

Auswerteverfahren bei der digitalen Messung von Hochspannungsimpulsen

E. Gockenbach

Schering-Institut für Hochspannungstechnik und Hochspannungsanlagen
Universität Hannover

1. Einleitung

Die zur Zeit gültigen Vorschriften [1 - 3] zur Messung von Hochspannungsimpulsen -, Blitzstoßspannung, Schaltstoßspannung, Blitzstoßstrom -, und deren Auswertung beruhen auf dem Einsatz von analogen Meßwerterfassungssystemen. Die Impulse, Spannung oder Strom, sind definiert durch ihren Scheitelwert und durch die entsprechenden Zeitparameter wie Stirnzeit und Rückenhalbwertzeit für die Blitzstoßspannung oder Scheitelzeit und Rückenhalbwertzeit für die Schaltstoßspannung. Die Auswertung dieser Parameter erfolgt durch einen erfahrenen Ingenieur anhand eines Oszillogrammes. Die Probleme dieser Art von Auswertung werden für Blitzstoßspannung und Schaltstoßspannung näher betrachtet, da in diesen beiden Impulsformen alle in den Vorschriften enthaltenen Auswertehilfe und -möglichkeiten enthalten sind wie Anwendung einer gemittelten Kurve, Bestimmung der Schwingungsfrequenz oder des Betrages des Überschießens im Scheitel der Blitzstoßspannung sowie Bestimmung der Scheitelzeit bei Schaltstoßspannung.

In vielen Hochspannungsprüflaboratorien werden heute bereits ausschließlich digitale Meßwerterfassungssysteme eingesetzt, da zahlreiche Untersuchungen gezeigt haben, daß bei entsprechenden Einsatzbedingungen die digitalen Erfassungssysteme gleich gut oder besser als die analogen Systeme sind [4 - 5]. Damit die digitalen Erfassungssysteme mehr als nur einen Ersatz für die analogen Systeme darstellen und entsprechend ihrer Fähigkeiten genutzt werden können, sind einige Maßnahmen erforderlich. Der Vorteil der automatischen Datenauswertung, Bearbeitung und Weiterverwendung z.B. beim Erstellen eines Prüfprotokolles kann nur dann optimal genutzt werden, wenn die Auswertung der digital erfassten Meßdaten fehlerfrei und reproduzierbar durch das Meßsystem selbst erfolgt. Es ist daher dringend notwendig, für die Auswertung der in den Vorschriften als Vorzugsstoßspannung und -stoßstrom definierten Impulsformen ein Auswerteverfahren festzulegen, daß durch eine einfache mathematische Formel oder ein einfaches Verfahren beschrieben werden kann und daß keine Bewertung des Prüfindgenieurs mehr erfordert. Die Auswertung muß außerdem leicht nachvollziehbar sein, um eine Kontrolle der Auswertung zu ermöglichen. Es ist selbstverständlich, daß für außergewöhnliche Impulsformen die automatische Auswertung nicht dringend benötigt wird, da in diesen Fällen das analoge Auswerteverfahren angewendet werden kann.

2. Eigenschaften des Meßwerterfassungssystemes

Ein Meßsystem für impulsförmige Größen hat die Aufgabe, den Impuls in seiner Amplitude und in seinem zeitlichen Verlauf fehlerfrei zu erfassen. Zur Bestimmung der Amplitude ist das Übersetzungsverhältnis von Bedeutung, das sich aus dem Übersetzungsverhältnis des Spannungsteilers und des Aufzeichnungsgerätes ergibt. Bei digitalen Meßwerterfassungssystemen ist in der Regel ein Eingangsteiler vorhanden, der die mit dem Spannungsteiler herabgesetzte Spannung nochmals herabsetzt, so daß sie dem digitalen Aufzeichnungsgerät zugänglich ist. Die Auflösung dieser Spannung bezüglich der Amplitude wird dann durch die Eigenschaften des Gerätes bestimmt und beträgt bei einem 8-bit -AD-Umsetzer 0.4 % und bei einem 10-bit-AD-Umsetzer 0.1 % (Nennwerte). Da die Amplitude mit einer Meßunsicherheit von ± 3 % bestimmt werden darf, kann der Einfluß der Auflösung des AD-Umsetzers

vernachlässigt werden. Eine Ausnahme stellt nur die Messung der Amplitude von abgeschnittenen Stoßspannungen dar, da bei dieser Impulsform die Abtastrate die Meßunsicherheit der Amplitude mitbeeinflusst.

Die Wiedergabe des zeitlichen Verlaufes des Impulses kann durch die Bandbreite des Meßsystems charakterisiert werden, das aus Spannungsteiler, Meßkabel, Eingangsteiler und Aufzeichnungsgerät besteht. Diese Aufzählung der Komponenten des Meßsystem ist beispielhaft für die Messung von Stoßspannungen, jedoch können je nach Meßaufgabe die Komponenten variieren. Bild 1 zeigt den Frequenzgang der wichtigsten Komponenten eines Meßsystems, wobei die Daten von üblichen Hochspannungsprüfeinrichtungen dargestellt sind.

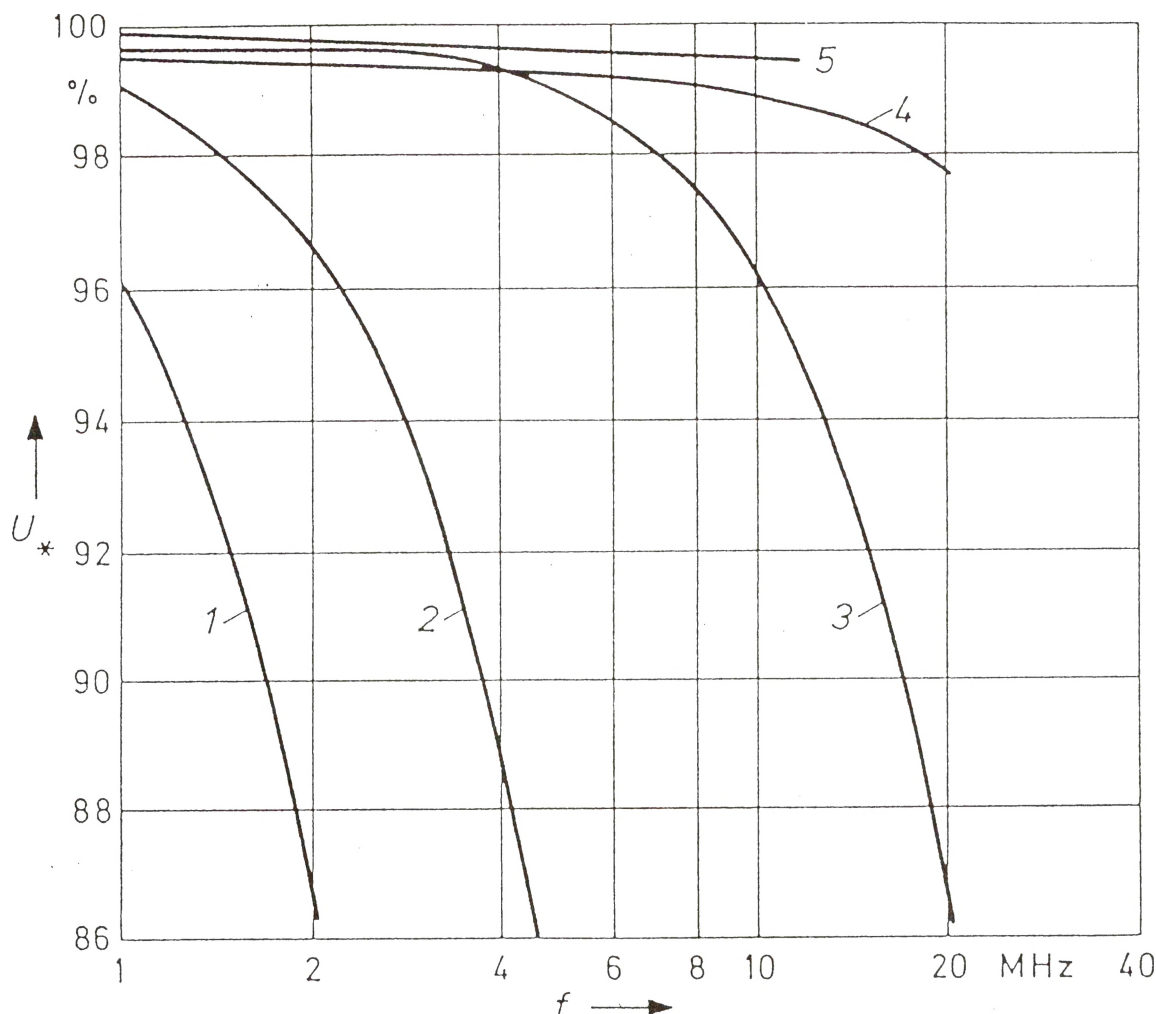


Bild 1 Frequenzgang der wichtigsten Komponenten eines Meßsystemes
 1 Shunt 2 Spannungsteiler 3 Oszilloskop
 4 8-bit-AD-Umsetzer 5 10-bit-AD-Umsetzer

Der Spannungsteiler ist das begrenzende Element eines Spannungsmeßsystemes. Der Ersatz des analogen Oszilloskopes durch einen AD-Umsetzer stellt keine Verschlechterung sondern sogar eine Verbesserung dar. Es muß einschränkend erwähnt werden, daß in Bild 1 nicht der Frequenzgang eines Eingangsteilers dargestellt ist, der im allgemeinen bei den digitalen Meßwerterfassungssystemen noch hinzukommt, bei den analogen Oszilloskopen jedoch bereits integriert ist. Der Frequenzgang dieses Eingangsteilers muß deutlich über dem des Hochspannungsteilers liegen, um das Übertragungsverhalten des gesamten Systemes nicht zu beeinflussen.

Bei der Beurteilung des Übertragungsverhaltens eines Meßsystemes ist das Frequenzspektrum des zu messenden Signales von ausschlaggebender Bedeutung. Bild 2 zeigt daher beispielhaft das Frequenzspektrum von einigen Stoßspannungsimpulsen mit unterschiedlicher Abschneidezeit.

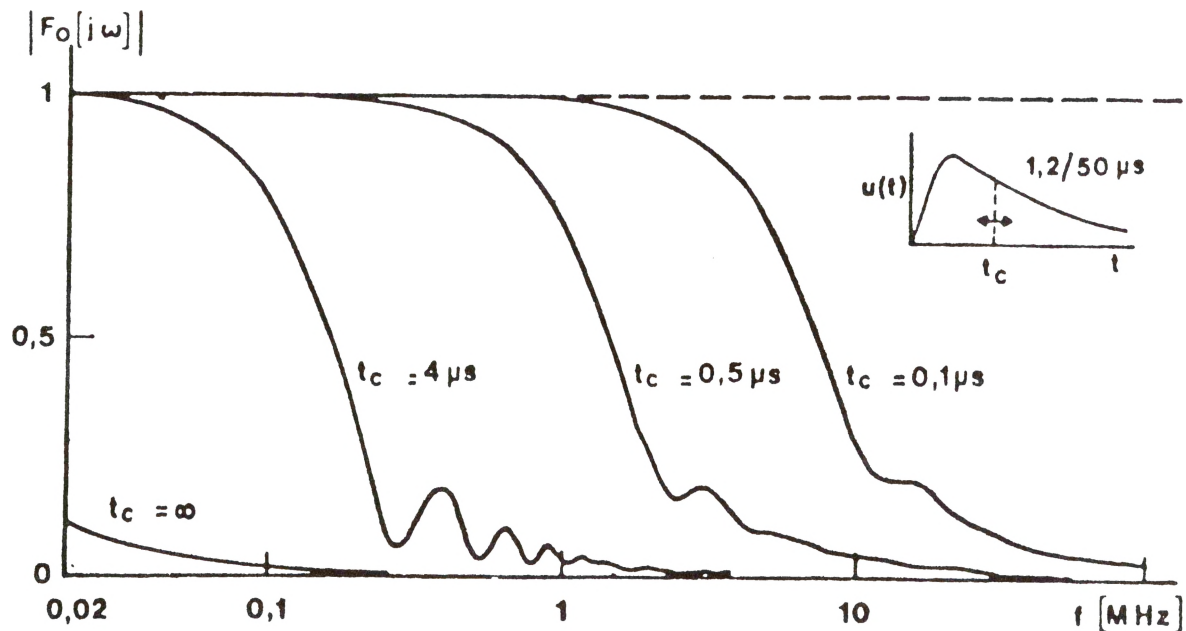


Bild 2 Frequenzspektrum von Blitzstoßspannungen mit unterschiedlicher Abschneidezeit

Zur Messung von vollen Blitzstoßspannungen ist ein Frequenzbereich bis ca. 200 kHz ausreichend, während für in der Front abgeschnittene Blitzstoßspannungen der Bereich bis auf ca. 10 MHz erweitert werden muß.

