

Kalibrierung von digitalen Recordern

K. Schon

Zusammenfassung: In dem Beitrag wird zunächst auf die grundlegenden Eigenschaften und Fehler von Digitalrecordern für Stoßspannungsmessungen eingegangen. Anschließend werden die Anforderungen und Kalibrierverfahren der neuen IEC-Publikation 1083-1 zusammengestellt und kommentiert. Hierbei wird die Bedeutung der Impulskalibrierung herausgestellt und durch Beispiele für verschiedene Digitalrecorder ergänzt.

Einleitung

Seit mehr als zwei Jahrzehnten werden digitale Recorder in der Stoßspannungsmeßtechnik eingesetzt. Die stetige Verbesserung ihrer technischen Eigenschaften und der Vorteil der rechnergestützten Datenverarbeitung haben inzwischen zu einer weitgehenden Verdrängung analoger Stoßoszilloskope im Bereich Forschung und Entwicklung geführt, insbesondere seitdem störteste digitale Meßsysteme mit Abschwächer einschließlich der erforderlichen Software kommerziell erhältlich sind.

Mitte 1991 erschien die IEC-Publikation 1083-1, in der die Anforderungen an Digitalrecorder für Stoßspannungsmessungen und die Kalibrierverfahren festgelegt sind /1/. Ein bislang gewichtiges Argument gegen den Einsatz von Digitalrecordern bei Abnahmeprüfungen an Betriebsmitteln der Energieversorgung ist damit entfallen. Parallel zur Ausarbeitung von IEC 1083-1 setzte bei verschiedenen Herstellerfirmen die Entwicklung von Impulsgeneratoren ein, mit denen eine zeitsparende, weitgehend automatisierte Kalibrierung der Digitalrecorder möglich ist.

In diesem Beitrag wird nach kurzer Zusammenfassung einiger grundlegender Eigenschaften von Digitalrecordern auf die Anforderungen und Kalibriermethoden nach IEC 1083-1 eingegangen. Die Vorteile der Impulskalibrierung von Digitalrecordern werden an Hand verschiedener Beispiele gezeigt.

1 Grundlegende Eigenschaften von Digitalrecordern

Die digitale Meßwerterfassung beinhaltet die Abtastung des Meßsignals zu bestimmten, meist äquidistanten Zeiten, Quantisierung der Signalwerte entsprechend der Nennauflösung des Recorders und Speicherung der aufgezeichneten Daten zur weiteren Verarbeitung. Hierbei kann eine Vielzahl von Fehlern auftreten, die einerseits grundsätzlich mit der Abtastung und Quantisierung zusammenhängen und andererseits auf das nichtideale Verhalten der analogen und digitalen Schaltkreise des Recorders beruhen.

Der maximale Quantisierungsfehler, der bei der idealen Quantisierung auftreten kann, läßt sich leicht abschätzen. Er ist gleich der Hälfte der Differenz zwischen zwei benachbarten Quantisierungsstufen. Für einen 8-Bit-Recorder mit insgesamt 256 Quantisierungsstufen ergibt sich demnach in Bezug zur Vollaussteuerung des Meßsignals ein Quantisierungsfehler von maximal 0,2 % /2,3/.

Der Abtastfehler entsteht dadurch, daß die Abtastung nicht genau zu dem Zeitpunkt erfolgt, zu dem der Signalwert bekannt sein soll, z.B. im Scheitel. Er ist außer von der Abtastrate auch von der Kurvenform des Meßsignals abhängig. Bei einer Abtastrate von $100 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ berechnet sich im ungünstigsten Fall der Abtastfehler z. B. zu - 1 % für eine 4,5-MHz-Sinusspannung (Bild 1a) oder einen nach 500 ns abgeschnittenen Stoß (Bild 1b) /2/.

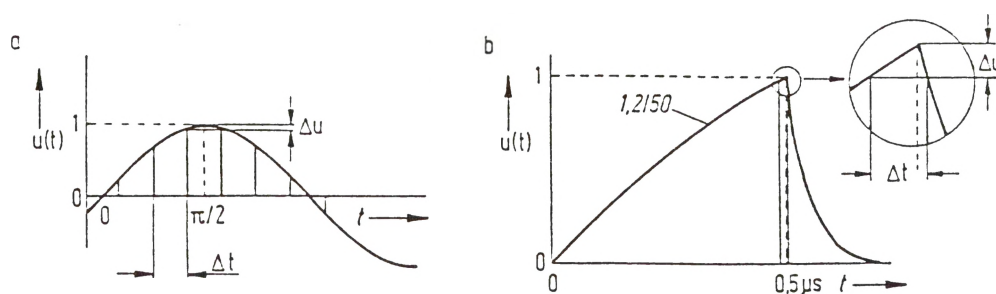


Bild 1: Beispiele für Abtastfehler im Scheitel /1/

- a) Sinusspannung
- b) Abgeschnittener Blitzstoß

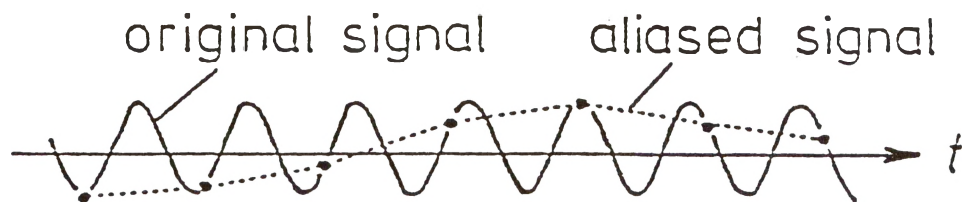


Bild 2: Aliasing-Effekt durch zu geringe Abtastrate

Wenn die Abtastrate kleiner als die doppelte Signalfrequenz ist, geht im Extremfall der ursprüngliche Kurvenverlauf verloren, und die Abtastwerte stellen dann ein falsches Meßsignal dar (Bild 2). Dieser mit Aliasing bezeichnete Effekt wird durch Festlegung einer minimalen Abtastrate in IEC 1083-1 je nach Stoßform und überlagerten Oszillationen praktisch ausgeschlossen.

Der tatsächliche Gesamtfehler eines Digitalrecorders kann deutlich größer sein als die Quantisierungs- und Abtastfehler, insbesondere bei der Aufzeichnung schnell veränderlicher Signale. Die Einzelfehler können hierbei systematisch oder zufällig bedingt sein. Zum Gesamtfehler tragen auch die Fehler der analogen Schaltkreise hinsichtlich Offset, Verstärkung, Frequenzgang, Stabilität, usw. bei. Durch die Kalibrierung sollen die Fehler ermittelt und, wenn sie systematischer Natur sind, gegebenenfalls durch Einführung entsprechender Faktoren korrigiert werden. Einige typische Fehler von Digitalrecordern mit hoher Abtastrate werden im folgenden kurz beschrieben.

