

## Einsatz der Feldmeßsonde zur Kontrolle der Impulsform

E. Gockenbach

### 1. Einleitung

Die Revision der IEC Publ. 60 Teil 3 und 4 wird erhebliche Änderungen in der Beschreibung und der Kontrolle der Meßeinrichtungen aufweisen. Neben der bereits vorhandenen Methode der Rechtecksprungantwort zur Beurteilung des Übertragungsverhaltens wird die Vergleichsmessung eingefügt, bei der mit Hilfe eines kalibrierten Vergleichsmeßsystemes das Übersetzungsverhältnis und das Übertragungsverhalten bestimmt werden können. Diese vergleichende Messung darf nur unter Kontrolle von qualifizierten Institutionen, den "accredited laboratories", ausgeführt werden. Das kalibrierte Meßsystem wird dann als "approved measuring system" bezeichnet. Der Grundgedanke dieses Kalibrierverfahrens liegt darin, daß einerseits ein verfolgbarer Weg der Kalibrierung von der obersten Eichbehörde bis zum Benutzer erkennbar ist und andererseits bei der Kalibrierung eine gewisse technische Qualifikation erforderlich ist. Weiterhin soll durch die regelmässige Kontrolle der Kalibrierung der Einsatz von fehlerhaften Meßeinrichtungen verhindert und damit die Qualität der Prüfung erhöht werden. Die Messung von impulsförmigen Größen wie Blitzstoß-, Schaltstoßspannung oder Blitzstrom stellt dabei eine besondere Schwierigkeit dar, da die Vergleichsmessungen im allgemeinen bei kleinerem Spannungspegel gemacht werden müssen und der Einfluß des Prüfkreises auf die Prüfung, d.h. die Kalibrierung, beachtet werden muß. Die Feldmeßsonde mit ihrer potentialfreien Übertragung des Meßsignales eignet sich daher besonders gut für die Kalibrierung des Übertragungsverhaltens, da die Messungen ohne Veränderung des zu kalibrierenden Hochspannungmeßkreises erfolgen können und der Frequenzbereich des Feldmeßsystemes weit über dem standardmässigen Stoßspannungsteiler liegt.

## 2. Aufbau der Feldmeßsonde

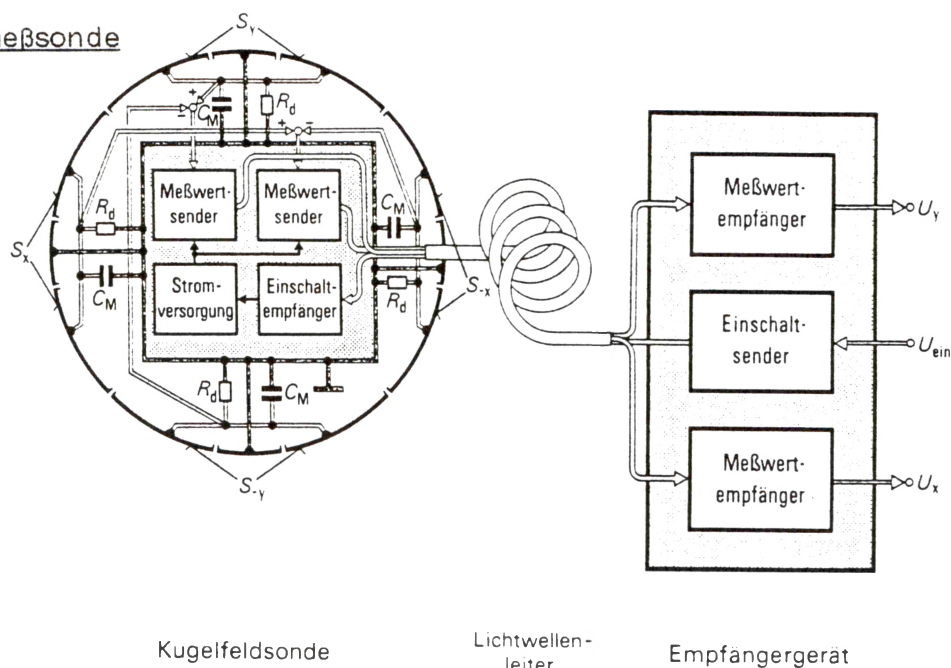


Bild 1: Blockschaltbild der Feldmeßsonde

Die Feldmeßsonde ist in Bild 1 dargestellt. In der kugelförmigen Sonde befindet sich ein Kondensator, der die induzierte Ladung misst. Das elektrische Signal wird in ein Lichtsignal umgewandelt und analog über einen Lichtwellenleiter übertragen. Am Empfänger wird das Lichtsignal wieder in ein elektrisches Signal umgewandelt. Eine ausführlichere Beschreibung der Feldmeßsonde ist in [1 - 3] zu finden. Bedingt durch die Bandbreite von 5 Hz bis 25 MHz ist auch der Frequenzbereich für die Kalibrierung von Stoßspannungsteilern ausreichend. In Bild 2 ist der Amplitudenanteil in Abhängigkeit der Frequenz für einen vollen

