktor k in Gl. 10 durch den Student-Faktor t für ein Vertrauensniveau von 95 % zu ersetzen (Tab.1).

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	100	∞
t	12,7	4,3	3,18	2,78	2,57	2,45	2,37	2,31	2,26	2,09	1,98	1,96

Tabelle 1: Student-Faktor t für ein Vertrauensniveau von 95 % bei n Einzelmessungen

6.2 Meßunsicherheit Typ B

Jeder Meßwert ist im allgemeinen verschiedenen Einflußgrößen unterworfen. Bei bekannter Abhängigkeit, z. B. infolge der Umgebungstemperatur, ist der Einfluß auf den Meßwert so weit wie möglich mit Hilfe des Temperaturkoeffizienten rechnerisch zu korrigieren. Ein noch verbleibender Einfluß sollte abgeschätzt und bei der Meßunsicherheit vom Typ B mitberücksichtigt werden. So ist die Temperatur eines Hochspannungsgerätes wegen der großen Abmessungen nicht eindeutig festgelegt, und der Temperatureinfluß kann trotz bekannter Abhängigkeit, die unter Idealbedingungen ermittelt worden ist, nur näherungsweise korrigiert werden. Häufig können für die Werte einer Einflußgröße nur obere und untere Grenzen a_o bzw. a_u abgeschätzt oder als Fehlergrenzen eines Meßgerätes den Datenblättern entnommen werden. Für die Einzelwerte wird dann, wenn nichts anderes bekannt ist, eine Rechteckverteilung angenommen (Bild 9b). Hierfür ergibt sich der Mittelwert:

$$\bar{x} = \frac{1}{2}(a_o + a_u) \quad (8)$$

und die Varianz:

$$s_s^2 = \frac{1}{12}(a_o - a_u)^2 = \frac{1}{3}a^2 \quad (9)$$

unter der Annahme $2a = a_o - a_u$. Entsprechend lassen sich die Varianzen aller sonstigen unkorrelierten Einflußgrößen durch Addition zur Gesamtvarianz abschätzen:

$$s_s^2 = s_{s1}^2 + s_{s2}^2 + s_{s3}^2 + \dots = \frac{1}{3}(a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + \dots). \quad (10)$$

Ist für ein einzelnes Meßgerät als Teil eines vollständigen Meßsystems bereits die Unsicherheit u_{m1} (Anteile A und B) bekannt, z.B. durch Angabe im Kalibrierschein eines DKD-Labors, dann wird daraus zunächst die Wurzel der Varianz

$$s_{sm} = \frac{u_{m1}}{k_1} \quad (11)$$

mit dem entsprechenden Wert k_1 (= 2 bzw. = 1 bei älteren Meßergebnissen) berechnet. Weitere bekannte Meßunsicherheiten anderer Geräte werden in Analogie zu Gl. 12 durch Addition der Varianzen addiert.

Die Meßunsicherheit Anteil B ergibt sich als Wurzel der Summe der Varianzen, multipliziert mit k , zu:

$$u_s = k\sqrt{s_s^2 + s_{sm}^2} = k\sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \frac{a_3^2}{3} + \dots + \left(\frac{u_{m1}}{k_1}\right)^2 + \left(\frac{u_{m2}}{k_2}\right)^2 + \left(\frac{u_{m3}}{k_3}\right)^2 + \dots} \quad (12)$$

6.3 Gesamt-Meßunsicherheit

Die Gesamt-Meßunsicherheit u der Anteile A und B berechnet sich schließlich für $n \geq 10$ zu:

$$u = \sqrt{u_r^2 + u_s^2} = k \cdot s = k\sqrt{\frac{s_r^2}{n} + s_s^2 + s_{sm}^2}. \quad (13)$$

Für $n < 10$ kann der Faktor $k = 2$ nicht mehr vor die Wurzel gezogen werden, sondern der erste Term unter der Wurzel (Anteil A) ist mit t^2 entsprechend Tabelle 1 zu multiplizieren.

6.4 Beispiel

Bei der Prüfung eines Hochspannungsgerätes mit Gleichspannung wurden $n = 10$ Wiederholungsmessungen durchgeführt. Die Temperatur in der ungeheizten Prüfhalle betrug 10°C . Als Mittelwert der gemessenen Spannungen nach Gl. 5 und experimentelle Standardabweichung nach Gl. 6 ergaben sich $\bar{x} = 226,5 \text{ kV}$ und $s_r = 2,5 \text{ kV}$.

Das am Teiler Ausgang angeschlossene Digitalvoltmeter wurde kürzlich in einem DKD-Labor mit Gleichspannung kalibriert und hat laut Kalibrierschein eine relative Meßunsicherheit von 0,5 % bei 20°C . Entsprechend den Herstellerangaben kann das Digitalvoltmeter im Bereich von 5°C bis 35°C ohne Einschränkung der Meßunsicherheit verwendet werden. Ebenso be-

einflussen Oberschwingungen der Gleichspannung bis 10 kHz nicht die Messung des arithmetischen Mittelwertes. Der verwendete 300-kV-Spannungsteiler erfüllt die Anforderungen von IEC 60-2. Sein Nenn-Teilungsverhältnis wurde aus Widerstandsmessungen bei 20 °C ermittelt. Der Temperaturkoeffizient des Teilungsverhältnisses ist mit $+3 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ angegeben. Entsprechend früherer Messungen ist bekannt, daß sich das Teilungsverhältnis nach längerer Betriebszeit bei Hochspannung um bis zu 0,8 % ändert.