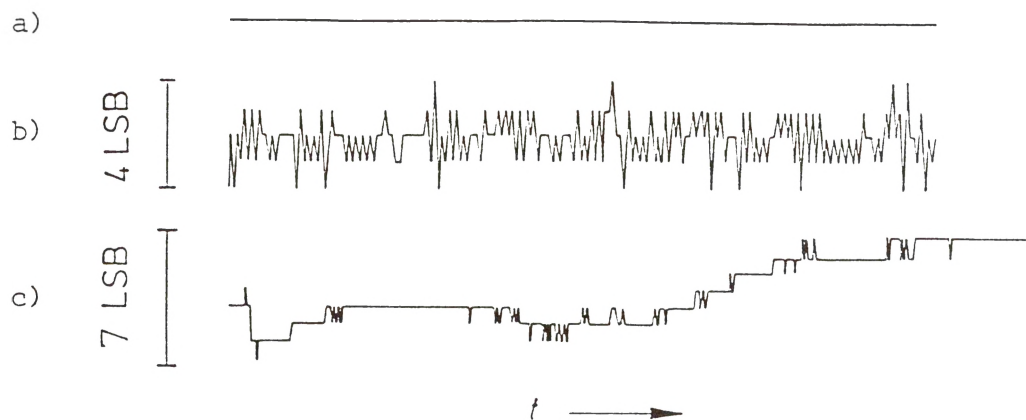


Bild 3: Typische Aufzeichnungen verschiedener Digitalrecorder für eine Gleichspannung /4/

- a) Ungestörte Aufzeichnung (8-Bit-Recorder)
- b) Überlagertes internes Rauschen (10-Bit-Recorder)
- c) Systematische Störüberlagerung ("Scan Converter" mit 9 Bit)

Der Signalaufzeichnung eines Digitalrecorders sind häufig interne Störungen überlagert. Bild 3 zeigt typische Aufzeichnungen einer Gleichspannung von verschiedenen Recordern /4/. Während nur die Aufzeichnung in Bild 3a ungestört ist, treten bei den anderen beiden Recordern Rauschstörungen (Bild 3b) oder andere hochfrequente Überlagerungen (Bild 3c) auf. Diese sind natürlich auch bei der Aufzeichnung von Stoßspannungen vorhanden und beeinflussen die Auswertung. Mit numerischen Filterverfahren läßt sich zumindest bei vollen Stößen der Einfluß der Rauschstörung vermindern.

Das grundsätzliche Verhalten eines Digitalrecorders zeigt sich in seiner Quantisierungscharakteristik, die den Zusammenhang zwischen dem aufgezeichneten Wert und der angelegten Gleichspannung über den gesamten Aussteuerbereich wiedergibt /5/. Hierzu wird die Eingangsspannung in kleinen Schritten erhöht und jeweils der Mittelwert der aufgezeichneten Abtastwerte berechnet. Für einen idealen Recorder ergibt sich eine symme-

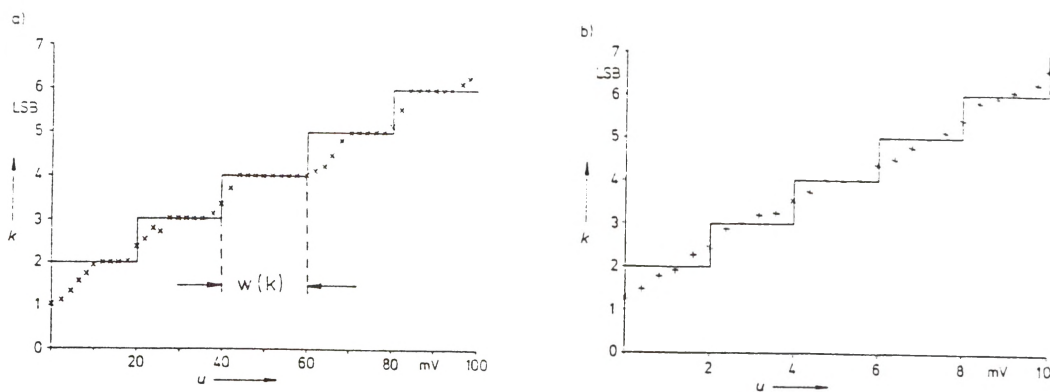


Bild 4: Quantisierungscharakteristik (Ausschnitt) eines 8-Bit Recorders

- a) Eingang "High Level" (5,12 V)
- b) Eingang "Low Level" (0,512 V)

trische Treppenkurve, deren Stufenzahl, -breite und -höhe durch die Bitzahl festgelegt sind. Bild 4a zeigt einen Ausschnitt der Quantisierungskurve eines 8-Bit-Recorders, bei dem die Meßwerte (Kreuze) noch recht gut die Treppenkurve erkennen lassen. Dies ist in Bild 4b nicht der Fall. Die Ursache liegt im Auftreten interner Rauschstörungen, die sich der angelegten Gleichspannung überlagern. Die Treppenkurve läßt sich dennoch gut anpassen, so daß die Ermittlung der erforderlichen Kenngrößen möglich ist.

Die bei Gleichspannung ermittelte Quantisierungscharakteristik des Recorders ist für schnell veränderliche Signale häufig nicht mehr zutreffend. Mit zunehmender Steilheit des Meßsignals können bestimmte Quantisierungsstufen nicht mehr dem Kurvenverlauf folgen, während benachbarte Stufen häufiger ansprechen. Zur Kennzeichnung dieser dynamischen Nichtlinearität gibt es in der Literatur verschiedene Vorschläge /2-6/. Die mit Sinusspannung ermittelte Effektive Bitzahl oder die Fourier-Analyse haben sich jedoch als wenig aussagekräftig zur Charakterisierung von Recordern für Stoßspannungsmessungen erwiesen. Da für viele Recorder ein Zusammenhang zwischen den Fehlern und der Signalsteilheit festgestellt wurde, sind Rampen- oder Dreiecksspannungen, die den gesamten Aussteuerbereich des Recorders mit konstanter Steilheit beanspruchen, grundsätzlich besser zur Kennzeichnung der Nichtlinearität geeignet /4/.

Ein statistisches Verfahren mit symmetrischen Dreiecksspannungen wurde deshalb auch in IEC 1083-1 zur Prüfung der dynamischen Nichtlinearität übernommen. Aus der mehrfachen Aufzeichnung der Dreiecksspannung, deren Wiederholfrequenz nicht einer Subharmonischen der Abtastfrequenz entsprechen darf, wird die Summenhäufigkeit jeder Quantisierungsstufe berechnet. Ein ideales Verhalten ist dadurch gekennzeichnet, daß alle Quantisierungsstufen gleich häufig auftreten. Als Beispiel zeigt Bild 5 die nach diesem Verfahren ermittelte Summenhäufigkeit H/H_{\max} eines älteren 8-Bit-Recorders mit einer Abtastrate von $100 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ für verschiedene Steilheiten des Dreiecksignals. Bei der relativ geringen Steilheit von $0,1 \text{ f.s.d./}\mu\text{s}$ (f.s.d. = full scale deflection = Vollaussteuerung) sind die einzelnen Quantisierungsstufen (codes) noch annähernd gleich häufig vertreten (Bild 5a). Bei Erhöhung der Steilheit fallen immer mehr Quantisierungsstufen aus (Bild 5b), so daß schließlich nur noch wenige, und zwar paarweise, übrig bleiben (Bild 5c). Der Ausfall der Stufen erfolgt nach einem bestimmten Schema, das auch für andere Recorder des gleichen Typs nachgewiesen wurde /4/.