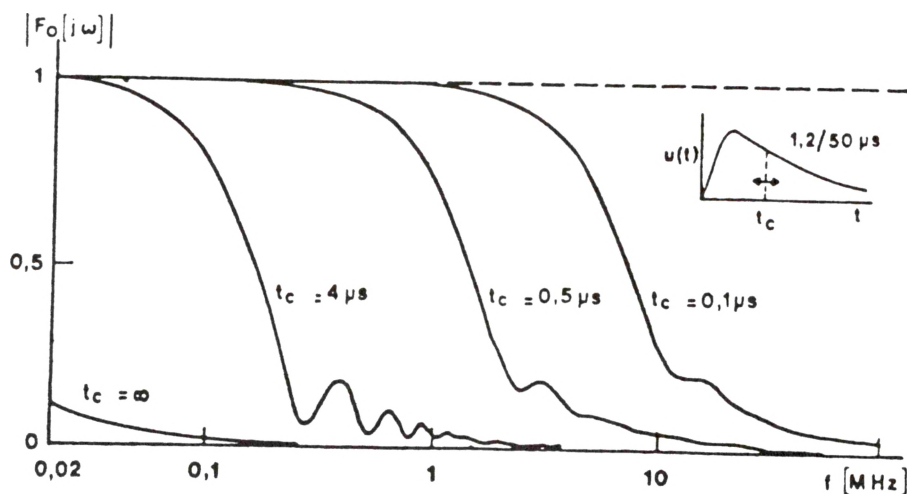


Bild 2: Normiertes Amplituden-Frequenzspektrum für die volle Blitzstoßspannung und für abgeschnittene Blitzstoßspannung ( $t_c$  - Abschneidzeit)

Blitzstoß und abgeschnittene Blitzstöße mit der Abschneidzeit als Parameter dargestellt. Da die Kalibrierung der Übertragungsstrecke durch den eingebauten Kalibrator erfolgen kann, ist zur Ermittlung der Übertragungseigenschaften des zu kalibrierenden Spannungsteilers lediglich die Montage der Feldmeßsonde und der Anschluß eines Registriergerätes notwendig. Die Positionierung der Feldsonde muß so erfolgen, daß keine Vorentladungen die Messung beeinflussen. Das Signal der Feldmeßsonde besteht aus zwei Anteilen, einem Anteil proportional zur Änderung der Kapazität und einem Anteil proportional zur Änderung der Spannung. In einer vereinfachten Formel kann diese Beziehung folgendermassen beschrieben werden

$$i(t) = 1/C_m \times (C \, dU/dt + U \, dC/dt)$$

dabei ist  $C_m$  die in der Kugel eingebaute Meßkapazität,  $C$  die Hochspannungskapazität zwischen den beiden Elektroden und  $U$  die anliegende Spannung. Unter der Voraussetzung daß durch die angelegte Spannung keine Vorentladungen, d.h. keine Änderung der Kapazität erfolgt, ist das Ausgangssignal der Feldmeßsonde proportional zur Spannungsänderung.

### 3. Beschreibung des bisherigen Kalibrierverfahrens

Im Bild 3 ist der typische Versuchskreis für eine Stoßspannungsprüfung mit Stoßspannungsgenerator, Prüfling und Spannungsteiler dargestellt. Zur Kalibrierung des Spannungsteilers muß dieser Versuchskreis verändert werden.