Vor Aufstellen des Meßunsicherheits-Budgets ist zunächst der Einfluß der Temperatur auf den Meßwert zu berücksichtigen. Der Teiler mißt bei 10 °C die Gleichspannung um $3 \cdot 10^{-3}$ zu niedrig; der korrigierte Spannungsmittelwert ist daher $\bar{x} = 226,5(1 + 3 \cdot 10^{-3}) \text{ kV} = 227,2 \text{ kV}$.

Meßunsicherheits-Budget:

Meßsystem ($s_r = 2,5 \text{ kV}$):	$\bar{s}_r = 0,8 \text{ kV}$	$\rightarrow \bar{s}_r^2 = 0,62 \text{ (kV)}^2$
DVM ($u_{sm} = 0,5 \text{ \%}$):	$s_{sm} = 1,2 \text{ kV}$	$\rightarrow s_{sm}^2 = 1,29 \text{ (kV)}^2$
Teiler ($a = 0,8 \text{ \%}$):		$\rightarrow s_s^2 = 3,30 \text{ (kV)}^2$
Summe der Varianzen:		$\Sigma s^2 = 5,2 \text{ (kV)}^2$
Gesamt-Meßunsicherheit für $k=2$:		$u = ks = 4,6 \text{ kV}$

Das vollständige Meßergebnis für die Spannung lautet somit:

$$(227,2 \pm 4,6) \text{ kV} \quad \text{bzw.} \quad 227,2 (1 \pm 0,02) \text{ kV.}$$

Schlußfolgerungen

Grundsätzlich ist jede Meßgröße bei Hochspannung auf die bei Niederspannung bewahrten Einheiten rückführbar. In der PTB stehen für nahezu alle Meßgrößen im Hochspannungsbereich die entsprechenden nationalen Meßnormale zur Verfügung. In 1995 wird ein weiterer Meßplatz für Stoßströme zur Kalibrierung von Stoßstromshunts aufgebaut. Eine Reihe von Meßgrößen wurde innerhalb der angegebenen Meßunsicherheiten in internationalen Ringvergleichen bestätigt. Während Gleich- und Wechselgrößen bei Hochspannung in der PTB weit- aus genauer als erforderlich gemessen werden können, beträgt die Meßunsicherheit für die Parameter von Stoßspannungen derzeit günstigenfalls nur ein Drittel der Werte, wie sie in der neuen IEC 60-2 für Referenzsysteme gefordert werden. Die Weitergabe der Hochspannungs-Meßgrößen an die industriellen Prüflaboratorien erfolgt zunehmend über die dafür akkreditierten DKD-Kalibrierlaboratorien.

Literatur

- /1/ Schon, K.: Zur Rückführbarkeit von Hochspannungsmessungen. PTB-Bericht zum Hochspannungstechnischen Kolloquium, PTB-E-49, Braunschweig, 1994
- /2/ Lucas, W.: Untersuchungen zur Eignung supraleitender Hohlraumresonatoren als Geschwindigkeitsfilter für durch Hochspannung beschleunigte Elektronen. Diss. TU Braunschweig, 1990
- /3/ Marx, R.; Schon, K.: Internationale Vergleichsmessungen an einem Gleichspannungsteiler bis 100 kV. PTB-Mitt. 96 (1986), S. 165 - 168
- /4/ Marx, R.; Zirpel, R.: Präzisions-Meßeinrichtung zur Messung hoher Wechsel- und Gleichspannungen. PTB-Mitt. 100 (1990) Nr. 2, S. 119 - 123
- /5/ Latzel, H.-G.: Über den Einfluß von Spannung und Frequenz auf die Kapazität von Hochspannungs-Druckgaskondensatoren. Diss. TU Braunschweig, 1988
- /6/ Latzel, H.-G.; Schon, K.: Precise capacitance measurements of high-voltage compressed gas capacitors. IEEE Trans. Instr. Meas. IM-36 (1987), S. 381 - 384
- /7/ Latzel, H.-G.; Schon, K.: Internationale Vergleichsmessungen von Kapazität und Verlustfaktor bei Hochspannung. PTB-Mitt. 99 (1989), S. 227 - 234
- /8/ IEC 60: High voltage test technique. Part 1: General definitions and test requirements, 1989. Part 2: Measuring systems, 1995
- /9/ Kind, D.; Schon, K.; Schulte, R.: The calibration of standard impulse dividers. Proc. 6. ISH, New Orleans 1989, Beitrag 41.10
- /10/ Arndt, V.; Schon, K.: On the uncertainty of the new IEC response parameters. Proc. 8. ISH, Yokohama 1993, Beitrag Nr. 51.02
- /11/ IEC 1083: Digital recorders for measurements in high-voltage impulse tests
Part 1: Requirements for digital recorders, 1993
Part 2: Evaluation of software used for the determination of the parameters of impulse waveforms
- /12/ Beyer, M.; Schon, K.: Calibration of digital recorders for hv impulse measurement. Proc. 7. ISH, Dresden 1991, Beitrag 62.02
- /13/ Schon, K.; Lucas, W.: Worldwide interlaboratory test comparisons of high voltage impulse dividers. Proc. 2nd ERA Conference on High Voltage Measurements and Calibration, Arnhem 1994, S. 3.1.1-3.1.9
- /14/ Schon, K.: Reference impulses for testing software - IEC 1083-2. Proc. 2nd ERA Conference on High Voltage Measurements and Calibration, Arnhem 1994, S. 3.2.1-3.2.7
- /15/ Schon, K. et al.: IEC Test Data Generator for testing software used to evaluate the parameters of hv impulses. Beitrag eingereicht zum 9. ISH, Graz 1995
- /16/ Schon, K.: Das Konzept der Impulsladungsmessung bei Teilentladungsprüfungen. etzArchiv 8 (1986), S. 319 - 324
- /17/ Ermittlung von Meßunsicherheiten. WECC Doc. 19-1990 in: DKD-3, Braunschweig, 1990
- /18/ IEC-Schriftstück 42/115/CDV. Amendment to IEC 60-2 (1994), Annex H: Procedure for estimating uncertainty in hv measurements.