3. Eigenschaften des AD-Umsetzers

Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Eigenschaften des Meßsystems gelten für analoge und digitale Aufzeichnungssysteme gleichermaßen. Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Erfassungssystemen ist die Tatsache, daß bei der digitalen Aufzeichnung die Information über das zu messende Signal nur zu bestimmten Zeitpunkten, den Abtastzeitpunkten, bekannt ist und daß keine weiteren Informationen über das Signalverhalten zwischen diesen Abtastungen vorhanden ist. Eine vorhandene Schwingung wird von einem AD-Umsetzer nicht erkannt, während ein analoges System diesen Vorgang im allgemeinen mit einer gewissen Verfälschung durch die begrenzte Bandbreite darstellt. Es ist daher für die Auswertung des zeitlichen Verlaufes erforderlich, die Abtastrate des AD-Umsetzers so groß zu wählen, daß die gleiche oder eine geringere Meßunsicherheit als die der analogen Geräte erreicht wird. Die Forderung der Meßunsicherheit des gesamten Meßwerterfassungssystemes von $\pm 3 \%$ für die Amplitude hat zu einer Forderung von $\pm 2 \%$ Meßunsicherheit für das Aufzeichnungsgerät allein geführt [6 - 7], die mit einer Auflösung von 8-bit erreicht werden kann. Die entsprechende Forderung für $\pm 10 \%$ bei der Bestimmung der Zeitparameter ergibt eine Meßunsicherheit von $\pm 4 \%$ für das Aufzeichnungsgerät. Bei einer Blitzstoßspannung von $0,84 \mu s$ Stirnzeit und der damit verbundenen Meßzeit von ca. $0,5 \mu s$ ist eine Zeit von 20 ns zwischen zwei Abtastungen erforderlich, wenn lediglich die dem Referenzwert nächsten

Abtastungen zur Auswertung herangezogen werden und keine Interpolation zwischen den Abtastwerten erfolgt. Zur Vereinfachung wird in den Vorschriften die Formel

$$\text{Abtastrate} \geq \frac{30}{T_x} \quad (1)$$

verwendet, bei der T_x die zu messende Zeit darstellt. Diese Forderung ist jedoch in vielen Fällen zu streng, da die Abtastrate gemäß dieser Formel bei der kürzesten Stirnzeit der Vorzugsblitzstoßspannung $60 \cdot 10^6$ Abtastungen/s (= 60 Mabtastungen/s) betragen müßte. Zahlreiche Messungen haben jedoch gezeigt, daß eine geringere Abtastrate erlaubt ist, ohne die für die Bestimmung der Zeitparameter geforderte Meßunsicherheit zu überschreiten [8 - 9].

Der Einsatz von digitalen Meßsystemen ermöglicht jedoch durch mathematische Bearbeitung der Meßdaten eine Verbesserung der Diagnosemöglichkeiten, indem zum Beispiel bei einer Transformatorprüfung die Stromverläufe bei reduzierter und voller Blitzstoßspannung verglichen werden [10]. Dieser Einsatz erfordert eine höhere Auflösung in der Amplitude, die nur mit einem AD-Umsetzer von 9 bit oder mehr erreicht werden kann. Eine weitere Schwierigkeit ist die Messung von abgeschnittenen Blitzstoßspannungen, da bei dieser Spannungsform die Amplitudenauflösung und die Abtastrate in die Bestimmung des Scheitelwertes miteingehen. Es ergeben sich unter Berücksichtigung der Amplitudenauflösung und Abtastrate daher zwei Gruppen von AD-Umsetzern:

AD-Umsetzer für die Messung von Vorzugs-Stoßspannungen mit der Auswertung der charakteristischen Kenngrößen Scheitelwert, Stirnzeit oder Zeit bis zum Scheitelwert und Rückenhalbwertzeit mit einer Auflösung von 0.4 % für die Amplitude (8-bit) und einer Abtastrate von 40 Mabtastungen/s

AD-Umsetzer für Vergleiche von mehreren Aufzeichnungen mit einer Auflösung von 0.2 % für die Amplitude (9-bit) und einer Abtastrate von 60 Mabtastungen/s.

Diese Bedingungen sollen sicherstellen, daß mit einem AD-Umsetzer Stoßspannungen mit gleicher oder geringerer Meßunsicherheiten im Vergleich zum analogen Stoßspannungsszilloskop erfasst werden können. Die Eigenschaften des Aufzeichnungsgerätes wie Nichtlinearität der Amplitudenaussteuerung und der Zeitbasis, zulässige Störbeeinflussung und interner Störpegel sind im analogen und digitalen System gleichermaßen zu beachten. Ihre Auswirkungen auf die Auswertung ist jedoch stark vom angewandten Auswerteverfahren abhängig und muß daher insbesondere bei digitalen Systemen beachtet werden, wenn die Auswertung durch einen Rechner mit Hilfe eines Algorithmus erfolgen soll.

4. Anforderungen an die Genauigkeit von Impulsmessungen

Die Vorschriften für den Einsatz von AD-Umsetzern in der Hochspannungsprüftechnik fordern einen Gesamtfehler von $\leq 2 \%$ für die Messung des Scheitelwertes und $\leq 4 \%$ für die Messung der Zeitparameter. Diese Fehlergrenzen sind ohne Datenbearbeitung der Rohdaten einzuhalten, wobei bereits in den Vorschriften erwähnt wird, daß eine Datenbearbeitung die Auswertegenauigkeit erhöhen kann. Zur Einhaltung dieser Fehlergrenzen werden Einzelfehlergrenzen angegeben, die überschritten werden dürfen unter der Annahme, daß der Gesamtfehler die geforderten Grenzwerte nicht überschreitet. Die Einzelfehler können im Hinblick auf den Einsatz von digitalen Systemen in drei Gruppen eingeteilt werden.

Fehler, die in analogen und digitalen Systemen mit gleicher Bedeutung auftreten:

- statische integrale Nichtlinearität der Amplitudenaussteuerung
- integrale Nichtlinearität der Zeitbasis
- dynamischer Maßstabsfaktor
- Anstiegszeit

Fehler, die in digitalen Systemen stärker hervortreten:

- interner Störpegel
- zulässige Störbeeinflussung

Fehler, die nur in digitalen Systemen vorhanden sind:

- Abtastrate (siehe Gl. 1)
- Nennauflösung
- differentielle Nichtlinearität der Amplitudenaussteuerung
- differentielle Nichtlinearität der Zeitbasis (Unsicherheit des Abtastintervalles)
- Datenauswertung

Beim Einsatz von digitalen Meßsystemen ist daher zu prüfen, ob die Grenzen der Einzelfehler eingehalten werden oder ob durch Überschreiten der Einzelfehlergrenzen der Gesamtfehler nicht unzulässig groß wird.

5. Auswertung des Scheitelwertes

Die Nulllinie eines Stoßspannungsimpulses ist in den Vorschriften unter Berücksichtigung des Offsets als der Mittelwert von mindestens 10 Abtastwerten im waagerechten Anfangsverlauf der Meßwertaufzeichnung festgelegt. Da in diesem Zeitbereich nur der interne Störpegel eine Rolle spielt, kann als größter Fehler der Wert der Einzelfehlergrenzen von 0.4 % für AD-Umsetzer für Messung von Stoßparametern und 0.1 % für AD-Umsetzer für Vergleichsmessungen angenommen werden. Dieses entspricht einer Fehlergrenze von ± 1 bit, die von guten AD-Umsetzern ohne Probleme eingehalten wird, so daß durch die Bestimmung der Nulllinie nur ein sehr kleiner Fehlerbetrag zu erwarten ist.

Die Bestimmung des Scheitelwertes für volle Stoßspannungen hängt vom internen Störpegel, der Nennauflösung und der differentiellen Nichtlinearität der Amplitudenaussteuerung ab. Diese Aussage gilt unter der Annahme, daß die zulässige Störbeeinflussung durch geeignete Maßnahmen nicht überschritten wird, die Abtastrate hinreichend hoch genug ist und damit keinen Einfluß auf die Amplitudenbestimmung hat, und daß die integrale Nichtlinearität der Amplitude innerhalb der erlaubten Grenzen liegt. Bild 3 zeigt den Fehler in der Bestimmung des Scheitelwertes für einen 8-bit-AD-Umsetzer bei einem internen Störpegel von ± 0.5 %, einer statischen integralen Nichtlinearität von ± 0.5 % und einer differentiellen Nichtlinearität von $\pm 0.8 \cdot$ mittlerer Quantisierungsschritt in Abhängigkeit der Abtastrate. Die Meßbereichsausnutzung beträgt bei dieser Simulation eines AD-Umsetzers 60 % und stellt damit den ungünstigsten Fall dar.

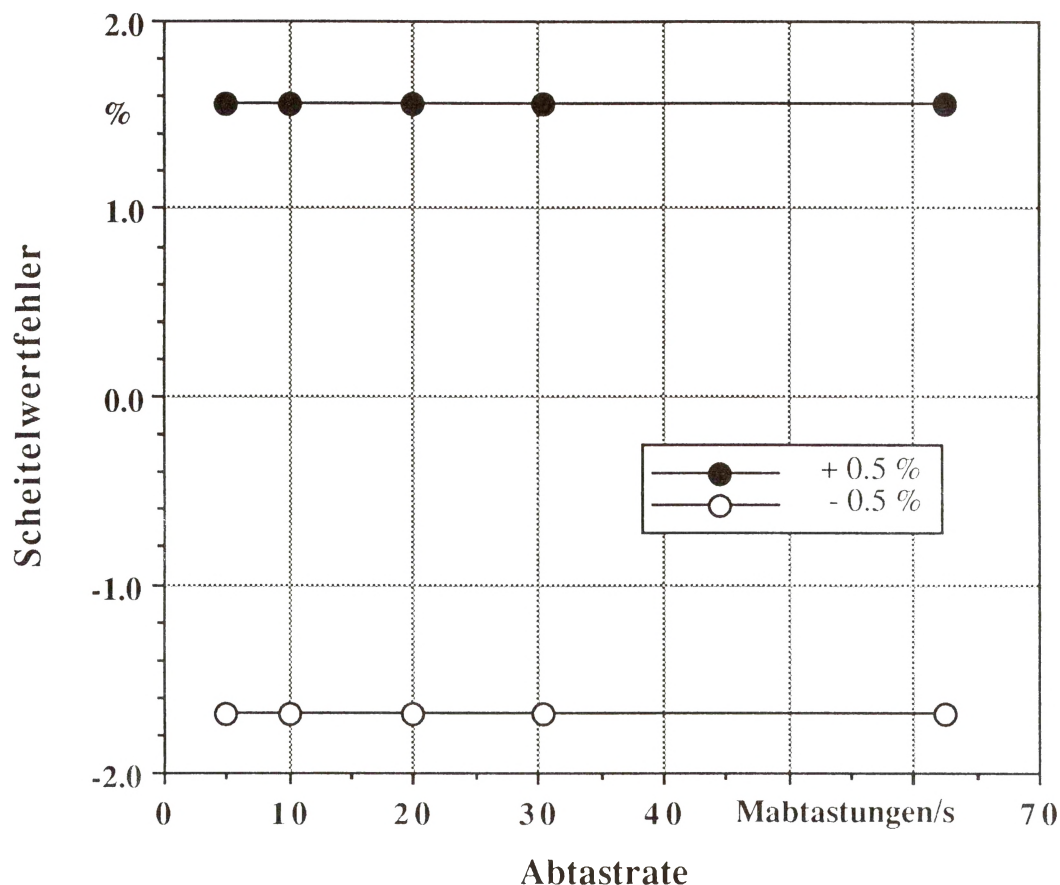


Bild 3 Fehler bei der Bestimmung des Scheitelwertes in Abhängigkeit der Abtastrate

Die Addition der Einzelfehler ergibt für den gesamten untersuchten Bereich der Abtastrate einen Gesamtfehler, dessen Wert innerhalb der in den Vorschriften geforderten Grenzen ($\pm 2\%$) liegt.

Die Auswertung des Scheitelwertes für abgeschnittene Blitzstoßspannungen wird zusätzlich und hauptsächlich durch die Abtastrate beeinflusst unter der Voraussetzung, daß der Spannungszusammenbruch durch die begrenzte Abtastrate nicht richtig erfasst werden kann. Für eine zwischen $0.5\ \mu\text{s}$ und $2\ \mu\text{s}$ abgeschnittene Blitzstoßspannung ist eine Meßunsicherheit des gesamten Meßsystems von $\pm 5\%$ für den Scheitelwert zulässig. In Anlehnung an die Zuteilung der Fehler auf die verschiedenen Komponenten eines Meßsystems für die Bestimmung des Scheitelwertes kann für in der Front abgeschnittene Blitzstoßspannungen ein Fehler von $\pm 3,3\%$ für das Erfassungsgerät allein eingesetzt werden. Der größte Fehler bei der Bestimmung des Scheitelwertes entsteht dann, wenn der Spannungszusammenbruch unmittelbar vor einer Abtastung erfolgt, da dann der Scheitelwert durch die Amplitude der letzten Abtastung bestimmt wird. Bei linearem Spannungsanstieg ergibt das einen Fehler von

$$\Delta U = S \cdot \Delta T \quad (2)$$

wenn mit S die Steilheit des Spannungsanstieges und mit ΔT die Zeit eines Abtastintervalles bezeichnet wird. Mit den gegebenen Fehlergrenzen ergibt sich ein Abtastintervall von höchstens

16,5 ns bzw. eine Abtastrate von mindestens 60 Mabtastungen/s. Diese Forderung wird aber von den AD-Umsetzern erfüllt, die für Vergleichsmessungen geeignet sind. Da in der Hochspannungstechnik sehr häufig die Geräte durch Vergleichsmessungen qualifiziert werden, die auch mit abgeschnittenen Blitzstoßspannungen geprüft werden, entsteht keine Verschärfung der Bedingungen an das digitale Meßsystem durch in der Front abgeschnittene Blitzstoßspannungen.