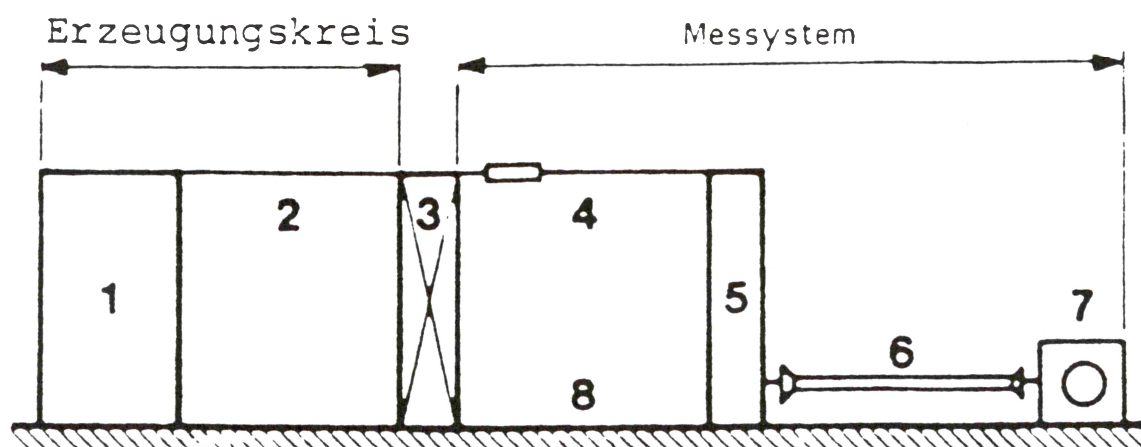


Bild 3: Prinzipieller Aufbau eines Hochspannungsprüfkreises

- |                                 |                   |
|---------------------------------|-------------------|
| 1 Hochspannungsgenerator        | 5 Spannungsteiler |
| 2 Zuleitung zum Prüfling        | 6 Messkabel       |
| 3 Prüfling                      | 7 Messinstrument  |
| 4 Zuleitung zum Spannungsteiler | 8 Erdrückleitung  |

Die Kalibrierung durch Messung der Rechtecksprungantwort erfordert nämlich einen Aufbau, in dem der Spannungsteiler Bestandteil einer quadratischen Meßschleife ist, die aus Spannungsteiler, Spannungszuleitung und niederinduktiven Rückleitung besteht. Im allgemeinen wird als Rückleitung die geerdete Wand des Hochspannungslabors verwendet. Dabei ist auch darauf zu achten, daß die Verbindung des Spannungsteilerfußpunktes mit der geerdeten Wand niederinduktiv ausgeführt ist. Die Seitenlänge des Quadrates ist durch die Bauhöhe des Spannungsteilers gegeben. In Bild 4 ist die in der IEC Publ. 60 empfohlene Anordnungen zur Messung der Sprungantwort dargestellt.

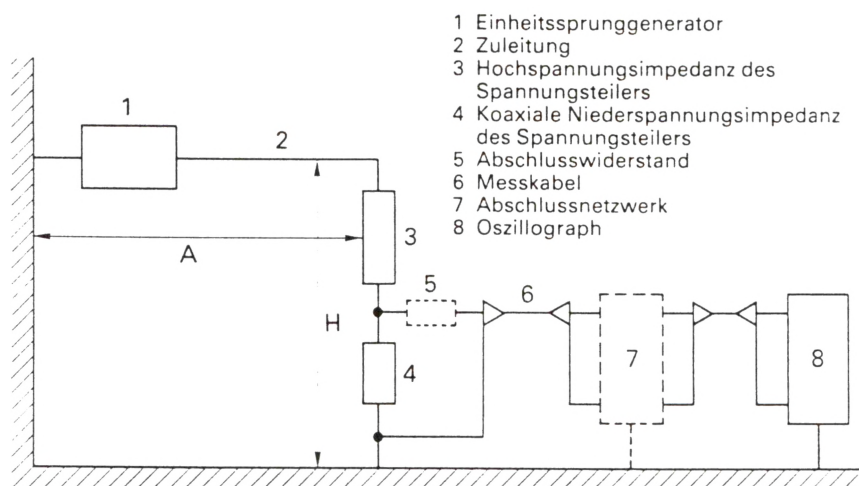


Bild 4: Messanordnung zur Ermittlung der Rechtecksprungantwort

Diese Kalibrierung erfordert einen erheblichen Aufwand bei der Einrichtung und besonders bei der Messung, da im allgemeinen die Rechtecksprunggeneratoren eine Amplitude zwischen 50 V und 300 V erzeugen. Dies führt bei einem Übersetzungsverhältnis von 10'000 zu einer Meßspannung von 5 mV bis 30 mV. Die Bestimmung des Übersetzungsverhältnisses erfolgt durch die Messung der Hochspannungs- und Niederspannungskapazität und anschließender Berechnung des kapazitiven Teilverhältnisses unter Berücksichtigung der Kabelkapazität und eventuell vorhandener Abschlußnetzwerke. Eine einfachere Möglichkeit zur Bestimmung des Übersetzungsverhältnisses ist durch das Übersetzungsmeßgerät gegeben, bei dem direkt das Teilverhältnis angezeigt wird. Bild 5 zeigt das handliche Gerät, das mit einer Spannung von ca. 50 V bei einer Frequenz von 1000 Hz arbeitet. Bei dieser Messung wird selbstverständlich die Kabelkapazität mit in die Messung einbezogen.