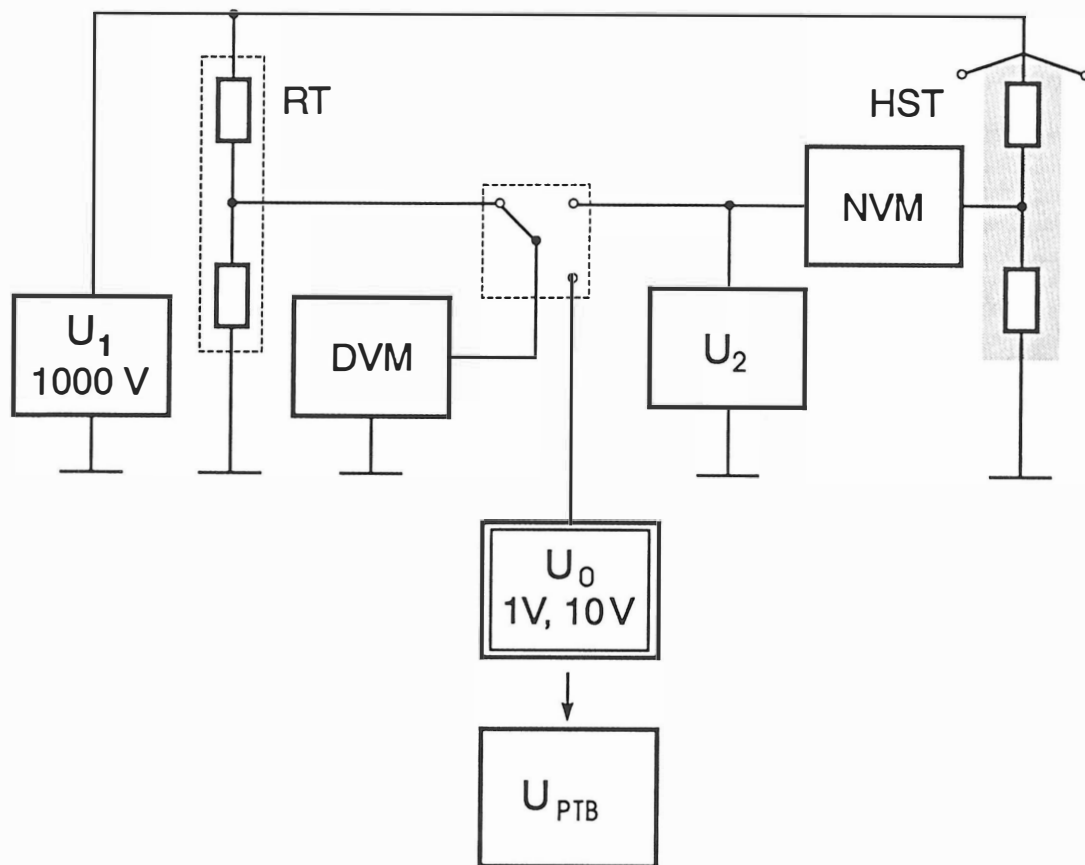


Bild 1 Meßschaltung zur Kalibrierung von Gleichspannungsteilern bei 1 kV

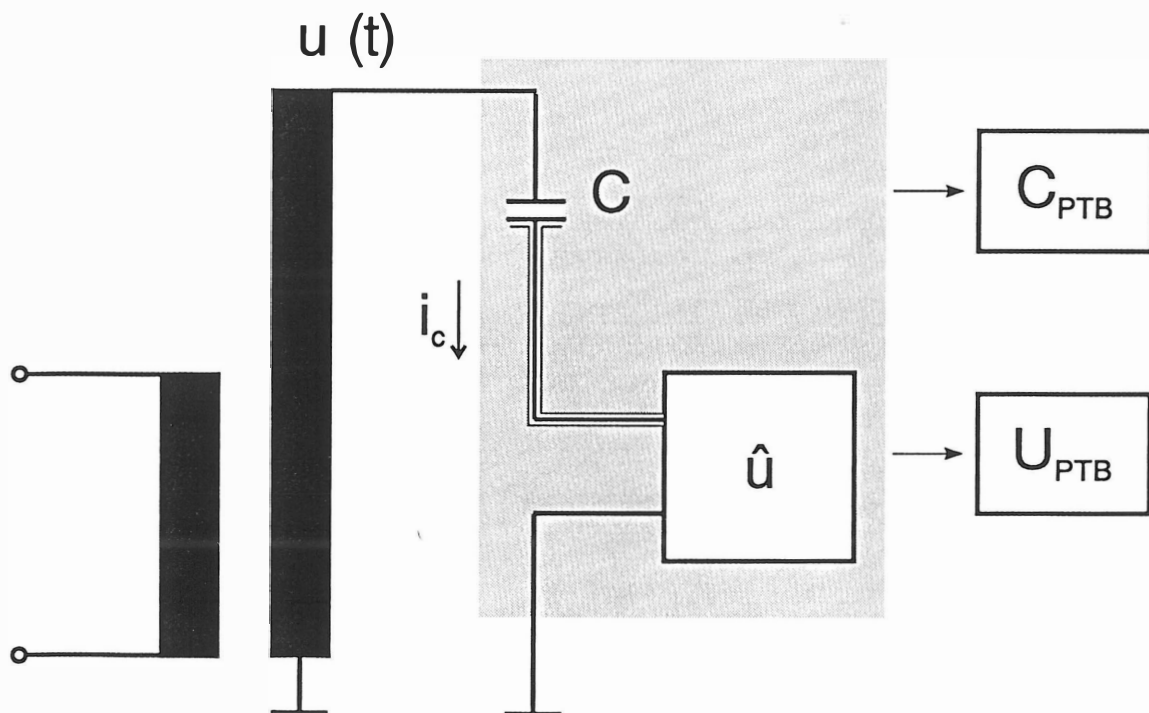


Bild 2 Normalmeßeinrichtung für den Scheitelwert hoher Wechselspannungen

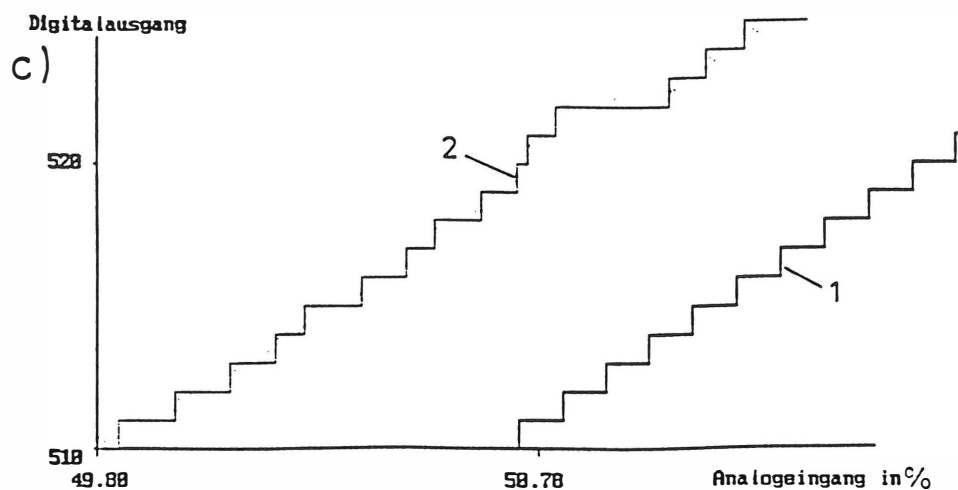