6. Auswertung der Zeitparameter

Bei der Auswertung der Zeitparameter wird ebenfalls vorausgesetzt, daß die Auswertung durch einen Rechner und nicht anhand eines Datenausdruckes von einem Prüfenieur ausgeführt wird. Die zur Zeit vorhandenen Vorschriften für AD-Umsetzer in der Hochspannungsprüftechnik [6 - 7] geben nur teilweise Verfahren zur Auswertung an. Die Forderung, daß die Meßunsicherheit der zur Datenauswertung benutzten Methode nicht mehr als 1 % des ausgewerteten Parameters betragen darf, ist unklar und muß in der Vorschrift für Auswertverfahren besser formuliert werden. Bei Integration genormter Auswertverfahren in vorhandene Auswertprogramme liegt der große Vorteil in der vom Ingenieur unabhängigen Auswertung, der Reproduzierbarkeit und der Nachvollziehbarkeit. Für die Festlegung der Auswertverfahren sind bereits IEC und IEEE Arbeitsgruppen tätig, so daß neben den vorhandenen Vorschriften über die erforderlichen Eigenschaften des Meßsystems auch bald Vorschriften über Auswertverfahren verfügbar sein werden.

Die Schwierigkeiten der Zeitparameterauswertung bei digital erfassten Stoßspannungsimpulsen und mögliche Lösungsvorschläge sollen an den Beispielen

- Bestimmung des 30 % - Wertes
- Bestimmung des 90 % - Wertes
- Bestimmung des Überschießens
- Bestimmung der Scheitelzeit

dargestellt werden.

6.1 Bestimmung des 30 % - Wertes

Bei der Bestimmung des 30 % - Wertes als einen Punkt der Zeitspanne gemäß der Definition der Stirnzeit wird zunächst angenommen, daß der Stoßspannungsimpuls keine Schwingungen und kein Überschießen aufweist, so daß der Scheitelwert mit dem 100 % - Wert identisch und dieser Wertes nur mit der erlaubten Meßunsicherheit behaftet ist. Weiterhin wird angenommen, daß kein Abtastwert mit dem Referenzwert übereinstimmt. Diese Annahmen sind technisch sinnvoll und schränken in keinem Fall die Aussagen über Lösungsmöglichkeiten ein.

In den Vorschriften wird gefordert, daß zur Bestimmung des 30 % - Wertes die Zeit desjenigen Abtastwertes eingesetzt wird, der dem Referenzwert (30 % des Scheitelwertes) am nächsten liegt. Um diesen Abtastwert zu ermitteln, ist eine lineare Interpolation zwischen den beiden dem Referenzwert am nächsten liegenden Abtastungen erforderlich. Es ist daher sinnvoll, die lineare Interpolationsmethode gleichzeitig für die Bestimmung des 30 % - Wertes zu benutzen. In Bild 4 ist der Verlauf der Stoßspannung zwischen zwei Abtastungen dargestellt. Der Abtastwert i ist der dem Referenzwert am nächsten liegende, so daß die dazugehörige Zeit gemäß IEC Vorschrift zur Bestimmung der Stirnzeit verwendet wird. Eine lineare Interpolation zwischen den Abtastungen i und $i+1$ ergibt als 30 % - Wert den Mittelwert der zu den Abtastungen i und $i+1$ gehörigen Zeiten. Die Differenz zwischen dem wahren Zeitpunkt des 30 % - Wertes und dem nach IEC ermittelten Wert liegt zwischen 0 und 100 % eines Abtastintervalles, während die Differenz unter Anwendung der linearen Interpolation nur zwischen 0 und 50 % liegt.

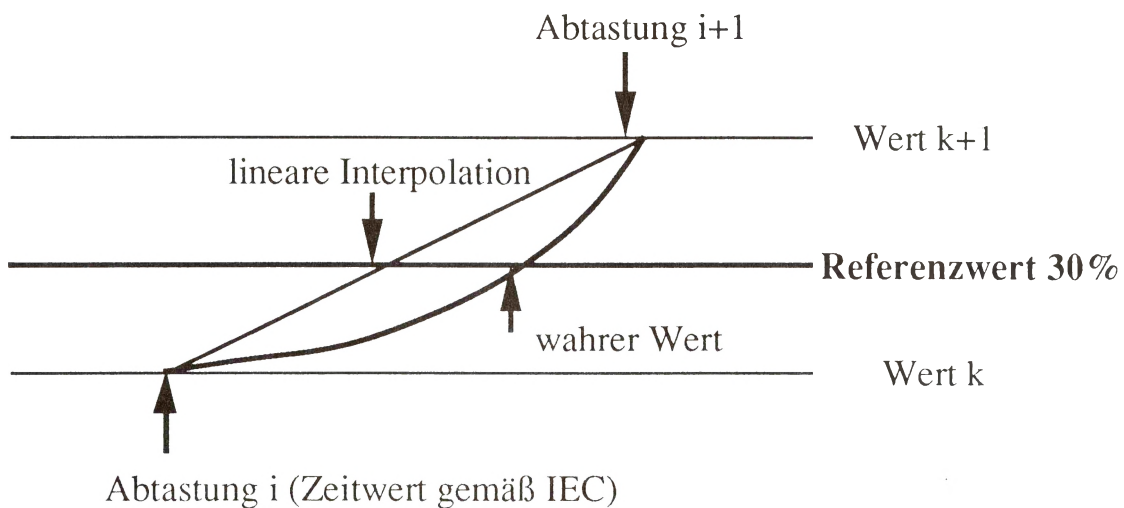


Bild 4 Auswertung des 30 % - Wertes mit und ohne lineare Interpolation (IEC)

Die Anwendung der linearen Interpolation ist bereits für die Auswahl des entsprechenden Abtastpunktes erforderlich, sie reduziert den Auswertefehler um den Faktor 2 und macht die Auswertung unempfindlicher gegen zufällige Störeinflüsse.

6.2 Bestimmung des 90 % - Wertes

Bei der Bestimmung des 90 % - Wertes ist zusätzlich zu beachten, daß bei hinreichender Abtastrate zwei oder mehr Abtastwerte denselben Bit-Level besitzen, so daß durch eine interne Störung der Zeitwert um ein Abtastintervall verschoben werden kann. Bild 5 zeigt die Auswertung des 90 % - Wertes mit und ohne lineare Interpolation.

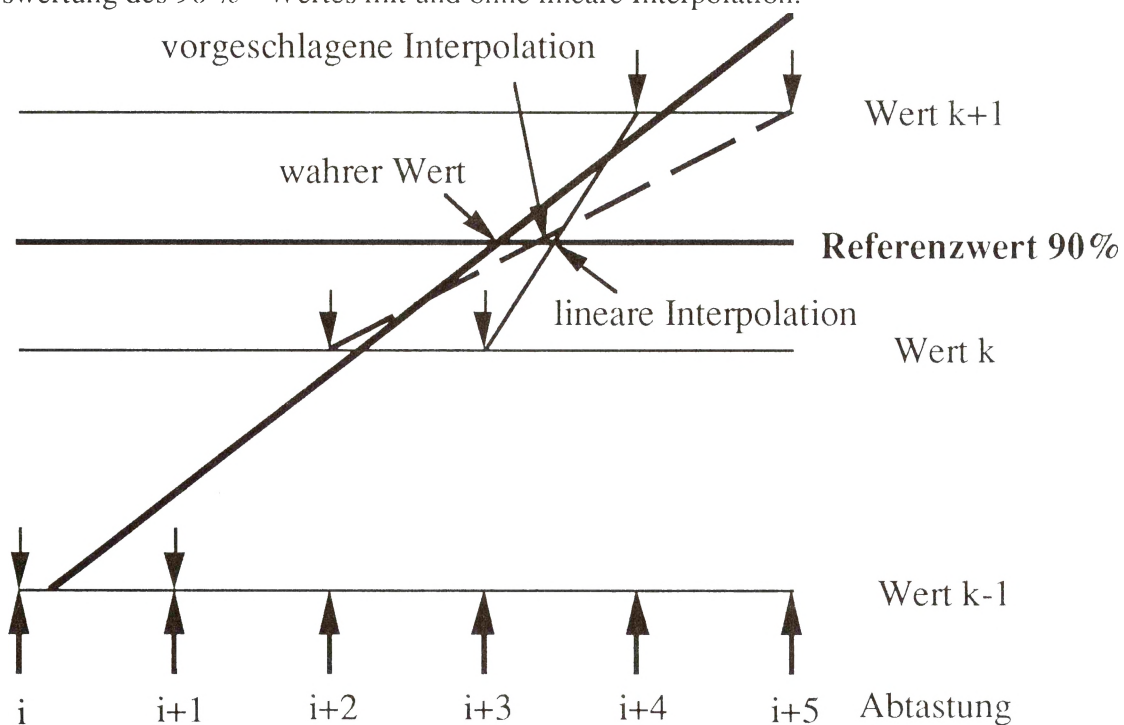


Bild 5 Auswertung des 90 % - Wertes mit und ohne lineare Interpolation (IEC)

Der wahre Impulsverlauf wird durch eine Gerade dargestellt, die Pfeile stellen die Abtastungen mit ihren jeweiligen Amplituden dar. Im dargestellten Beispiel haben immer zwei Abtastungen dieselbe Amplitude. Unter der Annahme, daß die Auswertung den Fall mehrerer Abtastungen mit gleicher Amplitude berücksichtigt, wird nach IEC die Abtastung (i+3) als 90 % - Wert bestimmt, da der 90 % Referenzwert kleiner ist als der Mittelwert der Amplituden k und (k+1). Wird jedoch die Abtastung (i+3) oder (i+4) durch einen Fehler des Meßsystems so verändert, daß die Amplitude um einen Wert steigt oder fällt, verschiebt sich unmittelbar der 90 % - Wert um den Betrag eines Abtastintervalles. Wenn in Bild 5 die Abtastung (i+3) vom Wert k auf (k+1) springt, dann wird die Abtastung (i+2) als 90 % - Wert ermittelt. Erfolgt die Abtastung (i+4) beim Wert k wird dieser Abtastwert zur Berechnung der Stirnzeit verwendet. Die vorgeschlagene Interpolation zwischen der ersten Abtastung des Wertes k und der letzten Abtastung des Wertes (k+1) ist eine weitere Verbesserung der einfachen linearen Interpolation zwischen den beiden beachteten Abtastungen. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der größeren Unempfindlichkeit des Meßsystems auf Fehler, denn die beschriebenen Veränderungen der Abtastungen (i+3) und (i+4) bleiben ohne Einfluß auf die Auswertung. Eine Änderung der Abtastungen (i+2) und (i+5) hat einen geringen Einfluß auf die Auswertung, wobei berücksichtigt werden muß, daß die Wahrscheinlichkeit der Beeinflussung durch Fehler bei den am nächsten liegenden Abtastungen (i+3) und (i+4) am größten ist.

6.3 Simulation der Stirnzeitauswertung

Die Beeinflussung der verschiedenen Einzelfehler auf die Auswertung der Stirnzeit wird anhand einer Simulation einer Vorzugsblitzstoßspannung mit einer Stirnzeit von $0.8391 \mu\text{s}$ näher untersucht.