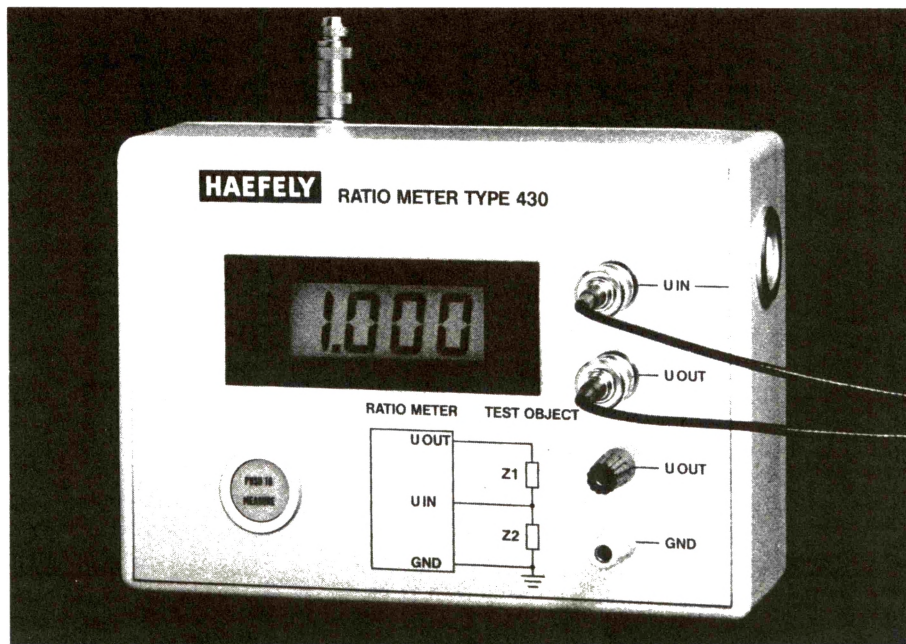


Bild 5: Übersetzungsmessgerät

#### 4. Beschreibung des zukünftigen Kalibrierverfahrens

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, wird in Zukunft die Kalibrierung mit Hilfe einer Referenzmessung sehr stark an Bedeutung gewinnen. Dieses Verfahren wird heute bei fast allen Meßgrößen als Standardkalibrierverfahren eingesetzt, da es neben der einfachen Handhabung auch im Sinne der Qualitätssicherung eine Rückverfolgung der Kalibration bis zur obersten nationalen bzw. internationalen Eichbehörde zulässt. Da die Kalibrierung eines Stoßspannungsteilers die Kontrolle des Übersetzungsverhältnisses und des Übertragungsverhaltens beinhaltet, kann zum Beispiel die Kalibration mit Hilfe eines Referenzteilers erfolgen. Dazu wird der Referenzteiler an den Versuchskreis angeschlossen, ohne den ursprünglichen Aufbau zu verändern. Da der Referenzteiler nur für eine reduzierte Spannungsamplitude ausgelegt ist, muß ein geeigneter Nachweis der Linearität des Spannungsmeßsystemes erfolgen. Dieser Nachweis kann mit der Feldmeßsonde sehr einfach erfolgen, da zusammen mit dem Referenzteiler bei kleinen Spannungen die Übertragungseigenschaften und das Übersetzungsverhältnis bestimmt werden und anschliessend bei höheren Spannungen die Linearität geprüft wird. Bei Berücksichtigung der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Eigenschaften und Einsatzgrenzen der Feldmeßsonde ist eine Prüfung der Linearität bis zur Nennspannung des Spannungsteilers möglich.

Die Kontrolle der Übertragungseigenschaften eines Spannungsteilers ist noch einfacher. Für diesen Zweck ist nur die Feldmeßsonde erforderlich, da eine Vergleichsmessung mit dem Referenzteiler nicht erforderlich ist.

Die Sonde wird im allgemeinen an einer Stelle plaziert, an der ein Feld vorhanden ist, welches ein hinreichendes Meßsignal erzeugt. Bild 6 zeigt einen solchen Versuchsaufbau.