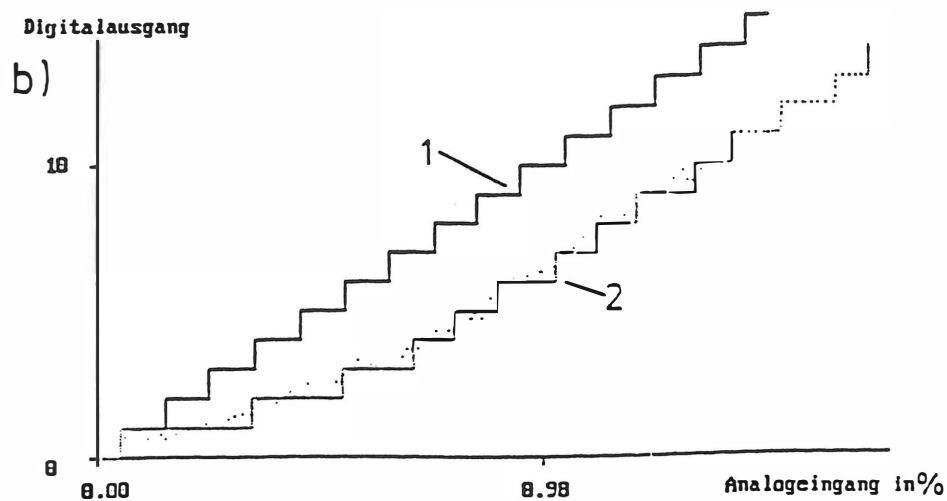
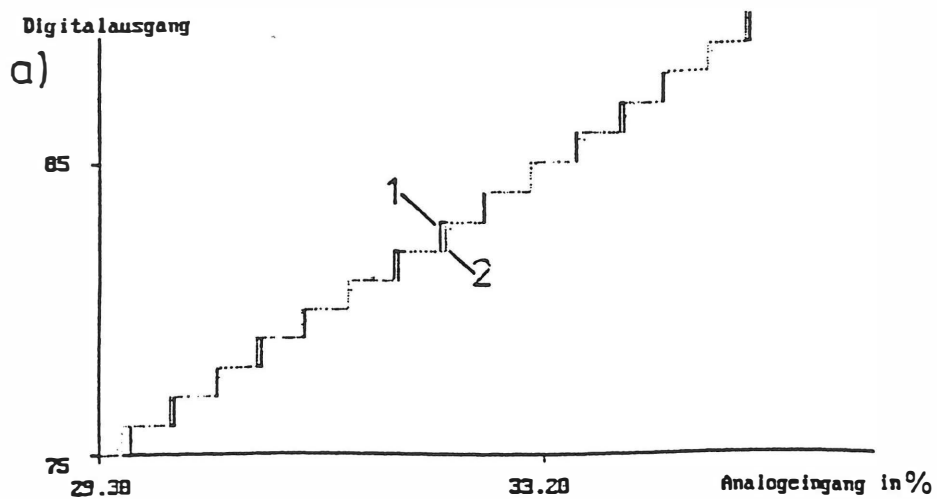


Bild 3 Quantisierungscharakteristik (Auszug) und statische integrale Nichtlinearität s von drei Digitalrecordern

- a) Recorder A (8 Bit), $s = 0,1 \%$
- b) Recorder B (10 Bit), $s = 0,5 \%$
- c) Recorder C (10 Bit), $s = 0,8 \%$