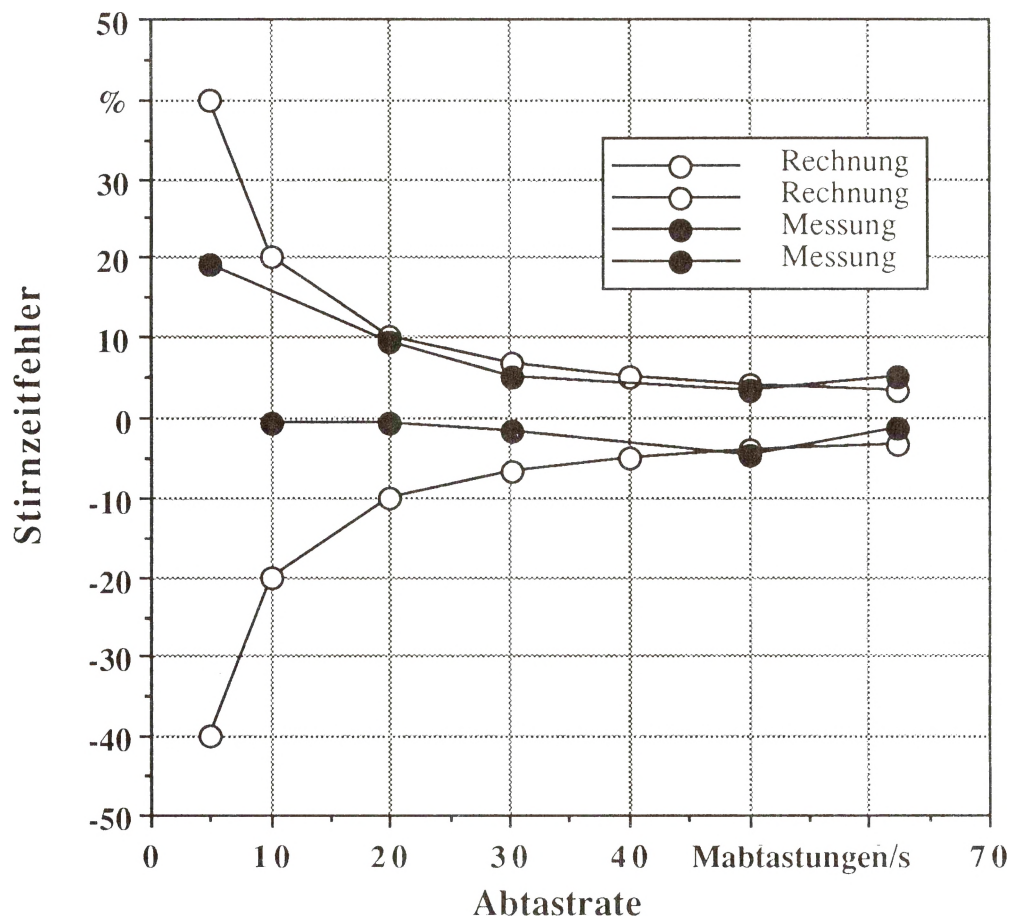


Bild 6 Stirnzeitfehler durch internen Störpegel in Abhängigkeit der Abtastrate bei Auswertung nach IEC

Da beim IEC Auswerteverfahren der Einfluß des internen Störpegels am größten ist, wird die Simulation dieses Einzelfehlers durch Vergleich mit den berechneten Werten geprüft. Das in Bild 6 dargestellte Ergebnis zeigt, daß bei niedrigen Abtastraten mit der Auswertemethode nach IEC nur jeweils ein Wert für die Frontzeit ermittelt werden kann und daß der Einfluß des internen Störpegels erst bei höheren Abtastraten zur Geltung kommt. Eine Änderung des Stirnzeitfehlers wird somit bei niedrigen Abtastraten nur durch die Verschiebung der Abtastzeitpunkte durch den Triggerzeitpunkt beeinflusst.

Da die Auswertung der Stirnzeit nach der Methode der linearen Interpolation sehr viel unempfindlicher gegenüber dem internen Störpegel ist, wird bei den folgenden Simulationen die jeweils zulässige Grenze der Einzelfehler wie interner Störpegel und Nichtlinearitäten angenommen. Bild 7 zeigt zum Vergleich die Häufigkeit der verschiedenen Stirnzeitfehler bei der Bestimmung der Stirnzeit mit linearer Interpolation und nach der IEC Methode.

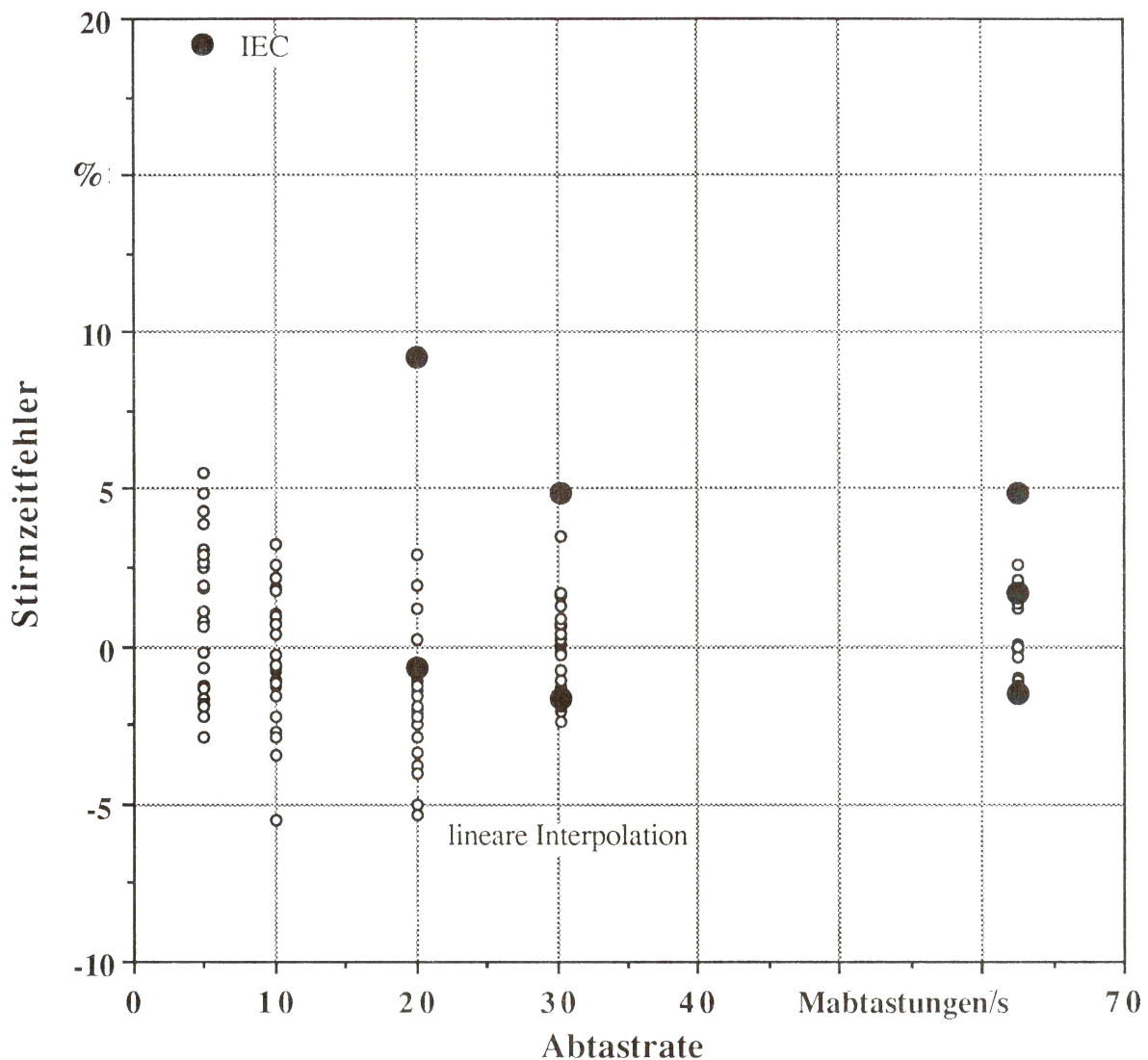


Bild 7 Fehlerhäufigkeit in der Stirnzeitauswertung in Abhängigkeit der Abtastrate

Der Fehlerbetrag bei Anwendung der linearen Interpolation ist bereits bei niedrigen Abtastraten sehr viel kleiner im Vergleich zur IEC Methode. Weiterhin ist die Verteilung der Fehler im gesamten Fehlerbereich sehr gleichmäßig, so daß die Simulation als ausreichend angesehen

werden kann. Bei Abtastraten über 30 Mabtastungen/s sind die Fehlerbereiche etwa deckungsgleich und die Simulation ist für beide Auswerteverfahren geeignet. Bei einer Abtast-rate von 62.5 Mabtastungen/s zeigt sich jedoch, daß durch die Zunahme der Abtastrate der Fehler in der Stirnzeit nicht kleiner geworden ist. Die Ursache liegt darin, daß die Auswertung nach IEC sehr empfindlich auf das Vorhandensein von zwei Abtastungen auf gleichem Bit-Level reagiert, wie es bereits in Bild 5 dargestellt. Unter der Annahme, daß durch lineare Interpolation der Stirnzeitfehler um den Faktor 2 bei alleiniger Berücksichtigung des internen Störpegels (Bild 6) reduziert werden kann, ist in Bild 8 der Vergleich zwischen Annahme und Messung dargestellt. Die lineare Interpolation hat eine Abnahme des Stirnzeitfehlers mit steigender Abtastrate zur Folge. Es bestätigt sich weiterhin die Forderung, daß zur Messung von Stoßparametern eine Abtastrate von 40 Mabtastungen/s ausreichend ist.

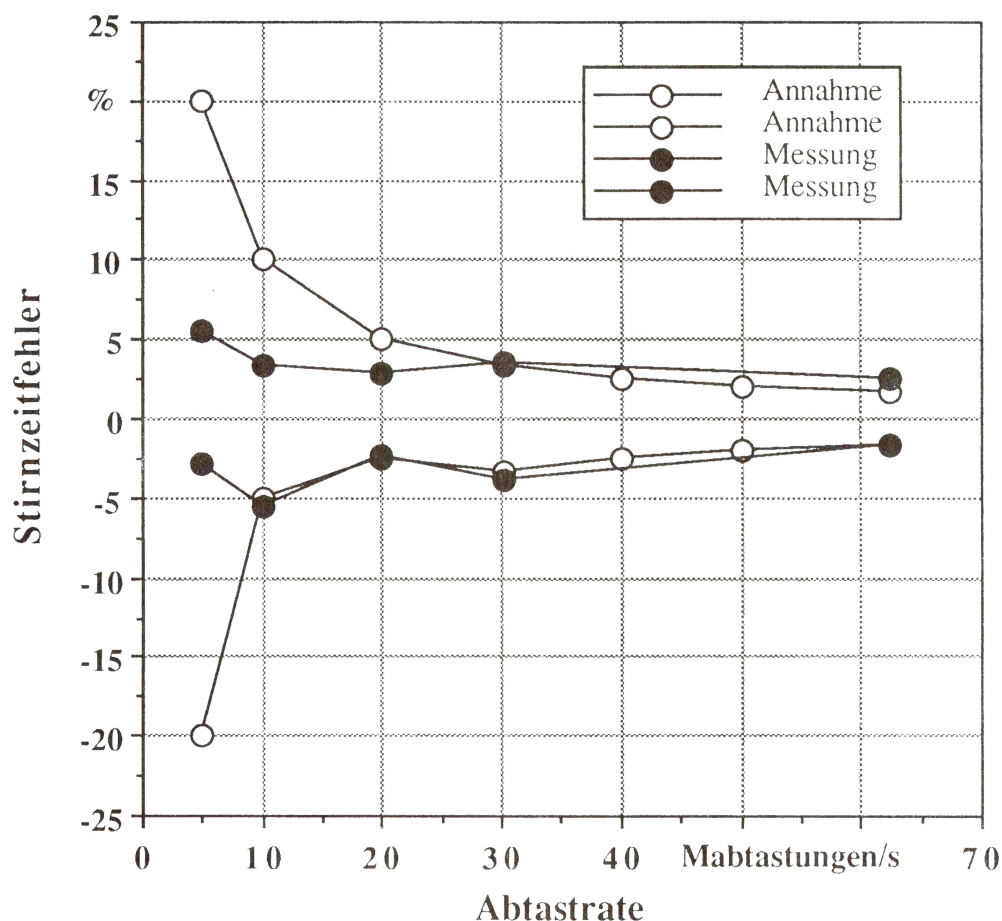


Bild 8 Stirnzeitfehler in Abhängigkeit der Abtastrate bei Auswertung mit linearer Interpolation

Eine Abschätzung der Einflußwahrscheinlichkeit der verschiedenen Einzelfehler auf die Stirnzeit soll anhand des internen Störpegels erfolgen. Bei einer Abtastrate von 20 Mabtastungen/s liegt im Bereich des 30 % - Wertes die Steilheit bei 20 bit pro Abtastintervall und im Bereich des 90 % - Wertes bei 3 bit pro Abtastintervall. Die Wahrscheinlichkeit der Beeinflussung des 90 % - Wertes ist damit sehr hoch, die des 30 % - Wertes sehr niedrig. Bei einer Abtastrate von 40 Mabtastungen/s ergeben die entsprechenden Werte 9 bit pro Abtastintervall für den 30 % - Wert und 1.5 bit pro Abtastintervall für den 90 % - Wert. In diesem Fall wird ein interner Störpegel von 0.4 % oder 1 bit den 90 % - Wert und damit auch die Stirnzeit beeinflussen.

7. Bestimmung der Zeitwerte bei Schwingungen

Bei der Bestimmung der Zeitwerte für Kurven mit Schwingungen in der Front oder im Bereich der Stirn ist der Einfluß der Auswerteverfahren noch größer. In Bild 9 ist als Beispiel ein Impuls mit einer Schwingung im Bereich des 30 % - Wertes dargestellt. Die durchgezogene Kurve stellt den wahren Kurvenverlauf dar, die gestrichelte Gerade den nach gültigen Vorschriften mehr oder weniger frei wählbaren Mittelwert.