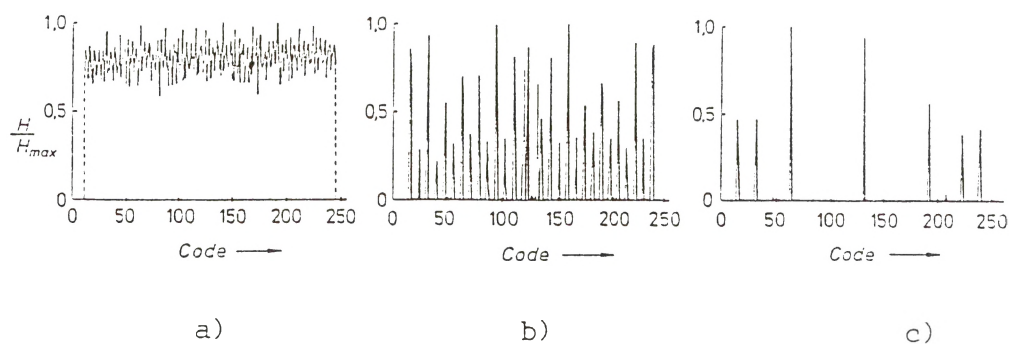


Bild 5: Häufigkeitsverteilung H/H_{\max} der Quantisierungsstufen (codes) eines 8-Bit-Recorders bei unterschiedlichen Signalsteilheiten s /4/

- a) $s = 0,1 \text{ f.s.d./}\mu\text{s}$
- b) $s = 6 \text{ f.s.d./}\mu\text{s}$
- c) $s = 22 \text{ f.s.d./}\mu\text{s}$

2 Die neue IEC-Publikation 1083-1

2.1 Allgemeines

IEC 1083-1 ist eine der umfassendsten Kalibriervorschriften für Meßgeräte in der Hochspannungstechnik. Die Definitionen und die Prüfverfahren stimmen teilweise mit denen in der nordamerikanischen Vorschrift IEEE Std 1057 /7/ überein, die zeitlich parallel für Digitalrecorder zur Messung im Niederspannungsbereich ausgearbeitet wurde. Die Anforderungen an die Gesamtunsicherheit, die elektromagnetische Störbeeinflussung bei Hochspannungsprüfungen und den Einsatzbereich sind weitgehend identisch mit denen für analoge Stoßoszilloskope in IEC 790 /8/.

Neu eingeführt wurde die Kalibrierung des Digitalrecorders mit Impulsen ähnlicher Kurvenform wie die der genormten Blitz- und Schaltstoßspannungen. Die hierfür benötigten Kalibriergeneratoren mit Scheitelwerten bis 2 kV sind seit kurzem auf dem Markt erhältlich bzw. werden in Kürze lieferbar sein. Damit läßt sich die Kalibrierung einfach, schnell und umfassend durchführen. Die Kalibrierung von Digitalrecordern wird damit auf eine vergleichbare Stufe gestellt wie die von Gleich- oder Wechselspannungsmeßgeräten, für die bereits seit längerem hochgenaue DC- und AC-Kalibriergeneratoren zur Verfügung stehen.

Digitalrecorder bei Stoßspannungsprüfungen werden für zwei verschiedene Aufgaben verwendet. Die eine Aufgabe beinhaltet die Ermittlung des Scheitelwertes und der Zeitparameter des aufgezeichneten Stoßes. Die andere Aufgabe besteht darin, zwei Strom- oder Spannungsverläufe bei unterschiedlichen Prüfpegeln aufzuzeichnen und hinsichtlich kleinster Unterschiede auszuwerten, z. B. bei Stoßprüfungen an einem Transformator. Hierdurch ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Reproduzierbarkeit und den Störpegel der Recorder.

Auf die Verwendung der notwendigen Abschwächer zur Reduzierung der Impulshöhen wird in IEC 1083-1 nicht näher eingegangen. Die üblicherweise eingesetzten passiven Abschwächer können im allgemeinen als lineare Bauelemente angesehen werden. Sie

müssen auf die Eingangsimpedanz des Recorders abgeglichen sein, z. B. mit Hilfe eines Spannungssprungs. Während bei einer Vielzahl von Einzelkalibrierungen des Recorders der Abschwächer nicht unbedingt erforderlich oder sogar hinderlich ist, muß er bei der Ermittlung des Maßstabsfaktors und der Störbeeinflussung grundsätzlich einbezogen werden.

2.2 Anforderungen an Digitalrecorder

Gesamtunsicherheit

Die Anforderungen an Digitalrecorder für Stoßspannungsmessungen nach IEC 1083-1 sind in Tabelle 1 zusammengestellt. In Anlehnung an die Anforderungen an analoge Stoßoszilloskope /8/ darf die Gesamtunsicherheit des Recorders einschließlich Abschwächer die folgenden Grenzwerte nicht überschreiten:

- $\pm 2,0 \%$ für die Messung des Scheitelwertes
- $\pm 4,0 \%$ für die Messung der Zeitparameter T_1 , T_2 , T_c , T_p .

Mit Hilfe der neu entwickelten Kalibrierimpulsgeneratoren lassen sich diese Anforderungen einfach, schnell und direkt überprüfen. Hierbei dürfen nur die aufgezeichneten Rohdaten für die Auswertung verwendet werden. Dies setzt praktisch voraus, daß die Kalibrierimpulse einen glatten Verlauf ohne überlagerte Oszillationen aufweisen.

Werden die Grenzwerte eingehalten, sind besondere Datenverarbeitungstechniken wie Interpolation und Filterung zur Erhöhung der Auswertegenauigkeit zulässig, wobei die Rohdaten jedoch erhalten bleiben müssen. Diese Unterscheidung führt gelegentlich zu Mißverständnissen bei der Auswertung von Stößen, die im Hochspannungskreis aufgezeichnet werden. Sind dem Stoß Oszillationen überlagert, müssen diese entsprechend IEC 60 /9/ berücksichtigt und gegebenenfalls zur Ermittlung der Stirnzeit und des Scheitelwertes eliminiert werden. Hierzu bietet sich natürlich an, digitale Filterverfahren anzuwenden und so die Vorteile der digitalen Datenverarbeitung zu nutzen. Geeignete Rechenverfahren werden allerdings erst im zweiten Teil von IEC 1083 behandelt.

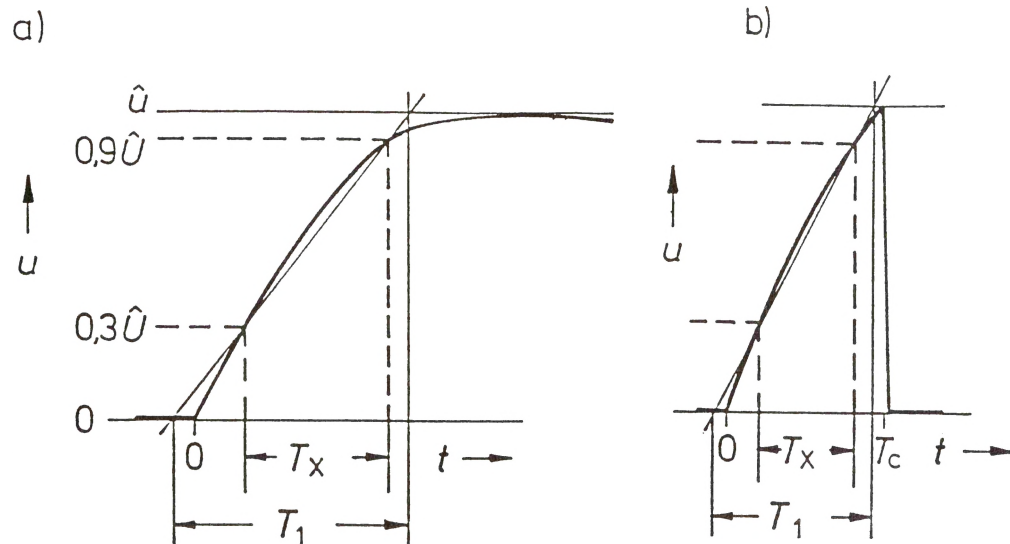


Bild 6: Definition von T_x und T_1

- a) Voller Blitzstoß
- b) Abgeschnittener Stoß

Abtastrate und Nennauflösung

Die wichtigsten Nenndaten eines Digitalrecorders sind seine Abtastrate und Auflösung, für die entsprechend der vorgesehenen Meßaufgabe Mindestwerte nach Tabelle 1 festgelegt sind. Hierbei ist T_x das Zeitintervall, das tatsächlich vom Recorder gemessen wird, um den jeweiligen Zeitparameter zu bestimmen (Bild 6). Zur Messung von vollen Blitzstößen mit $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ ($T_x = T_1/1,667 = 0,72 \mu\text{s}$) ist demnach mindestens eine Abtastrate von $42 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ erforderlich.