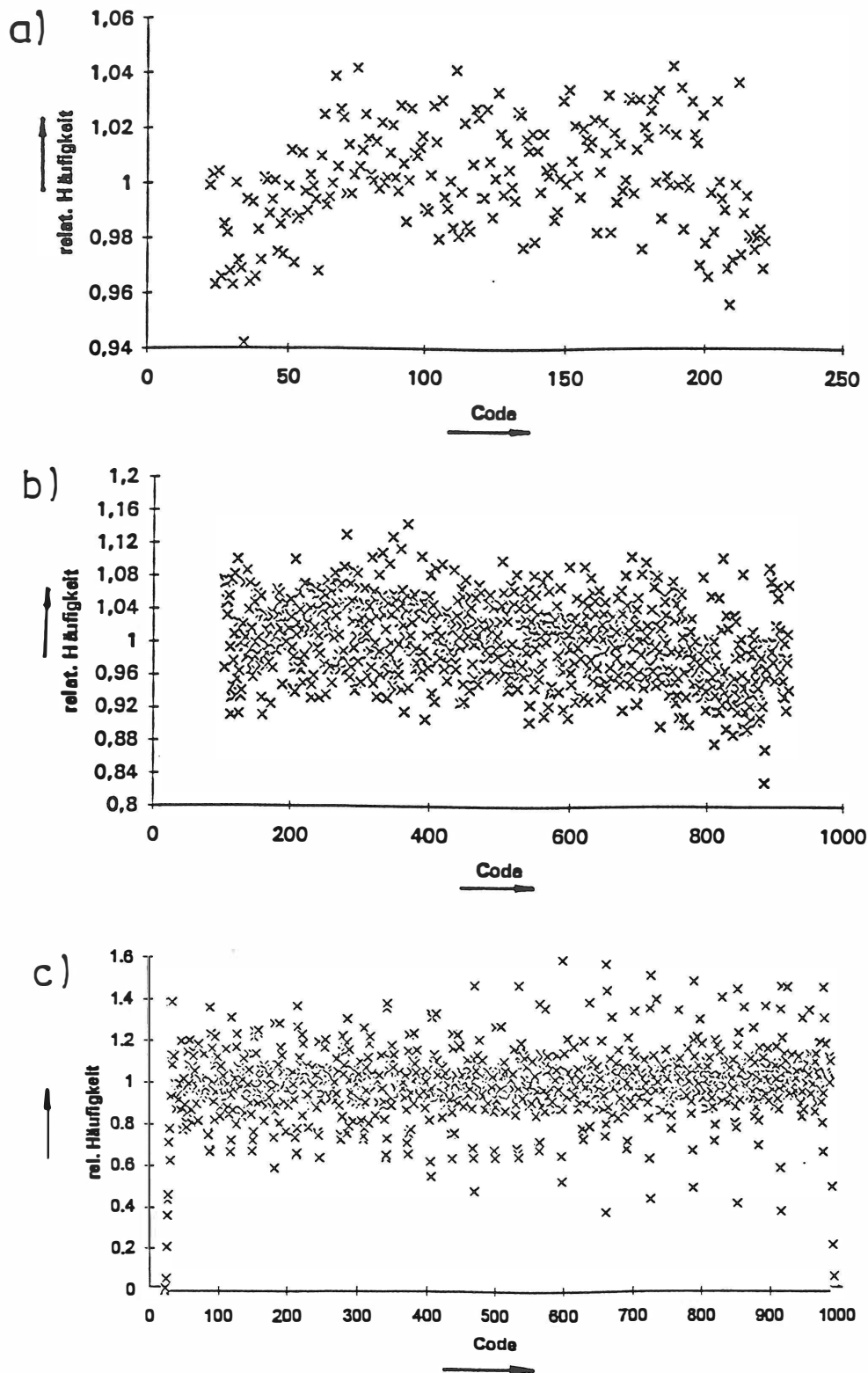


Bild 4 Häufigkeitsverteilung der Quantisierungsstufen für Dreieckssignale und dynamische differentielle Nichtlinearität d_d

- a) Recorder A (8 Bit), $d_d = 0,06$
- b) Recorder B (10 Bit), $d_d = 0,15$
- c) Recorder C (10 Bit), $d_d = 0,65$