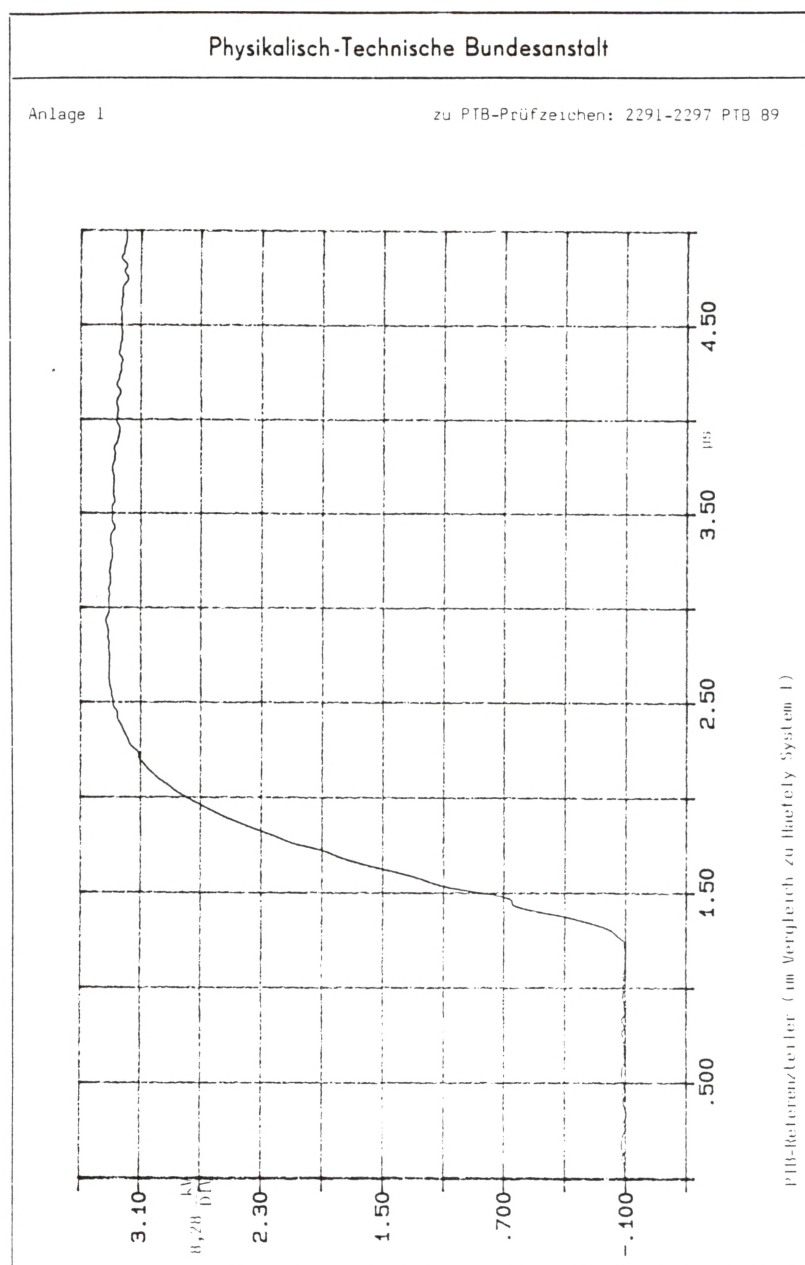


Bild 6a: Blitzstoßspannungsimpuls PTB Referenzteiler

Anlage 2

zu PTB-Prüfzeichen: 2291-2297 PTB 89

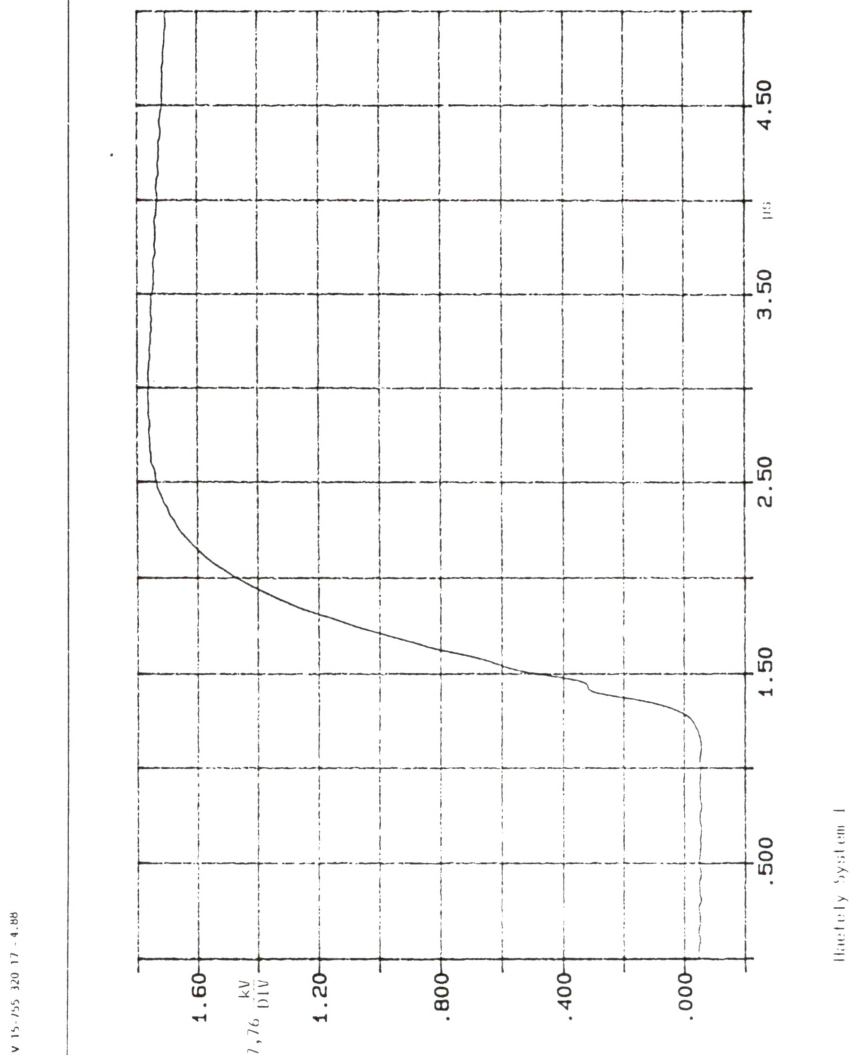


Bild 6b: Blitzstoßspannungsimpuls Haefely Teiler

Der Einsatz eines Referenzteilers hat einen weiteren Vorteil hinsichtlich der Anforderungen an das Übertragungsverhalten eines Spannungsteilers. Der Referenzteiler kann in seinen Eigenschaften auf die Anforderungen der zu kalibrierenden Spannungsform beschränkt sein. Ein Beispiel ist der Referenzteiler für Blitzstoßspannung, der nicht in jedem Fall für die Messung von abgeschnittenen Blitzstoßspannungen geeignet sein muß. Es ist dabei natürlich zu beachten, daß ein Referenzteiler möglichst für alle Spannungsformen der Hochspannungsprüftechnik geeignet sein sollte. Der zu messende Teiler kann mit Hilfe der Referenzmessungen in seinem Übertragungsverhalten klassifiziert werden.

denn nicht jeder Spannungsteiler muß zur Messung von abgeschnittenen Blitzstoßspannungen geeignet, wenn mit ihm lediglich Schaltstoßspannungen gemessen werden. Der Spannungsteiler kann also entsprechend seinem Einsatzbereich bzw. entsprechend der zu erwartenden Impulsspannungsform kalibriert werden.