Zur Messung von Oszillationen in der Front und im Scheitel können weit höhere Abtast-raten erforderlich sein. In einem Prüfkreis mit der mittleren Höhe H in m sind nach IEC 60 /9/ Oszillationen mit einer höchsten Frequenz $f_{\text{max}} = 75/(2H)$ in MHz möglich. Entsprechend der Forderung in Tabelle 1 bedeutet dies, daß z. B. für einen 500-kV-Prüf-kreis der Recorder eine Abtastrate von ca. $100 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ aufweisen muß.

Die Nennauflösung zur Ermittlung des Scheitelwertes und der Zeitparameter soll minde-stens 8 Bit entsprechend 0,4 % bei Vollaussteuerung (f.s.d.) betragen. Für Vergleichs-messungen sind mindestens 9 Bit (0,2 %) erforderlich.

Gesamtunsicherheit	$\leq \pm 2,0 \%$ (Scheitelwert) $\leq \pm 4,0 \%$ (Zeitparameter)
Abtaste	$\geq \frac{30}{T_x}$ $\geq 8f_{\max}$
Nennaufösung	$\geq 8 \text{ Bit } (0,4 \%) \quad 1)$ $\geq 9 \text{ Bit } (0,2 \%) \quad 2)$
Eingangsimpedanz	$\geq 1 \text{ M}\Omega, \leq 50 \text{ pF}$
Unsicherheit des Auswerteverfahrens	$\leq 1 \%$ des jeweiligen Parameterwertes
Integrale Nichtlinearität	$< 0,5 \%$ f.s.d.
Differentielle Nichtlinearität (statisch und dynamisch)	$\leq 0,8$
Nichtlinearität Zeitbasis	$\leq 2 \%$ von T_x $[\leq (0,5 \% \dots 2 \%) T_x]$
Unsicherheit Abtastintervall	$< \frac{1}{6} \Delta t$
Dynam. Maßstabsfaktor, Abweichung	$\leq 1 \%$ innerhalb $0,5 T_1$ bis $2 T_2$
Anstiegszeit	$\leq \frac{1}{2\pi f_{\max}}$ $< 3 \%$ von T_x
Interner Störpegel	$< 0,4 \%$ f.s.d. $1)$ $< 0,1 \%$ f.s.d. $2)$
Störbeeinflussung (EMV)	$\leq 1 \%$ f.s.d.
Überlagerungen	$< 0,4 \%$ f.s.d. $1)$ $< 0,1 \%$ f.s.d. $2)$

1) Ermittlung der Stoßparameter

2) Vergleichsmessung

f.s.d. Vollaussteuerung

Tabelle 1: Anforderungen an Digitalrecorder nach IEC 1083-1

Eingangsimpedanz

Die Eingangsimpedanz des Recorders soll mindestens $1\text{ M}\Omega$ bei maximal 50 pF betragen. Bei Verwendung ohmscher Hochspannungsteiler wird der Eingang üblicherweise mit $75\ \Omega$ oder $50\ \Omega$ entsprechend dem Kabelwellenwiderstand abgeschlossen.

Anstiegszeit

Die Anstiegszeit ergibt sich aus der Sprungantwort des Recorders einschließlich Abschwächer als Zeitintervall zwischen 10 % und 90 % des Endwertes. Zur Messung voller Blitzstoßspannungen mit glattem Kurvenverlauf genügt nach Tabelle 1 eine Anstiegszeit von 15 ns , was einer Bandbreite von 25 MHz entspricht. Zur Erfassung überlagerter Oszillationen mit Frequenzen bis maximal 25 MHz /9/ sind Anstiegszeiten bis zu 6 ns erforderlich (70 MHz Bandbreite).

Auswerteverfahren

Die aufgezeichneten Daten können mit verschiedenen Verfahren ausgewertet werden, z. B. mit Hilfe des "cursors" direkt auf dem Bildschirm oder mit Hilfe von Algorithmen in einem Rechenprogramm. Die Unsicherheit der Auswertung soll kleiner als 1 % des jeweiligen Parameters sein. Bei der Methode mit "cursor" muß sich der Anwender vergewissern, daß auch tatsächlich die gespeicherten Daten und nicht nur die auf dem Bildschirm mit geringer Auflösung sichtbaren Bildpunkte zur Auswertung gelangen.

Differentielle und integrale Nichtlinearität bei Gleichspannung

Beide Kennwerte werden aus der Quantisierungscharakteristik ermittelt. Die (statische) differentielle Nichtlinearität $d(k)$ ist definiert als die relative Abweichung der Stufenbreite $w(k)$ vom Mittelwert w_0 (Bild 4). Die im Bild 4 eingezeichneten Treppenkurven haben jeweils gleiche Stufenbreiten $w(k) = 20\text{ mV}$ bzw. 2 mV entsprechend dem Nennwert $w_0 = 5,12\text{ V}/256$ bzw. $0,512\text{ V}/256$, so daß $d(k)$ für beide Charakteristiken im gezeigten Bereich gleich Null ist.