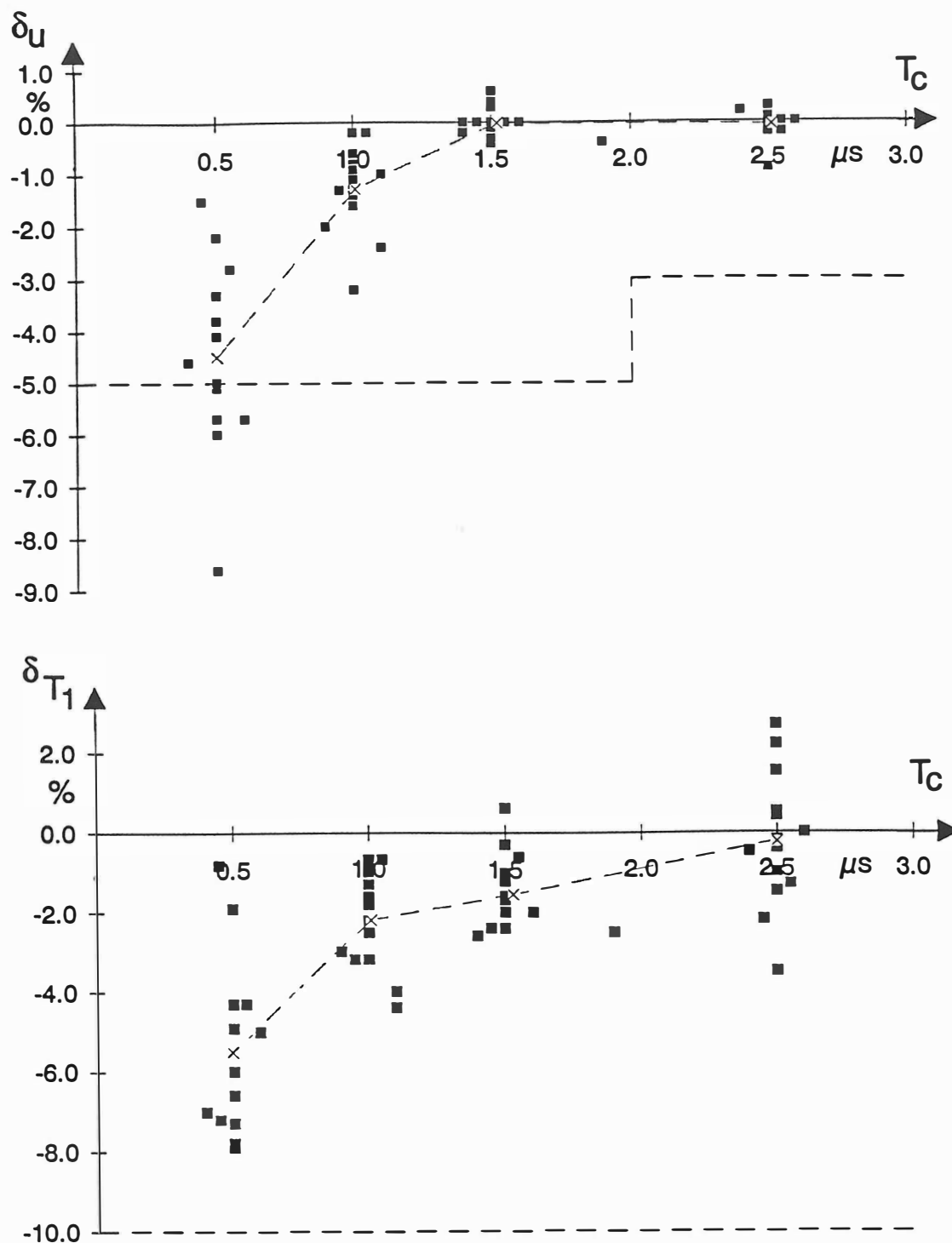


Bild 5 Vergleichsmessung von Teiler B mit Referenzteiler A bei vollen und abgeschnittenen Stoßspannungen (Ergebnisse eines Ringvergleichs)

- a) Abweichung der Scheitelwerte
- b) Abweichung der Stirnzeiten

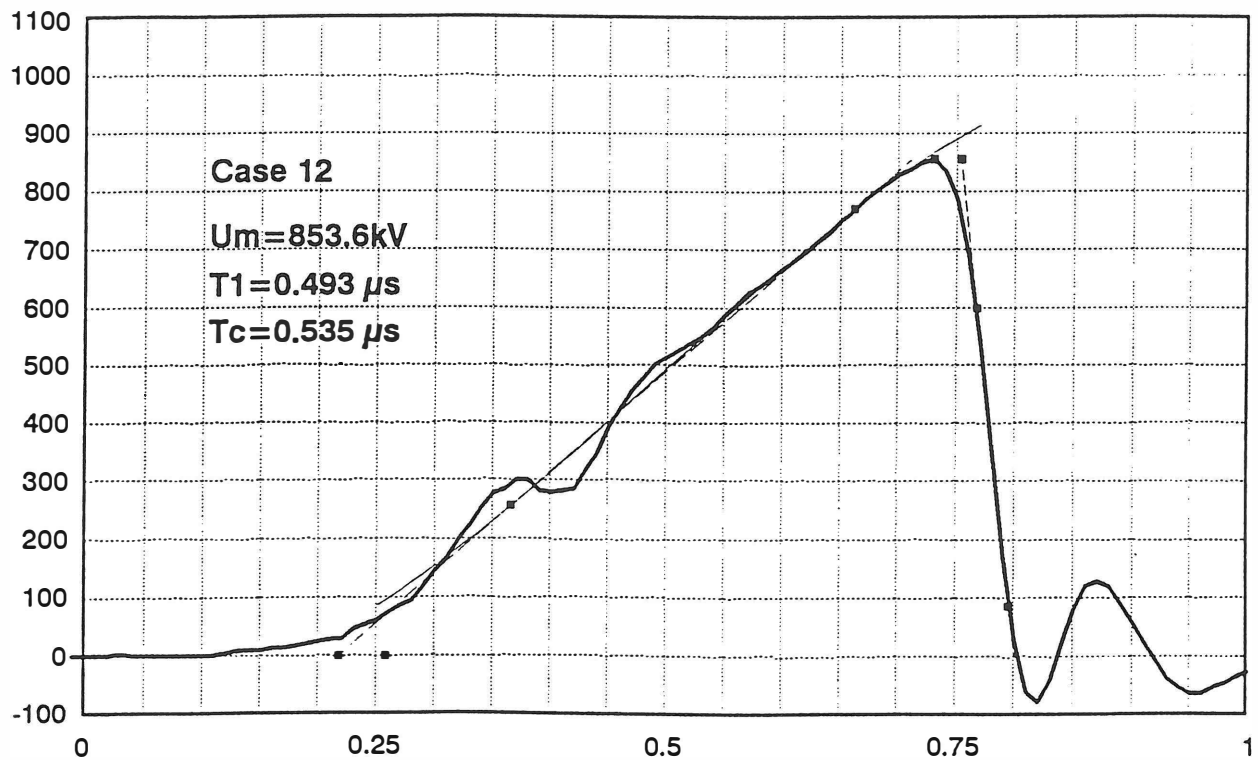


Bild 6 Auswertung der Stirnzeit einer abgeschnittenen Blitzstoßspannung mit Oszillation in der Front