### 5. Beispiele der Impulskontrolle

Der Versuchsaufbau kann zum Beispiel aus dem Stoßspannungsgenerator, dem Stoßspannungsteiler, dem Referenzteiler und der Feldmeßsonde bestehen. Im Versuchskreis wird mit Hilfe eines zweikanaligen digitalen Meßwerterfassungssystem die zur Prüfung erforderliche Spannungsform aufgezeichnet, wobei ein Meßsignal vom Spannungsteiler und eines vom Referenzteiler oder von der Feldmeßsonde stammt. Eine Auswertung der beiden Spannungsverläufe und ein Vergleich zwischen den Zeitparametern ermittelt aus dem Referenzmeßsignal und dem zu messenden Signal erlaubt eine Bewertung des Übertragungsverhaltens des Spannungsteilers bei der jeweils angelegten Spannungsform. Bild 6 zeigt die beiden Meßsignale, aufgenommen mit einem Analog-Digital-Umsetzer. Die Auswertung des Scheitelwertes ergibt eine Abweichung von 0.1 % bei einer Meßunsicherheit des Referenzsystemes von 1 %. Die Auswertung der Frontzeit ergibt eine Abweichung von 2.5 % bei einer Meßunsicherheit von 3 % des Referenzsystemes.

Die Ergebnisse für abgeschnittene Blitzstoßspannungsimpulse sind in Bild 7 dargestellt. Die Abweichung im Scheitelwert beträgt 3,6 % bei einer Meßunsicherheit des Referenzsystems von 2 %. Die Zeit bis zum Abschneiden wird mit einer Abweichung von 2,1 % gemessen bei einer Meßunsicherheit des Referenzsystemes von 3 %.