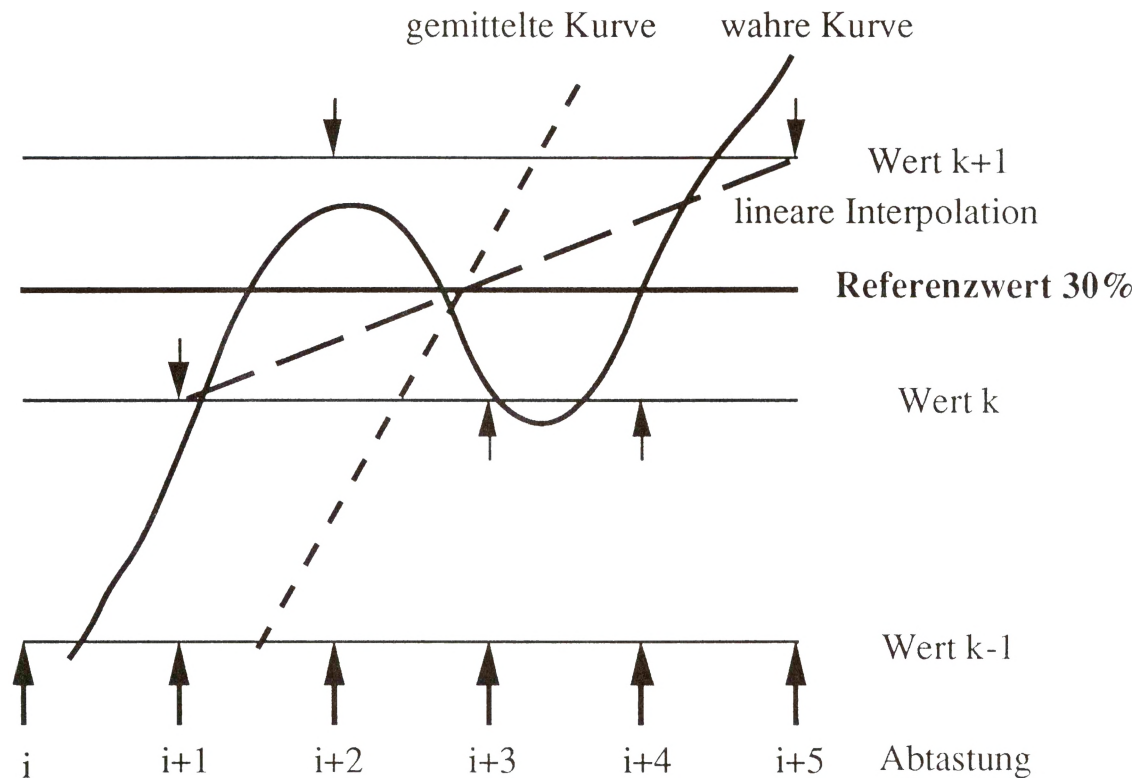


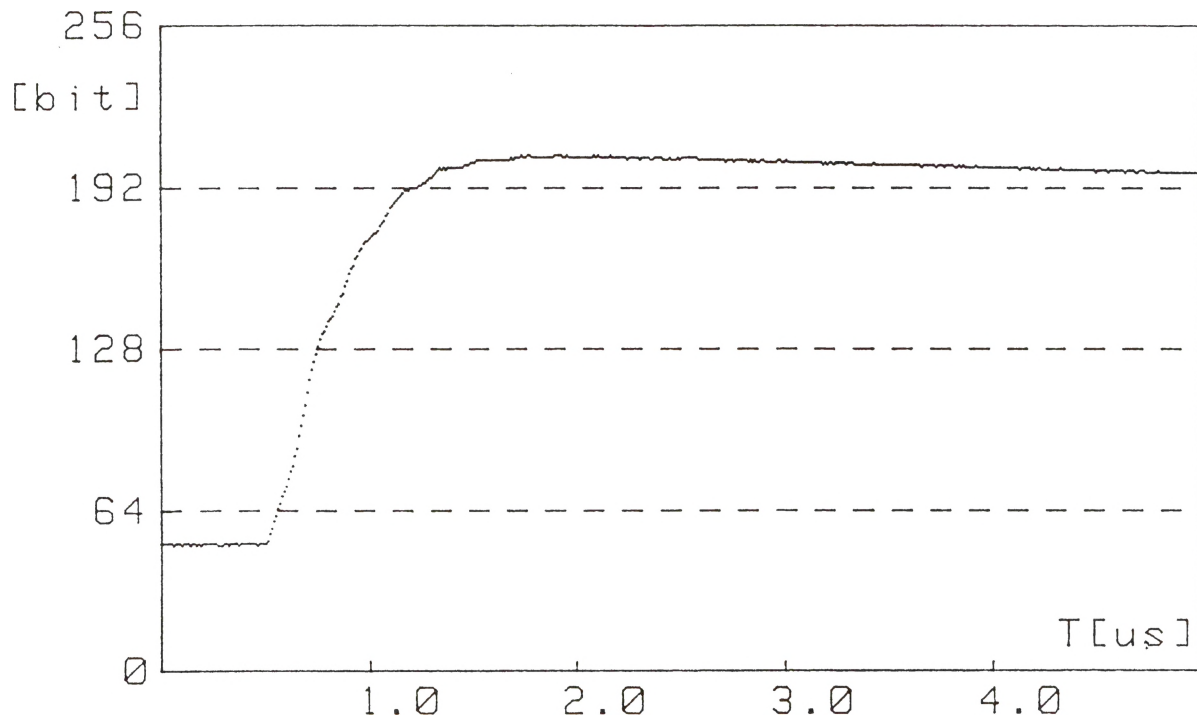
Bild 9 Auswertung des 30 % - Wertes bei einem Impuls mit Schwingungen

Die gemittelte Kurve ist nicht mit einer mathematischen Gleichung zu beschreiben, bei der als Kriterium die beste Annäherung an den wahren Kurvenverlauf verwendet wird [11 - 12]. Es ist daher zwingend notwendig, Auswerteverfahren zu definieren, die den Fehler möglichst klein halten und sehr gut reproduzierbar und nachvollziehbar sind.

Im dargestellten Beispiel sind gemäß dem IEC Kriterium die Abtastungen $(i+1)$ und $(i+4)$ gleichwertig unter der Voraussetzung, daß der Referenzwert unterhalb des Mittelwertes der Werte k und $(k+1)$ liegt. Die Auswertung beginnend mit der Abtastung $i = 0$ zu steigenden Werten von i ergibt als 30 % - Wert die Abtastung $(i+1)$, die Auswertung beginnend am höchsten Abtastwert des gemessenen Impulses mit abnehmenden Werten von i ergibt den Abtastwert $(i+4)$. Die daraus sich ergebende Differenz von drei Abtastintervallen allein durch den Startpunkt des Auswerteverfahrens hat bei einer Abtastrate von 40 Abtastungen/s einen Fehler von 15 % in der Stirnzeit zur Folge. Die Anwendung der einfachen linearen Interpolation zwischen den dem Referenzwert am nächsten liegenden Abtastungen bringt in diesem Fall auch keine Verbesserung, da die zwei Mittelwerte sich ebenfalls um drei Abtastintervalle voneinander unterscheiden. Für das im Bild 9 dargestellte Beispiel ergibt die einfache lineare Interpolation den Mittelwert zwischen den Abtastungen $(i+1)$ und $(i+2)$ bzw. den Abtastungen $(i+4)$ und $(i+5)$.

Das bereits bei der Auswertung des 90 % - Wertes für monoton ansteigende Impulse vorgeschlagene Interpolationsverfahren kann jedoch auch hier eingesetzt werden. Das im Bild 9 verwendete Beispiel der linearen Interpolation zwischen den Abtastungen (i+1) und (i+5) zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem gemittelten und dem durch lineare Interpolation bestimmten Wert.

Bei der Bestimmung des 90 % - Wertes eines Impulses mit Schwingungen sind die Bedingungen im allgemeinen noch schwieriger, da zusätzlich mehrere Abtastwerte mit demselben Bit-Level durch die geringere Steigung des Impulses im Bereich des 90 % - Wertes auftreten.



filename: LI_0

23.01.89

sampling: 100 [Msample/sec]

Bild 10 Verlauf einer Blitzstoßspannung mit überlagerter Oszillation

Bild 10 zeigt den Verlauf einer Blitzstoßspannung mit Überlagerung einer Schwingung, die so gewählt ist, daß eine möglichst große Beeinflussung des 90 % - Wertes zu erwarten ist. Zusätzlich ist der zulässige interne Störpegel durch eine Zufallsfunktion nachgebildet.

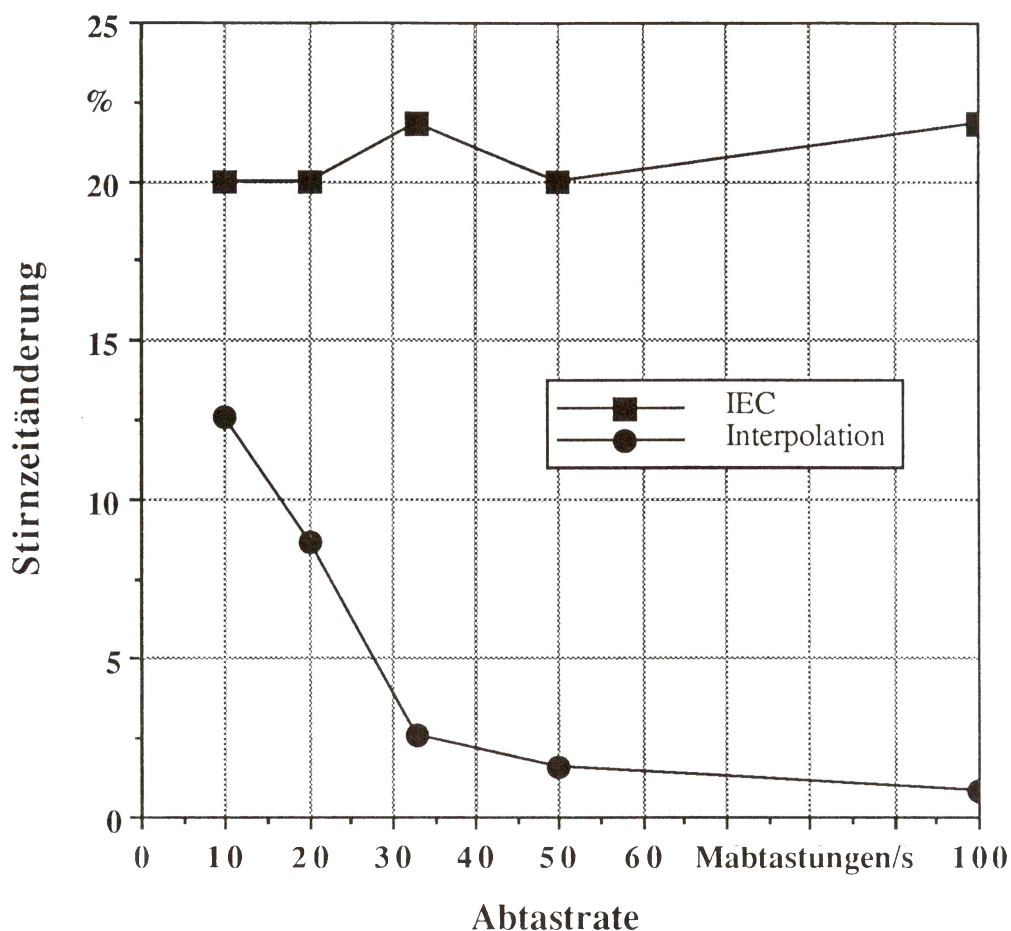


Bild 11 Zeitlicher Verlauf einer Blitzstoßspannung mit überlagerter Schwingung und zulässigem internen Störpegel

Die Bestimmung der Stirnzeit mit einfacher linearer Interpolation bringt auch hier keine Verbesserung der Stirnzeitermittlung. Die Methode der Interpolation zwischen dem letzten Abtastwert unterhalb des Referenzwertes, ausgehend vom Anfangspunkt des Impulses, und dem letzten Wert oberhalb des Referenzwertes, beginnend vom Scheitelpunkt des Impulses, ergibt auch für diesen Fall eine erhebliche Verminderung der Fehlergrenzen. Für die im Bild 10 dargestellte Blitzstoßspannung ist die Änderung der Stirnzeit durch den Einfluß der internen Störung für das Verfahren nach IEC und mit der vorgeschlagenen Interpolation dargestellt. Das Interpolationsverfahren verringert die Streuung in der Stirnzeitbestimmung sehr stark, wenn die Abtastrate hinreichend groß gegenüber der Frequenz der Schwingung ist. In [7] wird gefordert, daß die Abtastrate mindestens dem 8fachen der Schwingungsfrequenz entspricht. Diese Forderung wird durch die Simulation der Stirnzeitänderung bestätigt, da die Frequenz der überlagerten Schwingung 5.01 MHz beträgt und die Beeinflussung der Stirnzeit ab einer Abtastrate von 40 Mabtastungen/s hinreichend klein ist.