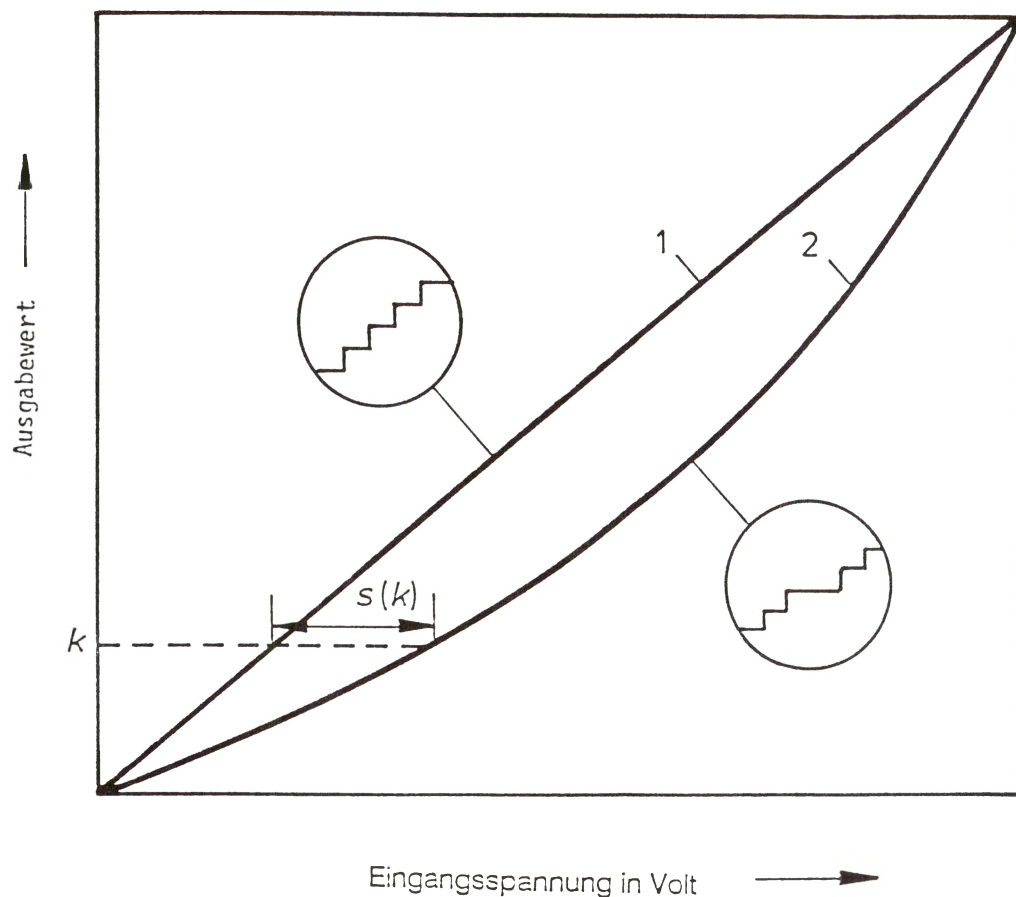


Bild 7: Integrale Nichtlinearität $s(k)$ nach IEC 1083-1

- 1: ideale Quantisierungscharakteristik
- 2: nichtlineare Quantisierungscharakteristik

Die vollständige Quantisierungscharakteristik eines idealen (Kurve 1) und eines nichtlinearen Recorders (Kurve 2) ist schematisch in Bild 7 wiedergegeben. Die integrale Nichtlinearität $s(k)$ ist definiert als Differenz der Eingangsspannung des Recorders (Kurve 2) zur Idealkurve 1 bei der Quantisierungsstufe k .

Als Folge der Nichtlinearitäten eines Recorders ergeben sich Fehler, die von der jeweiligen Aussteuerung des Meßsignals abhängen. Der in Tabelle 1 angegebene Grenzwert für $s(k) = 0,5 \%$ der Vollaussteuerung bedeutet, daß der Amplitudenfehler infolge der integralen Nichtlinearität bei halber Aussteuerung maximal 1 % betragen darf.

Dynamische differentielle Nichtlinearität

Die dynamische differentielle Nichtlinearität der Recorder wird mit symmetrischen Dreiecksspannungen mit Steilheiten bis maximal $f.s.d./(0,4 T_x)$ geprüft. Sie ist definiert als Abweichung der Summenhäufigkeit einer Stufe vom Mittelwert aller Stufen (Bild 5). Zulässig sind maximal $d = 0,8$ (Tabelle 1), d. h. wenn im Mittel jede Stufe 100mal auftritt, darf keine der Stufen weniger als 20mal oder mehr als 180mal vorhanden sein.

Die maximale Steilheit der Dreiecksspannung für Digitalrecorder, die zur Messung voller Blitzstöße ($T_x = 0,72 \mu s$) eingesetzt werden, beträgt nach der o. a. Forderung $0,35 f.s.d./\mu s$, was einer Wiederholfrequenz von 175 kHz entspricht. Der durch die Häufigkeitsverteilung nach Bild 5 charakterisierte Recorder hält die Anforderung $d(k) \leq 0,8$ für diese Steilheit gerade noch ein. Bei einer etwas höheren Steilheit von $0,6 f.s.d./\mu s$ tritt eine bestimmte Quantisierungsstufe (code $k = 94$) überhaupt nicht mehr auf, d. h. $d(94) = 1$, so daß der IEC-Grenzwert überschritten wird.

Nichtlinearität der Zeitbasis, Unsicherheit des Abtastintervalls

Die (integrale) Nichtlinearität der Zeitbasis ist definiert als die Differenz zwischen einem bekannten Zeitintervall und dem entsprechenden Wert, der sich aus der Aufzeichnung als Produkt aus Abtastintervall und Anzahl der Abtastungen ergibt. Die Unsicherheit des Abtastintervalls ("jitter") wird als Standardabweichung der Zeitdifferenzen zwischen benachbarten Abtastpunkten ermittelt. Aufgrund der hohen Genauigkeit und Stabilität der Taktfrequenz werden die geforderten Grenzwerte (Tabelle 1) im allgemeinen weit unterschritten. Die Herstellerangaben lassen sich gegebenenfalls mit Sinus- und Rampenspannungen bekannter Frequenz überprüfen.

Statischer Maßstabsfaktor F_s und Impuls-Maßstabsfaktor F_i

Der statische Maßstabsfaktor F_s wird als Quotient einer angelegten Gleichspannung zum aufgezeichneten Wert unter Berücksichtigung des Offsets bei mindestens 90 % der Vollaussteuerung ermittelt. F_s läßt sich auch aus der Quantisierungscharakteristik (Bild 7) bestimmen, wenn der Abschwächer einbezogen ist. Dem statischen Maßstabsfaktor kommt zunächst keine praktische Bedeutung zu, da er nicht ohne weitere Kenntnis des dynamischen Verhaltens des Recorders bei der Impulsmessung anwendbar ist.

Der Impuls-Maßstabsfaktor F_i des Recorders mit Abschwächer soll vorzugsweise durch Kalibrierung mit Impulsen, deren Kurvenform der der genormten Prüfstöße gleicht, ermittelt werden. Er ist definiert als der Quotient

$$F_i = \frac{\text{Scheitelwert des Kalibrierimpulses}}{\text{Scheitelwert der Aufzeichnung.}}$$

F_i wird als Mittelwert aus mindestens 20 Aufzeichnungen bestimmt, wobei jeder Einzelwert nicht mehr als 1 % vom Mittelwert abweichen darf.

Alternativ kann F_i auch aus der Sprungantwort ermittelt werden. Der Sprung wird vorzugsweise durch Kurzschließen einer auf mindestens 0,1 % genau bekannten Gleichspannung U_{cal} mit Hilfe eines Quecksilber-Schalters erzeugt. In dem interessierenden Zeitbereich von $0,5 T_1$ bis $2 T_2$ (voller Stoß) bzw. $2 T_c$ (abgeschnittener Stoß) wird der Mittelwert O_s aller Abtastwerte $O(t)$ der Sprungantwort berechnet (Bild 8). Aus den Mittelwerten O_s von mindestens 20 Sprüngen wird der gemeinsame Mittelwert O_{sm} berechnet. Der Quotient U_{cal}/O_{sm} bildet dann den Impuls-Maßstabsfaktor F_i .

Weiterhin darf sich F_i im genannten Zeitbereich um nicht mehr als 1 % verändern. Dies kann entweder durch Kalibrierung mit Impulsen mit den entsprechenden Stirnzeiten oder an Hand der Sprungantwort nachgewiesen werden.

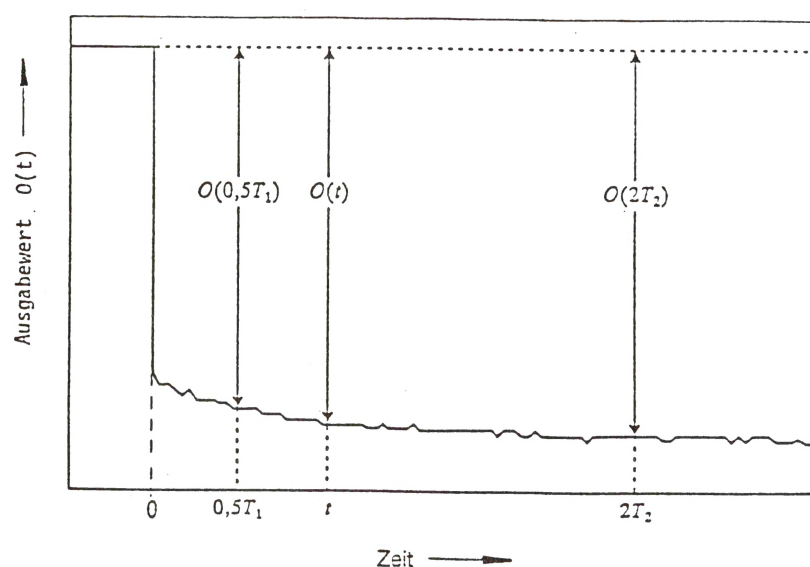


Bild 8: Ermittlung des Impuls-Maßstabsfaktors F_i aus der Sprungantwort nach IEC 1083-1

Interner Störpegel, Überlagerungen

Der interne Störpegel ist als Standardabweichung der Abtastwerte einer Gleichspannung definiert. Als zulässige Grenzwerte sind 0,4 % für die Stoßparametermessung und 0,1 % für die Vergleichsmessung, jeweils bezogen auf Vollaussteuerung, festgelegt.