Aus diesen Messungen ist zu erkennen, daß die Vergleichsmessung mit diesem Referenzteiler im Hinblick auf die Meßunsicherheit für das gesamte System ausreichend sind. Bei der Bestimmung des Scheitelwertes für volle Blitzstoßspannung wird eine Meßunsicherheit von 3 % zugelassen /4/, erreicht werden 1.1 %. Bei der Bestimmung der Frontzeit sind 10 % zugelassen, erreicht werden 5.5 %. Bei frontabgeschnittenen Blitzstoßspannungen wird bei der Bestimmung des Scheitelwertes eine Meßunsicherheit von 5 % gefordert, erreicht werden 5.6 %. Hier sind die Eigenschaften des Referenzteilers und des zu prüfenden Teilers



Anlage 3

zu PTB-Prüfzeichen: 2291-2297 PTB 89

V 15/95 120 17 - 4.88

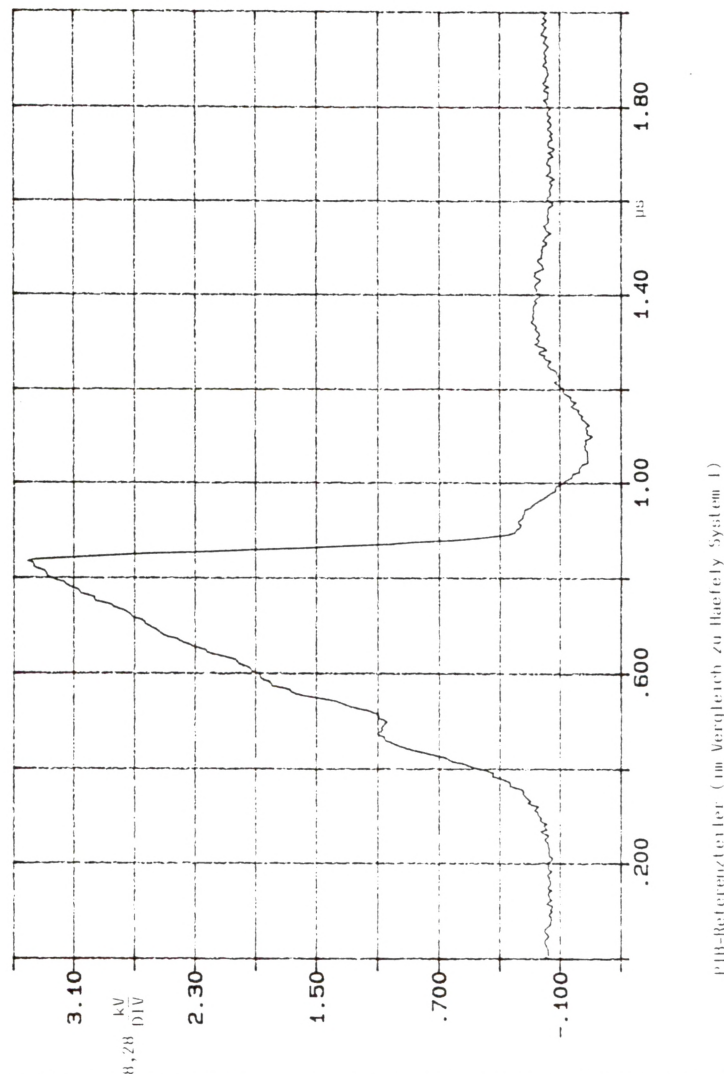


Bild 7a: Abgeschnittener Blitzstoßspannungsimpuls PTB Referenzteiler

nicht zur Erfüllung der Forderungen geeignet. Eine Abhilfe kann durch die Reduktion der Meßunsicherheit des Referenzteilers und des zu prüfenden Spannungsteilers erreicht werden. Für die Bestimmung der Abschneidzeit sind 10 % gefordert, erreicht werden 5,5 %.

Als Ergebnis der Vergleichsmessung kann daher festgehalten werden, daß der geprüfte Spannungsteiler zur Messung von vollen Blitzstoßspannungen geeignet ist, bei frontabgeschnittenen Blitzstoßspannungen wird die zulässige Grenze nur sehr gering überschritten, wenn die Meßunsicherheiten addiert werden.