8. Bestimmung des Überschießens

In den Vorschriften wird darauf hingewiesen, daß bei Blitzstoßspannungen im Scheitel der Stoßspannung ein Überschießen oder Schwingungen auftreten können. Für diese Fälle sind bezüglich der Festlegung des Scheitelwertes bestimmte Bedingungen angegeben, die in Bild 12 dargestellt sind.

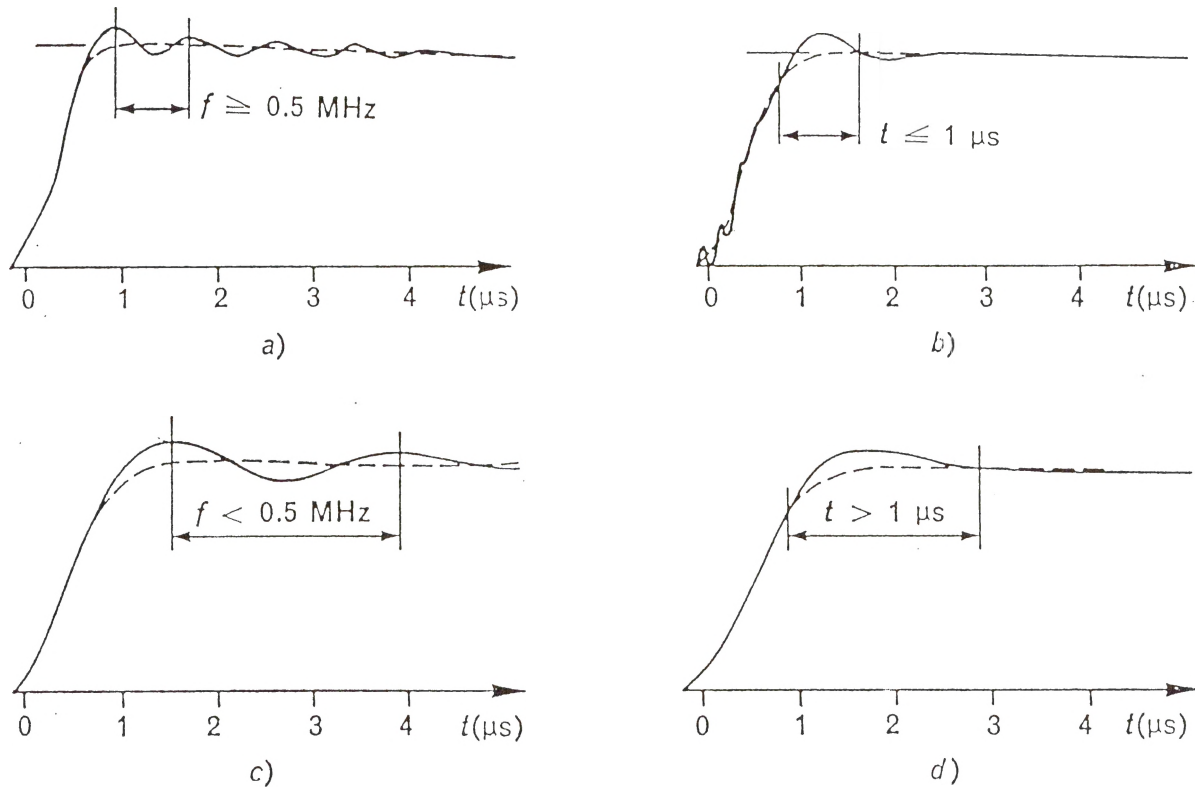


Bild 12 Beispiele von Blitzstoßspannungen mit Überschießen oder Schwingungen

Das Auswerten dieser Kurvenformen durch einen Rechner ist nicht möglich, da die eingezeichnete gemittelte (gestrichelte) Kurve mathematisch nicht definiert ist. Es ist daher nach einem Verfahren zu suchen, mit dessen Hilfe die gemittelte Kurve und deren Scheitelwert möglichst gut nachgebildet werden kann, da in jedem Fall diese Kurve als Referenzkurve benötigt wird. Die Blitzstoßspannung kann im idealisierten Fall durch zwei Exponentialfunktionen gemäß Gl. 2 gebildet werden.

$$u(t) = U_0 \cdot \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 - T_2} \cdot (e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2}) \quad (2)$$

U_0 ist eine dimensionsbehaftete Konstante, T_1 und T_2 sind die Zeitkonstanten der den Rücken und die Stirn bestimmenden Exponentialfunktionen [13].

Die Blitzstoßspannung erfüllt die Anforderungen der Vorschriften, wenn der Betrag der Schwingungen oder des Überschießens kleiner als 5 % des Scheitelwertes ist. Es ist daher erforderlich, die gemittelte Kurve festzulegen, da die Differenz zwischen gemessenem und gemitteltem Kurvenverlauf zur Berechnung der Amplitude des Überschießens oder der Schwingung erforderlich ist. Die Entscheidung, welcher Wert für die Höhe der Prüfspannung eingesetzt wird, hängt von der Frequenz der Schwingung und der Zeitdauer der Abweichung zwischen gemessener und gemittelter Kurve ab.

Es wird daher vorgeschlagen, den Rücken der gemittelten Kurve durch eine Kurve zu ersetzen, die der Exponentialfunktion des Rückens entspricht. Als Stützpunkte zur Ermittlung der Gleichung

$$u(t) = K \cdot e^{-t/T_1} \quad (3)$$

stehen die Meßwerte der Kurve im Bereich des Rückens zur Verfügung. Die dazu erforderlichen Verfahren sind in zahlreichen Bibliotheksprogrammen vorhanden. Da in diesem Bereich die Schwingungen bereits abgeklungen sind (siehe Bild 11), kann die Kurve mit sehr hoher Genauigkeit durch Gl. 3 angenähert werden. Als Scheitelwert der gemittelten Kurve wird der mit Gl. 3 zum Zeitpunkt des Scheitelwertes der gemessenen Kurve berechnete Wert bestimmt [14].

Der nächste Schritt ist die Bestimmung des für die Prüfungsspannung zuständigen Scheitelwertes. Bei Schwingungen ist die Ermittlung der Schwingungsfrequenz sehr einfach, so daß für die im Bild 12a und 12c dargestellten Beispiele keine weiteren Probleme auftreten. Die Bestimmung des für die Prüfungsspannung gültigen Scheitelwertes ist für Kurvenverläufe gemäß Bild 12b und 12d sehr viel schwieriger. Die als Kriterium geltende Zeit wird aus der Abweichung zwischen gemessener und gemittelter Kurve bestimmt, für die keine mathematische Formulierung möglich ist. Ein Vorschlag zur Lösung dieses Problems ist in Bild 13 anhand eines Kurvenverlaufes nach Bild 12d dargestellt. Der nach Gl.3 ermittelte Kurvenverlauf zeigt zwei Schnittpunkte bzw. ein Schnittpunkt und ein Berührungspunkt mit der gemessenen Kurve. Wenn kein Schnittpunkt vorhanden ist, hat der gemessene Kurvenverlauf kein Überschießen. Mit Hilfe der beiden Punkte kann die Zeit bestimmt und somit auch die Prüfungsspannung ermittelt werden. Bei einer Zeit von $t \leq 1 \mu s$ wird als Scheitelwert der Prüfungsspannung der Scheitelwert der gemittelten Kurve gemäß der oben angeführten Definition bestimmt.

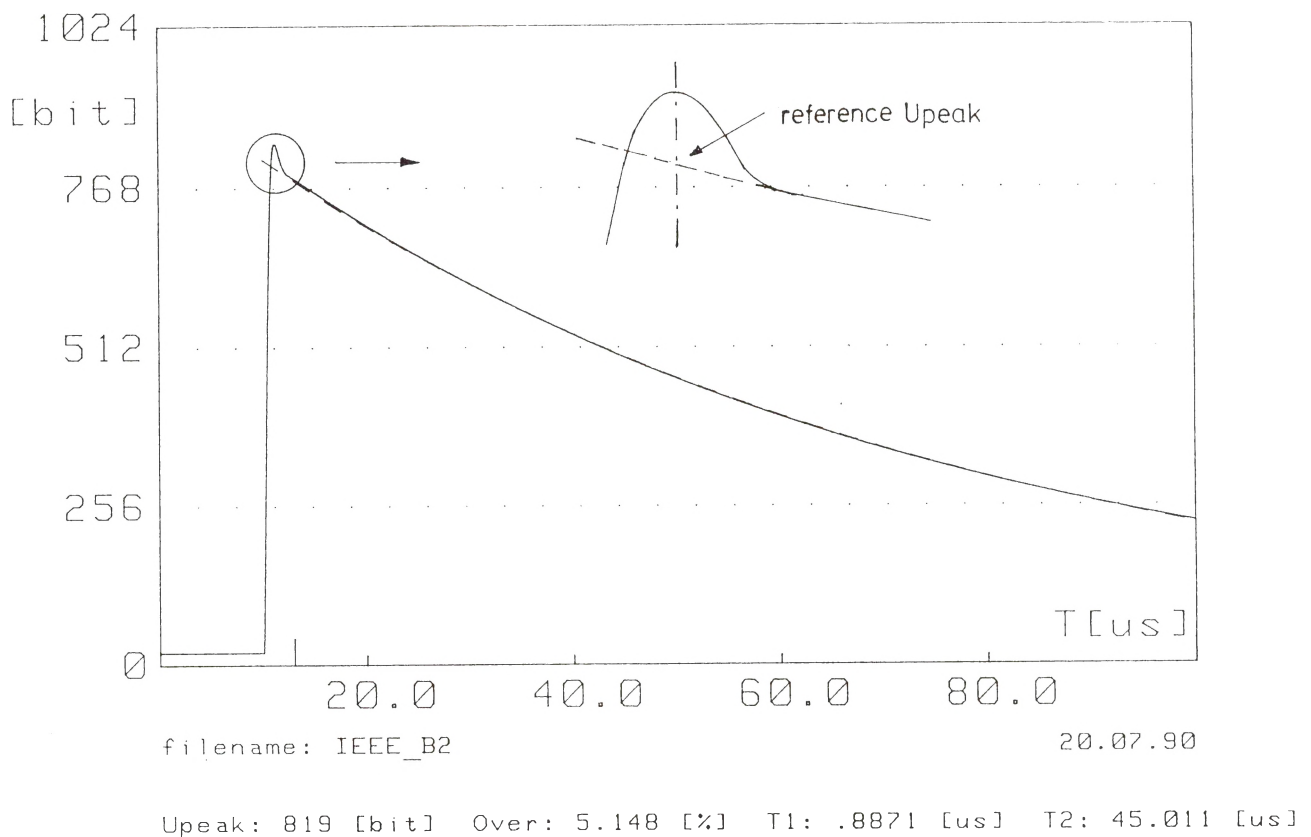


Bild 13 Ermittlung des Überschießens

Da der durch das vorgeschlagene Verfahren ermittelte Scheitelwert der Prüfungsspannung zusätzlich als Referenzwert für die Bestimmung der 30 % und 90 % Werte bei der Berechnung der Stirnzeit eingesetzt wird, ist ein Vergleich der verschiedenen Verfahren erforderlich. Die

Auswertungen des Überschießens durch einen Ingenieur anhand eines Oszillogrammes (manuell) und nach dem vorgeschlagenen Verfahren (rechnerisch) sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Impulsformen sind so gewählt, daß sie möglichst mit den Beispielen in Bild 12 übereinstimmen. Dabei hat die Nachbildung der Impulsform gegenüber der vorschriftsmäßigen Stirnzeit den Vorrang.

Impulsnummer	Überschießen		Stirnzeit		Impulsform
	manuell	rechnerisch	manuell	rechnerisch	
1	4.0 %	3.4 %	0.75 μ s	0.75 μ s	d
2	11.4 %	8.9 %	0.47 μ s	0.40 μ s	b
3	5.7 %	5.9 %	0.34 μ s	0.37 μ s	b
4	18.6 %	18.1 %	0.42 μ s	0.34 μ s	a
5	12.0 %	12.4 %	0.73 μ s	0.52 μ s	b

Tabelle 1 Vergleich zwischen manuellem und rechnerischem Auswerteverfahren des Überschießens und der Stirnzeit für verschiedene Impulsformen nach Bild 12

Die Tabelle 1 zeigt, daß die beiden Verfahren Abweichungen in der Bestimmung des Überschießens und der Stirnzeit aufweisen. Für die prüftechnisch in Frage kommenden Impulse 1 und 3 beträgt jedoch die Abweichung zwischen manueller und rechnerischer Auswertung des Überschießens nur 0.6 % bzw. 0.2 % und die der Stirnzeit 8 %. Der entscheidende Vorteil der vorgeschlagenen Auswertemethode liegt aber darin, daß die Auswertung nicht vom Verlauf der gemittelten Kurve sondern nur von den gemessenen Werten abhängt und daß die Auswertung sehr gut reproduzierbar und nachvollziehbar ist. Die Aussagekraft einer Hochspannungsprüfung wird außerdem nicht durch die geringfügige Differenz in der Stirnzeit bzw. durch die vernachlässigbare Differenz im Überschießen beeinflusst.