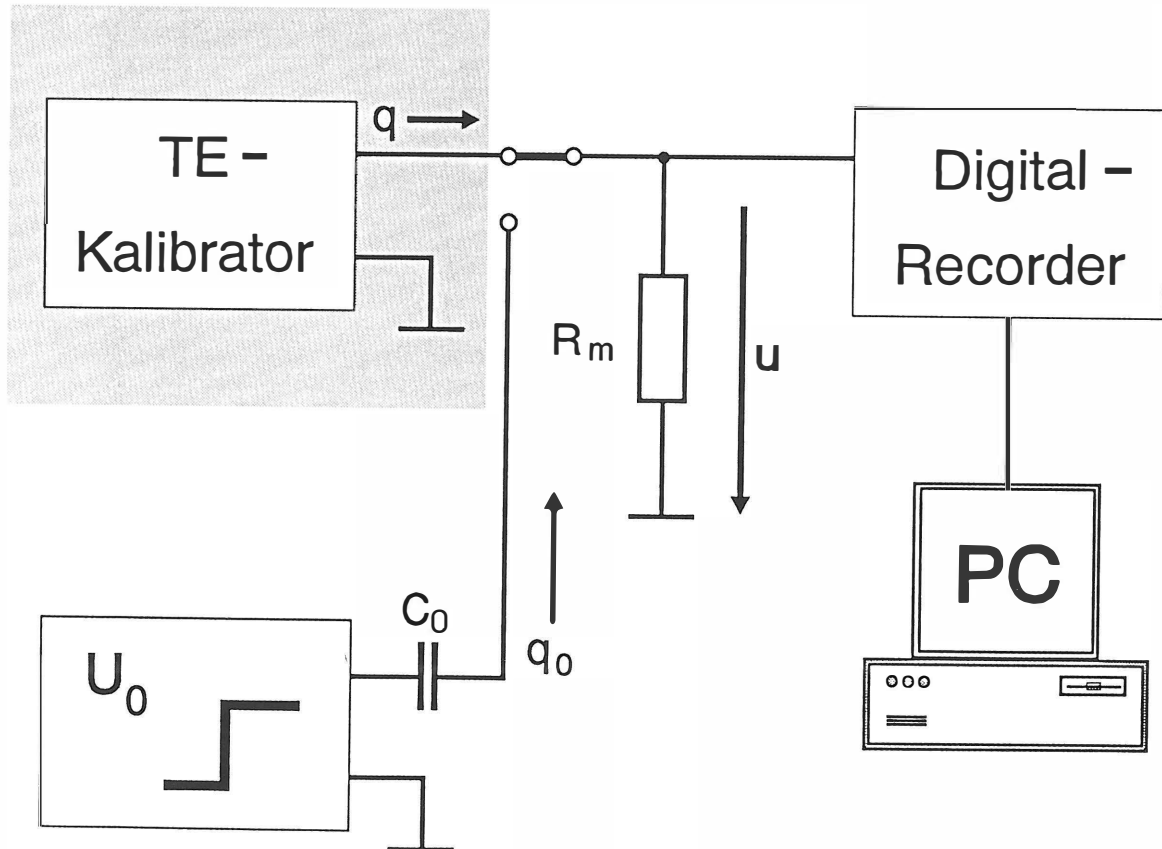


Bild 7 Meßschaltung zur Kalibrierung der Ladung von Impulseneratoren

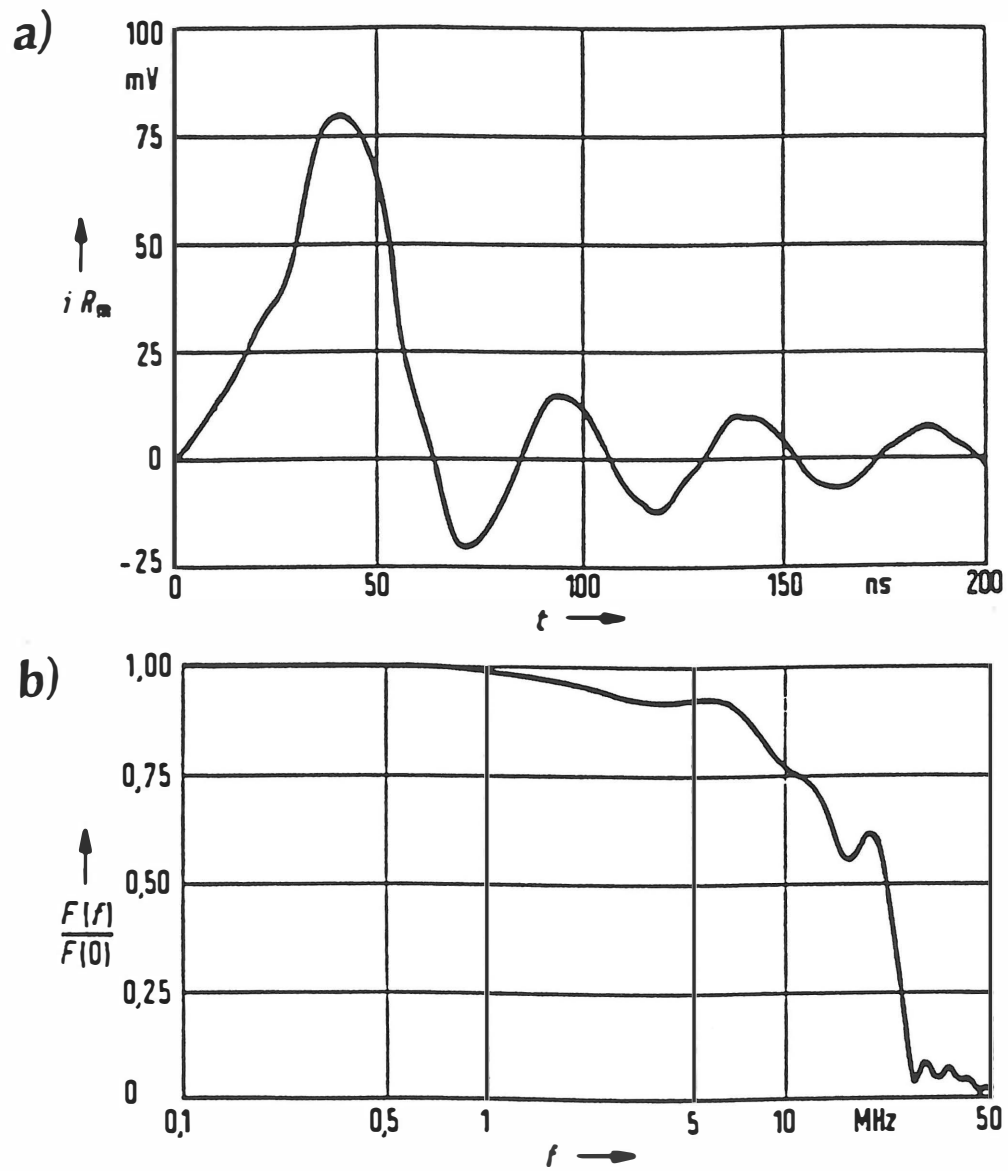


Bild 8 Zeitverlauf und Spektrum eines Kalibrierimpulses mit der Ladung q