Mit Überlagerungen sind niederfrequente Störungen gemeint, die z. B. von der Netzversorgung herrühren können. Sie werden ebenfalls bei Gleichspannung als halber Spitze-Spitze-Wert der Aufzeichnung ermittelt, wobei die Abtastfrequenz genügend klein sein muß und die hochfrequenten Störungen ausgefiltert werden. Die zulässigen Grenzwerte sind wiederum 0,4 % bzw. 0,1 %.

Störbeeinflussung (EMV)

Bei dieser Prüfung wird die elektromagnetische Störbeeinflussung der Aufzeichnung des Recorders mit Meßkabel ermittelt. Die Stoßform und die Versuchsbedingungen entsprechen weitgehend denen bei der Hochspannungsprüfung selbst. Das Meßkabel ist am teilerseitigen Ende entweder kurzzuschließen und zu erden oder mit seinem Wellenwiderstand abzuschließen. Die Amplitude der aufgezeichneten Störung darf nicht mehr als 1 % betragen, bezogen auf die Vollaussteuerung des für die Hochspannungsprüfung benutzten Bereiches.

Häufig ist die Störbeeinflussung weniger durch den Recorder als vielmehr durch das lange Meßkabel bestimmt. Mit doppelt geschirmten Kabeln und sorgfältigem Anschluß der Stecker werden im allgemeinen die Anforderungen erfüllt. Weitere Informationen zur elektromagnetischen Störbeeinflussung werden im Anhang A von IEC 1083-1 gegeben.

3 Kalibrierung mit Impulsen

Die Kalibrierung mit Impulsen wird als die allein anzuwendende Routine-Prüfung vor und nach dem täglichen Einsatz des Recorders bei Stoßprüfungen empfohlen. Damit wird der Impuls-Maßstabsfaktor F_i für die jeweilige Stoßform ermittelt und die Einhaltung der Fehlergrenzen für den Scheitelwert und die Zeitparameter überprüft.

Die Anforderungen an den Kalibrierimpulsgenerator selbst sind ebenfalls in IEC 1083-1 festgelegt. Bei einer Folge von 20 Pulsen darf der Mittelwert für den Scheitel und die einzelnen Zeitparameter um nicht mehr als 1 % bzw. 2 % vom wahren Wert abweichen (Langzeitfehler). Als Standardabweichung (Kurzzeitstabilität) sind maximal 0,2 % für den Scheitelwert und 1 % für die Zeitparameter zugelassen. Um die Recorder einschließlich Abschwächer routinemäßig kalibrieren zu können, sind Scheitelwerte bis zu etwa 1,5 kV erforderlich.

Außer zur Routinekalibrierung eignen sich Kalibrierimpulse auch zur Untersuchung der grundlegenden Meßeigenschaften von Digitalrecordern. Hierzu wurde in /10/ ein programmierbarer Funktionsgenerator eingesetzt, der die Kalibrierimpulse gemäß der eingegebenen Gleichung für volle und abgeschnittene Blitzstöße 1,2/50 und 0,84/60 mit einer Amplituden- und Zeitauflösung von 12 Bit bzw. 10 ns erzeugt. Wegen der begrenzten Ausgangsspannung des Funktionsgenerators wurden die Recorder im 5-V-Bereich, d. h. ohne zusätzlichen Abschwächer, betrieben.

Als Ergebnis der Kalibrierung zeigen die Bilder 9 und 10 die relativen Fehler der untersuchten Recorder (Tabelle 2) für den Scheitelwert (δ_U) und die Stirnzeit (δ_{T1}), wobei jeweils der Mittelwert von 20 Aufzeichnungen und die Extremwerte angegeben sind. Hierin sind jedoch auch die Fehler des Generators selbst enthalten. Diese betragen -0,3 % für den Scheitel voller Stöße infolge Fehlanpassung des Ausgangs- und Abschlußwiderstandes (Bild 9a) und -1 % bis -1,5 % für den Scheitelwert und die Stirnzeit der nach 0,5 ms abgeschnittenen Stöße auf Grund der begrenzten Zeitauflösung des Generators (Bilder 10a,b).

Recorder	Nennauflösung	Abtastrate 10^6 s^{-1}	Bandbreite MHz
A	10	250	200
B1/B2	8	200	100
C1/C2	12	5	2,5
D	10	200	100
E	10	100	20
F	8	1000	400

Tabelle 2: Nenndaten der untersuchten Digitalrecorder

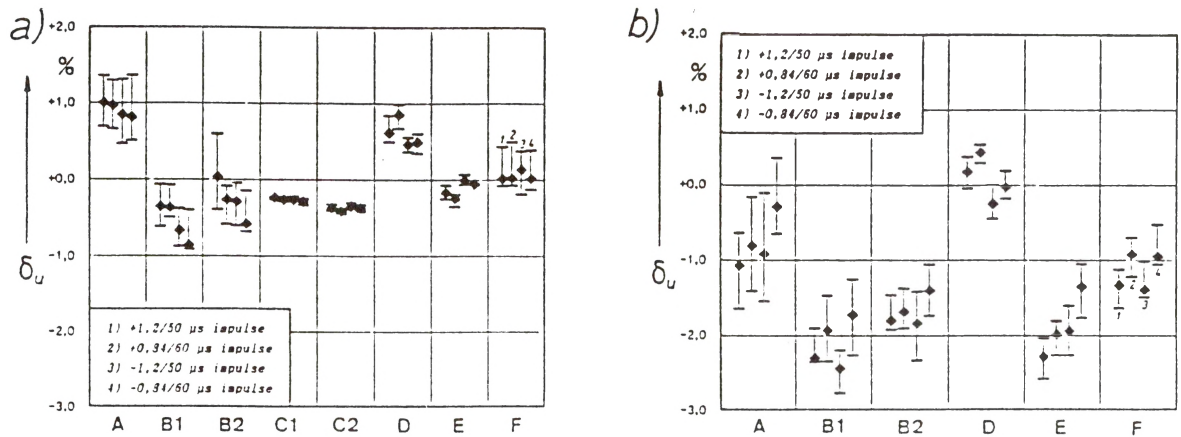


Bild 9: Scheitelwertfehler δ_U von Recordern bei der Messung von Blitzstößen /10/
a) voller Blitzstoß b) abgeschnittener Blitzstoß ($T_C = 0,5 \mu s$)

Die Bilder 9 und 10 enthalten eine Fülle von Informationen über die Recorder, auf die hier nur teilweise eingegangen werden kann. Ein wichtiges Qualitätskriterium von Digitalrecordern stellt die Streuung der Meßwerte dar, da bei Stoßspannungsprüfungen der Kurvenverlauf häufig nur einmal aufgezeichnet wird. Hierbei zeichnet sich der 12-Bit-Recorder mit den beiden Kanälen C1 und C2 aus, der allerdings wegen seiner geringen Abtastrate nur bedingt einsatzfähig ist. Daß es nicht allein auf die Nennauflösung ankommt, zeigt das Verhalten des 10-Bit-Recorders A, der aufgrund interner Rauschstörungen eine größere Streuung als die untersuchten 8-Bit-Recorder aufweist (Bild 9a,b).