9. Auswertung der Scheitelzeit

Die Auswertung der Scheitelzeit bei Schaltstoßspannungen ist ein weiteres Beispiel für die Schwierigkeit der Anwendung von Vorschriften für analoge Meßwerterfassung auf die digitale Meßwerterfassung. Die Scheitelzeit ist definiert als die Zeitspanne zwischen dem tatsächlichen Beginn und dem Augenblick, in dem die Spannung ihren Höchstwert erreicht. Diese Definition ist auch bei der manuellen Auswertung mit Hilfe eines Oszillogrammes häufig sehr schwierig anwendbar, so daß die Probleme nicht neu sind, aber bei der Auswertung digitaler Meßwerte sehr viel stärker hervortreten.

Der tatsächliche Beginn einer Schaltstoßspannung muß mathematisch definiert werden, wenn eine automatische, reproduzierbare Auswertung erfolgen soll. Da elektromagnetische Störungen im allgemeinen unabhängig von der Impulsform auftreten, ist dieser Einfluß bei der beispielhaften Darstellung des Beginns einer Schaltstoßspannung im Bild 14 mitberücksichtigt.

Der tatsächliche Beginn wird durch lineare Interpolation zwischen der Abtastung (i+4) und dem davorliegenden ermittelt. Die Abtastung (i+4) ist definiert als die Abtastung, ab der die nachfolgenden Abtastungen eine höhere Amplitude aufweisen als die Abtastungen, die zur Bestimmung der 0 - Linie herangezogen werden. Durch diese Definition wird sichergestellt, daß durch Störungen zu Beginn des Impulses nur eine sehr geringe Beeinflussung der Stirnzeit möglich ist.

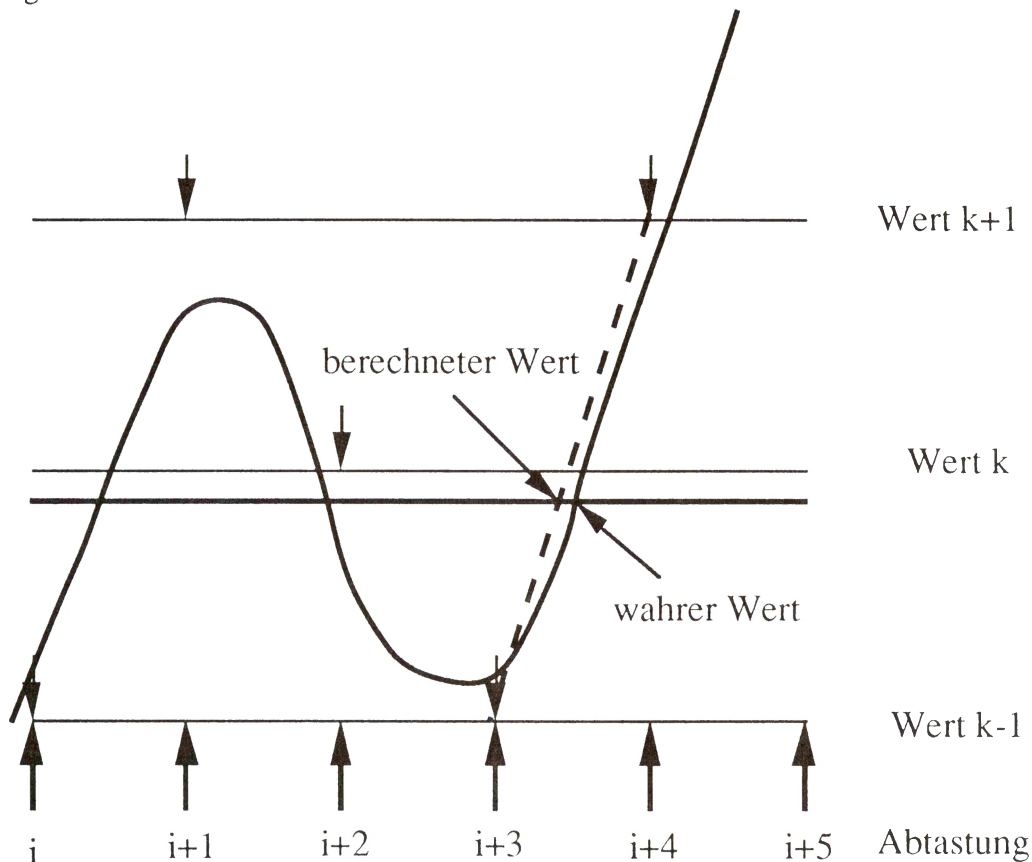


Bild 14 Bestimmung des tatsächlichen Beginns einer Schaltstoßspannung

Die Bestimmung des Augenblicks des höchsten Spannungswertes ist sehr viel kritischer bezüglich der Streuung der Auswerteergebnisse, da bei einer Schaltstoßspannung sehr viele Abtastungen auf einem Bit-Level im Bereich des Scheitelwertes erfolgen.

Eine nur sehr geringe Beeinflussung des AD-Umsetzers hat damit unmittelbare Auswirkungen auf die Bestimmung der Scheitelwertzeit. Für einen 8-bit-AD-Umsetzer zeigt Bild 15 die Anzahl der Abtastwerte auf höchstem Bit - Level in Abhängigkeit der Abtastrate. Als Parameter sind die Scheitelwert- und Rückenhalbwertzeiten der Vorzugsschaltstoßspannung so gewählt, daß die jeweils ungünstigste Kombination entsteht. Zusätzlich ist der Einfluß der Meßbereichsausnutzung durch Vergleich zwischen 100 % und 60 % dargestellt.

Eine Überlagerung der Vorzugsspannung mit einer zulässigen internen Störung von ± 0.5 bit hat zur Folge, daß zufällig jede Abtastung den höchsten Bit - Level erhalten kann. Unter dieser Annahme ergibt sich ein möglicher Bereich von ca. 50 Abtastungen bei einer Abtastrate von 1000 kabtastungen/s. Die Wahrscheinlichkeit der Beeinflussung ist nicht für alle Abtastungen gleich, kann jedoch bei der Bewertung der Auswertesicherheit nicht berücksichtigt werden.

Ohne Berücksichtigung der Unsymmetrie der Schaltstoßspannung hinsichtlich Scheitel- und Rückenhalbwertzeit ergibt sich eine theoretische Streuung der Scheitelwertzeit von ± 25 Abtastungen, die bei einer Scheitelzeit von $200 \mu\text{s} \pm 12.5 \%$ entspricht.

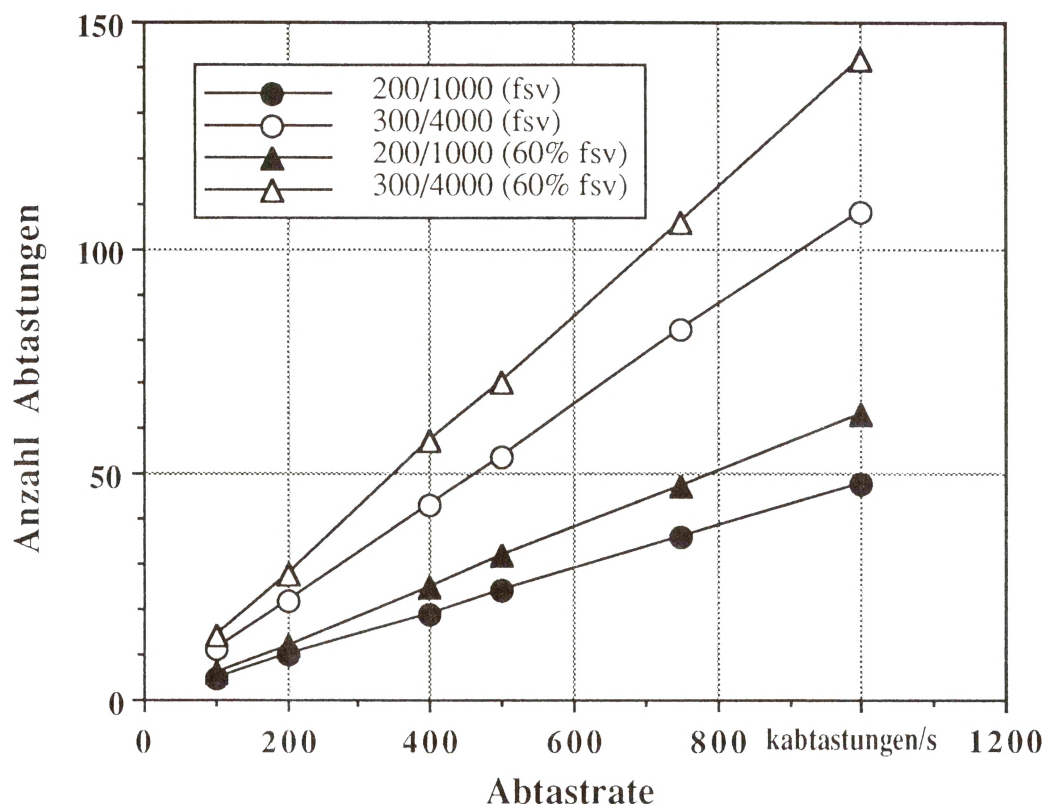


Bild 15 Anzahl der Abtastungen bei Schaltstoßspannungen in Abhängigkeit der Abtastrate und der Meßbereichsausnutzung

Die Erhöhung der Amplitudenauflösung ist keine wirksame Maßnahme zur Verringerung der Streuung, da bereits bei einer Abtastrate von 500 kabtastungen/s und einer Amplitudenauflösung von 12 bit immer noch 6 Abtastungen mit gleichem Bit - Level erscheinen, die einer Streuung von $\pm 6 \mu\text{s}$ bzw. $\pm 3 \%$ entsprechen.

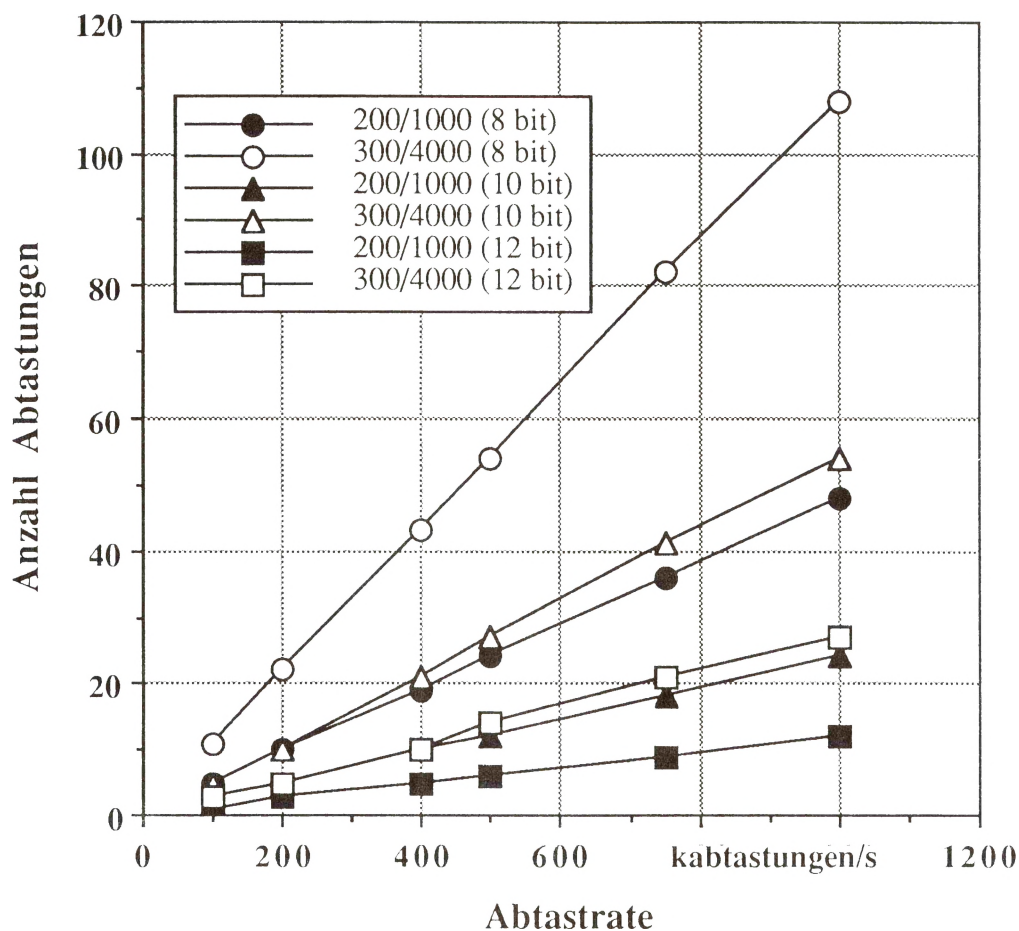


Bild 16 Anzahl der Abtastwerte in Abhängigkeit der Abtastrate für verschiedene Amplitudenauflösungen

Eine einfache und nachvollziehbare Methode der Scheitelzeitauswertung ist die Mittelwertbildung zwischen dem ersten und letzten Abtastwert auf dem höchsten Bit - Level. Diese Methode wird vorgeschlagen, da sie keine Änderung der Definition der Scheitelzeit erfordert. Bei Änderung der Scheitelzeitdefinition kann selbstverständlich die Methode der Stirnzeitzeitauswertung für Blitzstoßspannung auch bei Schaltstoßspannungen angewendet werden.