- b) Zeitverlauf
- c) Spektrum

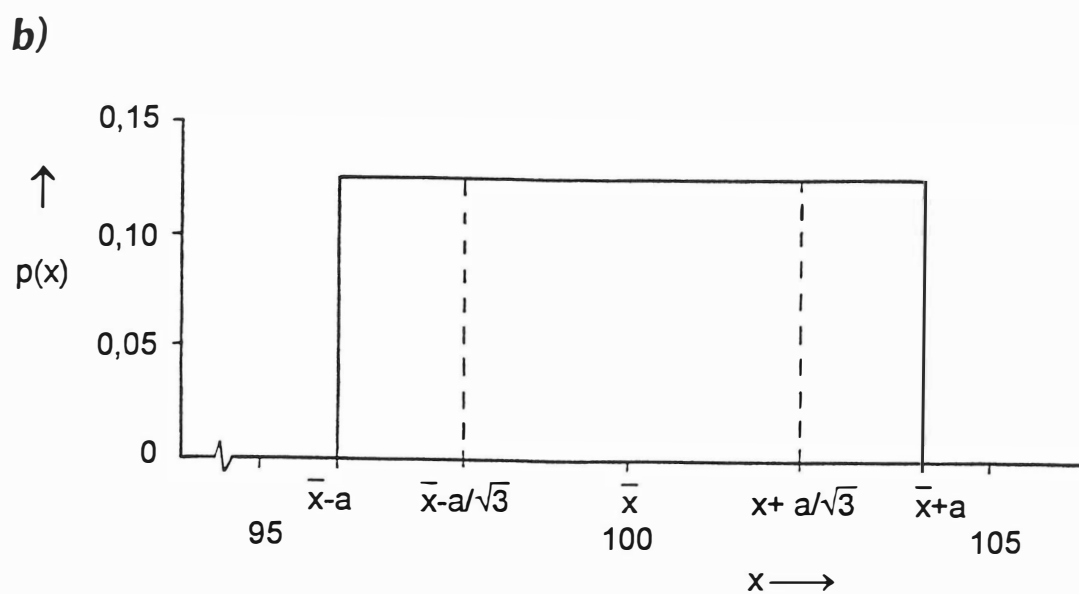
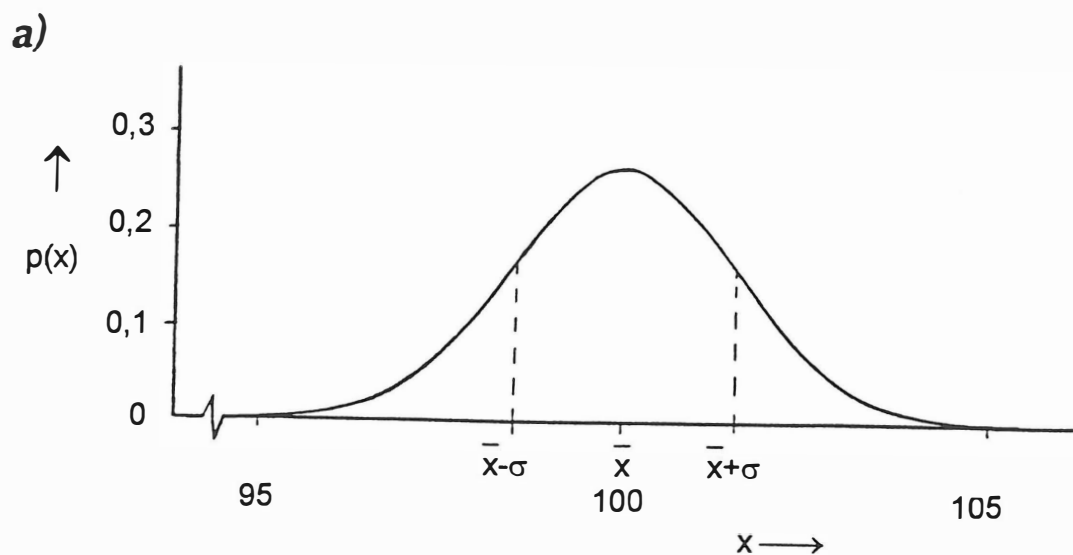


Bild 9 Verteilungskurven von Meßwerten

- a) Gaußsche Normalverteilung
- b) Rechteckverteilung