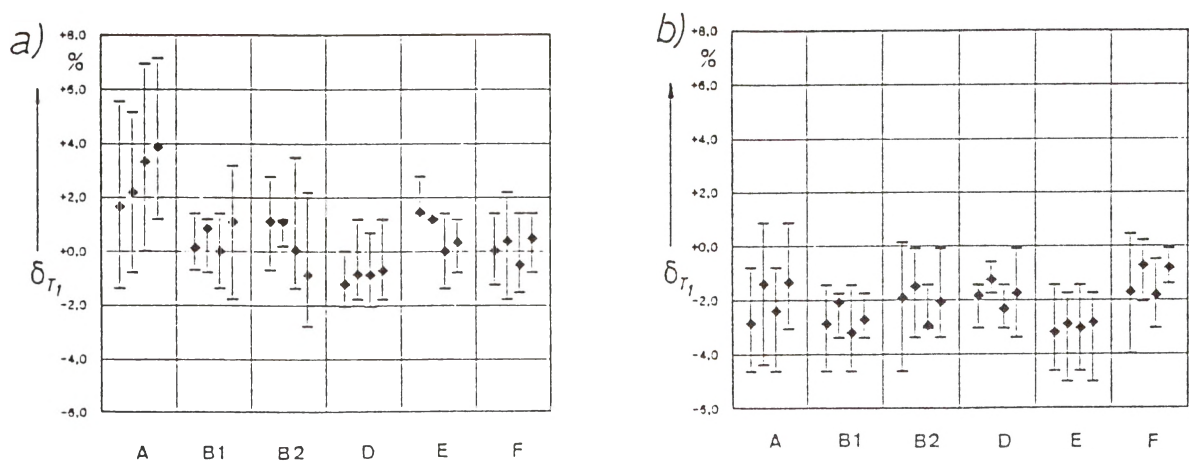


Bild 10: Stirnzeitfehler δ_{T1} von Recordern bei der Messung von Blitzstößen
($T_C = 0,5 \mu s$) /10/
a) voller Blitzstoß b) abgeschnittener Blitzstoß ($T_C = 0,5 \mu s$)

Ein weiteres Qualitätskriterium ist das dynamische Verhalten bei unterschiedlichen Impulsformen. Hierbei zeichnet sich Recorder F aus, der aufgrund seiner extrem hohen Abtastrate und Bandbreite zur genauen Messung voller und abgeschnittener Impulse gleich gut geeignet ist. Die anderen Recorder zeigen für abgeschnittene Stöße (Bild 10a) im Vergleich zu vollen Stößen (Bild 9a) zusätzliche Scheitelwert- und Stirnzeitfehler von -1 % bis -2 %. Diese entstehen dadurch, daß der sehr spitz verlaufende Scheitel der Kalibrierimpulse bei begrenzter Abtastrate nicht genau erfaßt oder bei geringer Bandbreite des Recorders abgerundet wird. Bei der eigentlichen Stoßprüfung wird jedoch der Stoßscheitel infolge des begrenzten Übertragungsverhaltens des Teilers gewöhnlich abgerundet, so daß die Meßfehler der Recorder im Scheitel geringer ausfallen.

Der 10-Bit-Recorder D überrascht zunächst dadurch, daß er trotz des negativen Abtastfehlers den Scheitelwert abgeschnittener Stöße offenbar zu groß mißt (Bild 10a). Dieses Verhalten ist in seinem Frequenzgang begründet, der oberhalb von 1 kHz bis zu einigen MHz kontinuierlich um mehrere Prozent ansteigt und dadurch zu einer entsprechenden Verstärkung der höherfrequenten Signalanteile führt. Dies bedeutet andererseits, daß der Maßstabsfaktor F_i von der Impulsform abhängt und daher auch nicht mit dem statischen Maßstabsfaktor F_s übereinstimmt.

4 Kalibrierung mit Sinus

Die Kalibrierung mit Sinusspannungen ist in IEC 1083-1 nicht vorgesehen, sie liefert jedoch ebenfalls wichtige Informationen über die Qualität der Recorder /10/. Die Frequenz der Sinusspannung wurde bei den Untersuchungen so gewählt, daß die Zeit zwischen den Sinuswerten bei -0,4 U und 0,8 U gleich dem Wert T_x des vollen Stoßes ist (Bild 11). Der Sinuskurve im Bereich von -U bis +U kann so eine dem Stoß äquivalente Stirnzeit T_1 zugewiesen werden. Für die beiden Stoßformen 1,2/50 und 0,84/60 berechnen sich die Frequenzen zu 295,9 kHz bzw. 422,8 kHz. Als Sinusgenerator wurde sowohl der für die Impulskalibrierung eingesetzte programmierbare 12-Bit-Funktionsgenerator als auch ein hochgenauer analoger Sinuskalibrator verwendet.

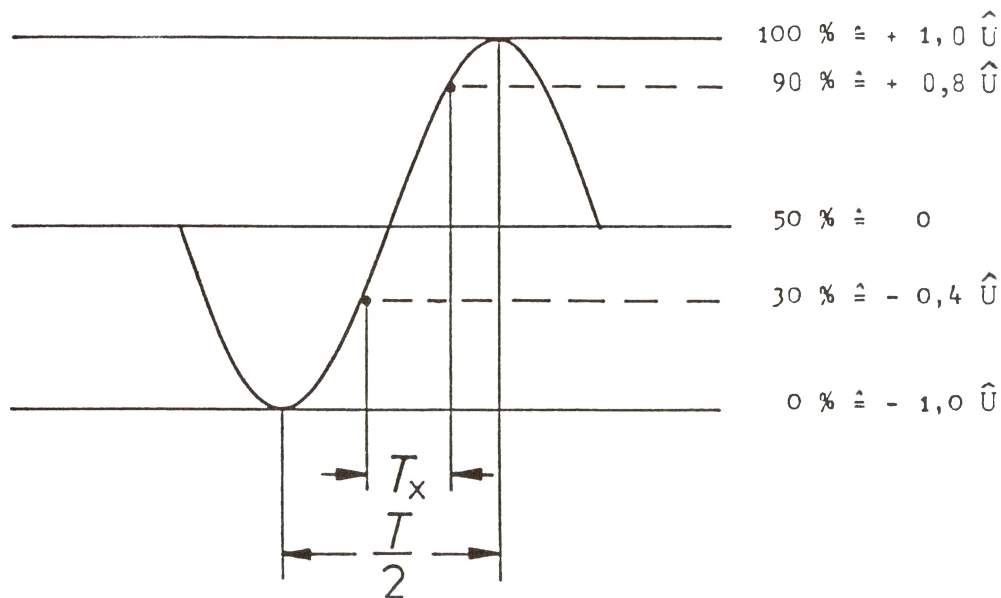


Bild 11: Sinusspannung der Periodendauer T mit äquivalenter Stirnzeit
 $T_1' = 1,67 T_x$