Eine Auswertung der Scheitelzeit für einen Vorzugsschaltstoß 200/2500 μ s ergibt bei einer 8 bit Auflösung einen Streubereich von -15 % bis 23 %. Diese Werte stimmen mit den im Bild 15 dargestellten Kurven überein, wenn nur die Streubreite verglichen wird. Die leichte Unsymmetrie in der Stirnzeitverteilung wird durch die Unsymmetrie des Kurvenverlaufes hervorgerufen. Die Beeinflussung der Stirnzeitverteilung durch den Kurvenverlauf ist daher in Tabelle 2 für drei verschiedene Schaltstoßspannungen dargestellt.

Schaltstoß T_p/T_2	erster Abtastwert	letzter Abtastwert	$T_{p\text{mittel}}$	$\Delta T_{p\text{mittel}}$ μs	$\Delta T_{p\text{mittel}}$ %
300/1036	254	353	303.5	3.5	1.17
249/2500	196	325	260.5	11.5	4.62
197/3849	146	285	215.5	18.5	9.39

Bezugswert 99 %

Schaltstoß T_p/T_2	erster Abtastwert	letzter Abtastwert	$T_{p\text{mittel}}$	$\Delta T_{p\text{mittel}}$ μs	$\Delta T_{p\text{mittel}}$ %
300/1036	223	398	310.5	10.5	3.5
249/2500	165	404	284.5	35.5	14.25
197/3849	120	396	258	61	31

Bezugswert 97 %

**Tabelle 2 Streuung der Scheitelwerte in Abhängigkeit des
Schaltstoßspannungsverlaufes und des Bezugswertes**

Die Abweichungen zwischen der wahren und der berechneten Scheitelzeit steigen mit zunehmender Unsymmetrie und mit abnehmendem Bezugswert an. Es muß aber deutlich hervorgehoben werden, daß diese Abweichungen nicht einen Meßfehler sondern den Unterschied in der Stirnzeit, hervorgerufen durch ein anderes Auswerteverfahren, darstellen. Die Bedeutung des vorgeschlagenen Verfahrens liegt darin, daß die Streuung in der Auswertung erheblich reduziert wird und daß der Fehler zwischen wahrer und berechneter Scheitelzeit keinen Einfluß auf das Prüfergebnis bzw. auf die Qualität der Prüfung hat. Bild 17 bestätigt anhand von Messungen die geringe Streuung der Scheitelzeit bei Anwendung des vorgeschlagenen Auswerteverfahrens.

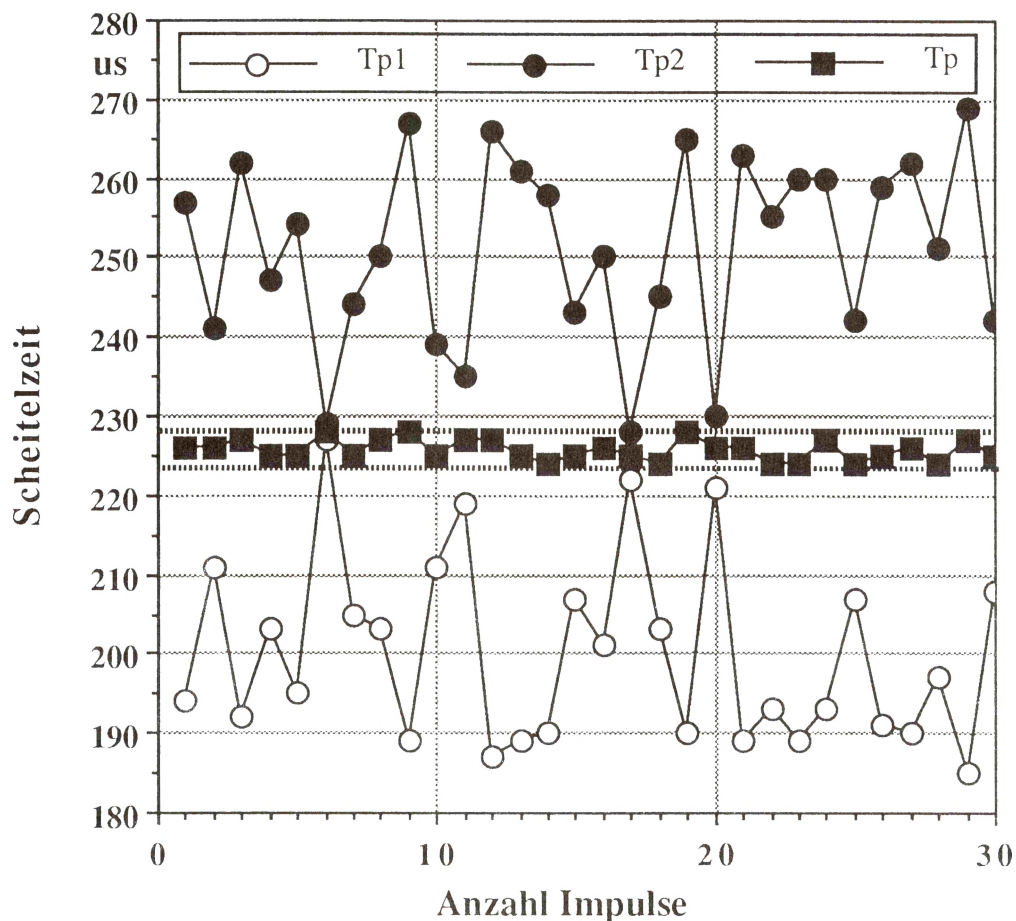


Bild 17 Auswertung der Scheitelzeit nach verschiedenen Verfahren
 Tp1 Scheitelzeit entsprechend des ersten Abtastwertes
 Tp2 Scheitelzeit entsprechend des letzten Abtastwertes
 Tp Scheitelzeit entsprechend Mittelwert von Tp1 + Tp2

Bei einer Differenz zwischen Tp1 und Tp2 von 84 μs bei Impuls Nr. 29 und einer Differenz von 2 μs bei Impuls Nr. 6 ergibt sich eine Abweichung von $< 1\%$ bezogen auf den Mittelwert von 30 Messungen. Die gestrichelten Linien geben daher einen Bereich von $\pm 1\%$ des aus 30 Auswertungen berechneten Mittelwertes an und zeigen, daß das vorgeschlagene Auswertverfahren eine sehr geringe Empfindlichkeit auf die Streuung der Abtastwerte aufweist.

10. Zusammenfassung

Die Eigenschaften digitaler Meßwerterfassungssysteme sind ausreichend zur Messung von Stoßspannungs- und Stoßstromimpulsen.

Im Hinblick auf die Amplitudenauflösung und Abtastrate muß zwischen Meßsystem zur Erfassung und Auswertung von Vorzugsstoßspannungen mit den Kenngrößen Scheitelwert und Zeitparameter und Meßsystemen für Vergleichsmessungen unterschieden werden.

Die Auswertung des Scheitelwertes ist bei vollen Stoßspannungsimpulsen kein Problem, bei abgeschnittenen Stoßspannungen muß neben der Amplitudenauflösung die Abtastrate berücksichtigt werden.

Bei der Auswertung der Zeitparameter für Blitzstoßspannung sind die besonderen Eigenschaften des digitalen Meßwerterfassungssystems zu beachten. Einfache Auswerteverfahren wie lineare Interpolation zwischen den entsprechenden Abtastwerten erhöhen die Reproduzierbarkeit ohne Beeinträchtigung der Nachvollziehbarkeit. Zusätzlich wird die Meßunsicherheit durch die vorgeschlagenen Verfahren verringert.

Bei Blitzstoßspannungen mit Oszillationen sind unbedingt Auswerteverfahren erforderlich, da sonst die Auswertung vom gewählten Verfahren unzulässig stark beeinflusst wird. Die bereits für die glatte Impulsform vorgeschlagene Auswertemethode kann auch hier eingesetzt werden.

Die Bestimmung des Überschießens und des für Prüfzwecke erforderlichen Scheitelwertes ist mit Hilfe eines Algorithmus möglich. Das vorgeschlagene Verfahren ist einfach, leicht nachvollziehbar und sehr gut reproduzierbar. Vergleiche zwischen Auswertungen eines Ingenieurs und eines Rechners zeigen sehr geringe Abweichungen, die für die Aussagekraft der Prüfung ohne Bedeutung sind und gegenüber dem Vorteil der Objektivität der Auswertung vernachlässigbar sind.

Bei Schaltstoßspannung erfordert die Bestimmung der Scheitelzeit eine bessere Definition des tatsächlichen Beginnes des Stoßes und des Augenblickes des Höchstwertes. Für den Beginn kann die Auswertemethode für Blitzstoßspannung eingesetzt werden. Bei der Ermittlung des Zeitpunktes der größten Amplitude muß auf die Besonderheit des AD-Umsetzers, das interne Stören, und auf die Auswertemethode geachtet werden. Eine einfache Mittelwertbildung zeigt sehr gute Ergebnisse mit sehr geringer Streuung. Die Abweichung vom idealen Scheitelwert ist aus prüftechnischer Sicht vernachlässigbar.

Eine andere Möglichkeit der einfacheren Auswertung der Scheitelzeit bei Schaltstoßspannung ist die Änderung der Definition der Scheitelzeit. Diese Änderung muß jedoch in der übergeordneten Vorschrift für Hochspannungsprüftechnik erfolgen. Bei der Auswertung gelten dann die für die Blitzstoßspannung angeführten Bedingungen.

11. Schrifttum

- 1] VDE 0432 Hochspannungsprüftechnik
Teil 1: Begriffe und allgemeine Festlegungen zur Prüfung
Teil 2: Prüfverfahren
Teil 3: Meßeinrichtungen
Teil 4: Anwendungshinweise für Meßeinrichtungen
- [2] IEC Publication 60 High Voltage Test Technique
Part 1: General definitions and test requirements
Part 3: Measuring devices
Part 4: Application guide for measuring devices
- [3] IEEE Std.4-1978 IEEE Standard Techniques for High Voltage Testing
- [4] R. Malewski, B. Poulin: Digital Monitoring System for HV Impulse Tests
IEEE PAS Vol. 104, 1985, p. 3108 - 3116
- [5] A. Kachler, H. Klein, G. Szaloky, E. Gockenbach, H.P. Häusler : High Voltage Impulse Tests on Power Transformers using a Digital Monitoring System
5th ISH 1987 Braunschweig, Beitrag Nr. 72-05
- [6] IEEE Std. 1122-1987 IEEE Standard for Digital Recorders for Measurements in High-Voltage Impulse Tests

- [6] IEEE Std. 1122-1987 IEEE Standard for Digital Recorders for Measurements in High-Voltage Impulse Tests
- [7] IEC Publication 1083 Digital Recorders for Measurements in High Voltage Impulse Tests
Part 1: Requirements for Digital Recorders
- [8] R. Malewski, B. Poulin: Digital Monitoring Technique for HV Impulse Tests
IEEE PAS Vol. 104, 1985, p. 3108 - 3116
- [9] H.P. Häusler, P. Ganzmann, W. Biselli, K. Feser, W. Köhler: Transient Recorder for HV Impulse Tests
5th ISH 1987 Braunschweig, Beitrag Nr. 72-02
- [10] R. Malewski, E. Gockenbach: Neue Möglichkeiten der Beurteilung von Stoßspannungsprüfungen an Transformatoren durch Verwendung eines digitalen Meßsystems
etzArchiv Bd. 11 (1989) H. 6, S. 179 - 185
- [11] E. Gockenbach, H.P. Häusler: Some Aspects of the Evaluation of High Voltage Impulses Measured with an Impulse Digitizer
6th ISH 1989 New Orleans, Beitrag Nr. 50.03
- [12] Y.M. Li, J. Kuffel, W. Janischewskyi: Computer Procedures for the Evaluation of Parameters of Digitally Recorded HV Impulses
7th ISH 1991 Dresden, Beitrag Nr. 62.07
- [13] E. Hanique: Practical Implementation of a Digital Recording System for Lightning Impulse Tests
Intern. Symposium on Digital techniques in High-Voltage Measurements
Toronto, 1991, S. 3-18 - 3-22
- [14] E. Gockenbach: A simple and robust Evaluation Procedure for High-Voltage Impulses
Intern. Symposium on Digital techniques in High-Voltage Measurements
Toronto, 1991, S. 3-1 - 3-5