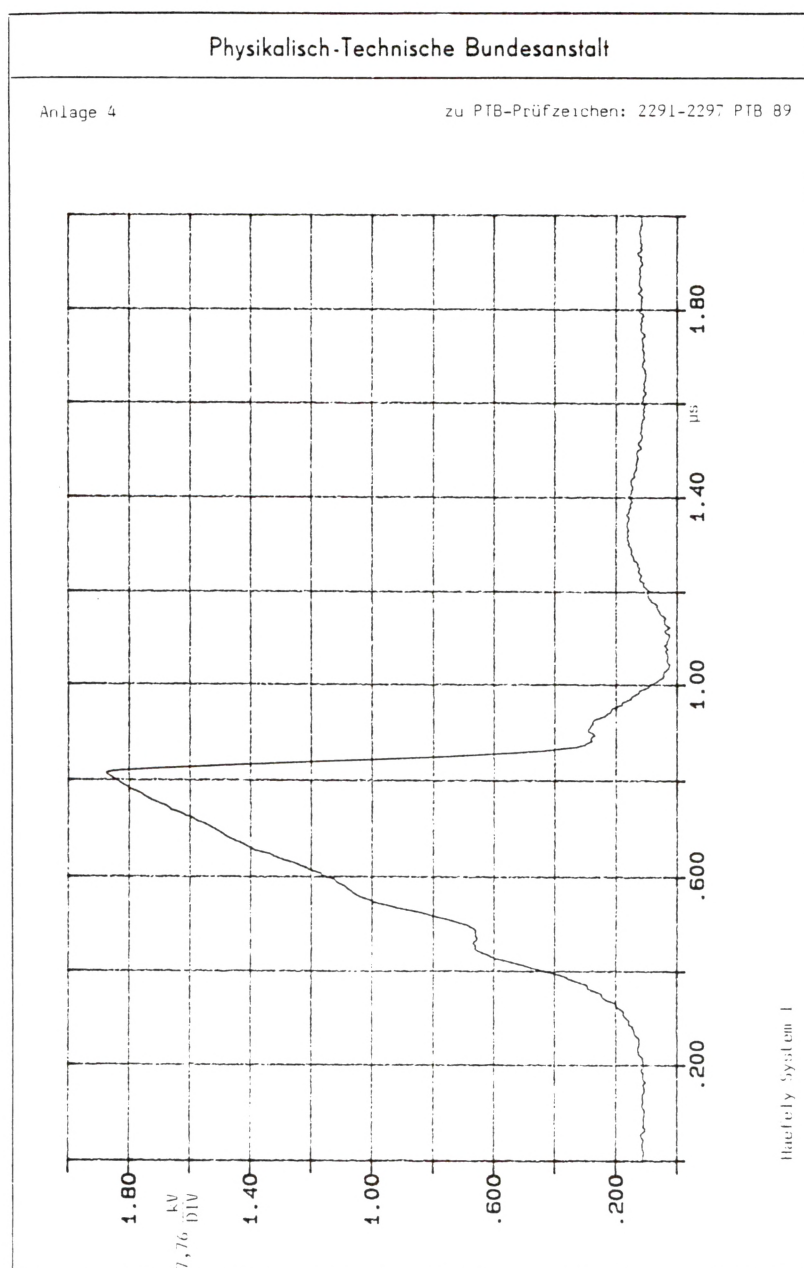


Bild 7b: Abgeschnittener Blitzstoßspannungsimpuls Haefely Teiler

## 6. Zusammenfassung

Durch die Ablösung des bisherigen Kalibrierverfahrens kann die Kontrolle der Impulsform und der Meßunsicherheit des Meßsystems mit Hilfe einer Referenzmessung erfolgen.

Das Verfahren hat den Vorteil, daß ein Spannungsmesssystem mit dem Impuls kalibriert wird für den es später auch eingesetzt wird.

Die Kontrolle der Impulsform gemäß des Entwurfes der IEC Publ. 60 kann mit einem Referenzteiler bzw. mit einer Feldmeßsonde durchgeführt werden.

Beim Einsatz der Feldmeßsonde kann auch die Linearität des gesamten Meßkreises geprüft werden, wenn zusätzlich die Ladespannung des Stoßspannungsgenerators als Meßgröße erfasst wird.

## 7. Schrifttum

/1/ K. Feser, W. Pfaff

Eine Kugelsonde mit potentialfreier Meßwertübertragung zur Messung von transienten elektrischen Feldern

Interner Bericht TU Stuttgart Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik

/2/ F. Feser, W. Pfaff, E. Gockenbach

Distortion-Free Measurements of High Impulse Voltages

IEEE Trans. on Power Delivery Vol. 3 (1988) No. 3 pp. 857 - 866

/3/ E. Gockenbach, P. Ganzmann, E. Brogli

Some applications of an electrical field sensor

Sixth ISH New Orleans 1989, Paper No. 40.06

/4/ IEC Publication 60

High Voltage Test Technique Part 1 - 4, 1973