Die mit der Sinus-Kalibrierung ermittelten Amplituden- und Zeitfehler der Recorder sind in Bild 12 zusammengestellt. Die Ergebnisse bestätigen weitgehend die der Kalibrierung mit vollen Stößen in Bild 9. Die mit dem Funktionsgenerator ermittelten Amplitudenfehler der Recorder (Werte 1 und 2, Bild 12a) weichen um -0,2 % bis -0,3 % von den Werten ab, die mit dem genauen Sinusgenerator (Werte 3 und 4, Bild 12a) festgestellt wurden. Dies entspricht dem bereits erwähnten Eigenfehler des Funktionsgenerators. Für Recorder E

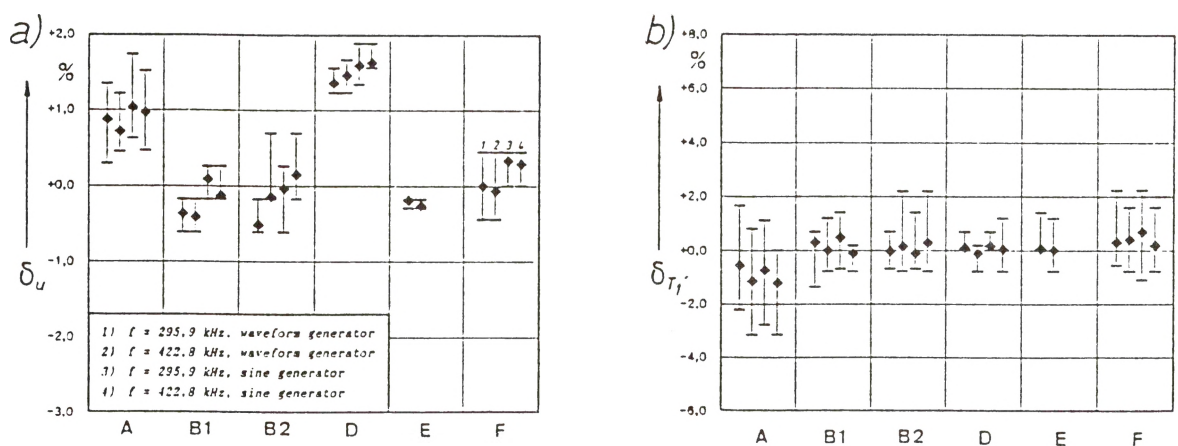


Bild 12: Kalibrierung von Recordern mit Sinusspannungen /10/

- a) Amplitudenfehler δ_U
 b) Äquivalenter Stirnzeitfehler $\delta_{T_1'}$

ergeben sich δ_U -Werte von ungefähr 1,5 %, d. h. die Amplituden werden um diesen Betrag zu groß gemessen, was wiederum mit dem Anstieg des Frequenzgangs dieses Recorders erklärt werden kann.

Das Verfahren zur Ermittlung der Zeitparameter T_x bzw. T_1 mit Sinusspannung ist meßtechnisch von besonderer Bedeutung. Die Sinusform läßt sich grundsätzlich sehr genau erzeugen und auch durch Oberschwingungs- und AC-DC-Transfermessungen kontrollieren, so daß bei vorgegebener Frequenz der berechnete Wert der äquivalente Stirnzeit eindeutig festgelegt und verläßlich ist. Die Kurvenform und damit die Stirnzeit der Kalibrierimpulse läßt sich dagegen nur mit Hilfe eines Digitalrecorders kontrollieren, der jedoch selbst nicht fehlerfrei ist.

5 Schlußfolgerungen

Die neue IEC-Publikation 1083-1 stellt die formale Voraussetzung und Grundlage für den normgerechten Einsatz von Digitalrecordern bei Stoßprüfungen an Betriebsmitteln der Energieversorgung dar. Sie enthält die Anforderungen und Kalibrierverfahren, die zur Einhaltung der Gesamtunsicherheit für den Scheitelwert und die Zeitparameter von Blitz- und Schaltstößen nach IEC 60 notwendig sind.

Die Mehrzahl der in IEC 1083-1 festgelegten Einzelanforderungen an einen Recorder wird im allgemeinen bereits durch die Herstellerangaben abgedeckt sein. Dem Anwender der Recorder im Hochspannungsprüffeld verbleiben dann in der Regel nur die Störfestigkeitsprüfung und die regelmäßige Routine-Kalibrierung zur Ermittlung bzw. Bestätigung des Impuls-Maßstabsfaktors F_i . Letztere kann bei Verwendung geeigneter Kalibrierimpulsgeneratoren einfach und schnell vorgenommen werden.

Mit der Impulskalibrierung lassen sich auch andere wichtige Eigenschaften eines Digitalrecorders ermitteln, z. B. die Streuung der Meßwerte und deren Abhängigkeit von der Impulsform. Die Untersuchungen zeigen, daß Recorder mit einer Nennauflösung von 10 Bit aufgrund interner Rauschstörungen oder eines frequenzabhängigen Frequenzganges weniger gut für Impulsmessungen geeignet sein können als ein 8-Bit-Recorder mit hoher Abtastrate und Bandbreite.

IEC 1083-1 enthält keine besonderen Anforderungen an Digitalrecorder, die in Referenzsystemen zur Kalibrierung anderer Meßsysteme entsprechend der zukünftigen Fassung von IEC 60 eingesetzt werden. Für Referenzsysteme darf die Gesamtunsicherheit 1 % für den Scheitelwert und 5 % für die Zeitparameter nicht überschreiten. Dies bedeutet, daß die Fehler eines Recorders im Referenzsystem noch niedriger liegen sollten.

Die Genauigkeit bei der Auswertung von Stoßspannungsmessungen mit Digitalrecordern läßt sich durch sorgfältige Anwendung besonderer Datenverarbeitungstechniken wie Interpolation und Glättung verbessern. Nähere Hinweise und Empfehlungen hierzu wird der zweite Teil der IEC-Publikation enthalten.

Literatur

- /1/ IEC 1083-1: Digital recorders for measurements in high-voltage impulse tests. Part 1: Requirements for digital recorders, 1991
- /2/ Schon, K.; Korff, H. und Malewski, R.: On the dynamic performance of digital recorders for hv impulse measurement. Proc. 4th ISH, Athen, 1983, Beitrag 65.05
- /3/ Malewski, R.; McComb, T.R. und Collins, M.C.C.: Measuring properties of fast digitizers employed for recording hv impulses. IEEE Trans IM, Vol. 32, 1983, S. 17-22
- /4/ Korff, H. und Schon, K.: Digitization errors of fast digital recorders. IEEE Trans. PAS, Vol. 36, 1987, S. 423-427
- /5/ McComb, T.R.; Kuffel, J.; Malewski, R. und Schon, K.: Qualifying an impulse digitizer for measurements in hv impulse tests. IEEE Trans. PWRD, Vol. 5, 1990, S. 1256-1265
- /6/ McComb, T.R.; Kuffel, J. und Malewski, R.: Measuring characteristics of the fastest commercially available digitizers. IEEE Trans. PWRD, Vol. 2, 1987, S. 661-670
- /7/ IEEE Std 1057: IEEE Trial-Use Standard for digitizing waveform recorders, 1989
- /8/ IEC 790: Oscilloscopes and peak voltmeters for impulse tests, 1984
- /9/ IEC 60: High-voltage test technique. Part 2: Measuring systems (under revision)
- /10/ Beyer, M. und Schon, K.: Calibration of digital recorders for hv impulse measurement. Proc. 7th ISH, Dresden, 1991, Beitrag 62.02
- /11/ Gobbo, R.; Pesavento, G.; Bolognesi, F.; Rizzi, G.: Accuracy assessment of digitizers under impulse conditions. Proc. Int. Symposium on Digital Techniques in HV Measurements, Toronto, 1991, S. 1-7 bis 1-11