

Digitale Stossspannungsmesssysteme

Hans-Peter Häusler
Haefely Test Systems, Basel

1.) Einführung / Anforderungen

Auch im Hochspannungsprüffeld hat in den letzten Jahren die Digitalmess-technik Einzug gehalten. Der Grund für die etwas spätere Einführung dürfte wohl in der speziellen Anforderung an die EMV im Hochspannungsprüffeld sein. Es hat sich auch schon beim analogen Stossoszilloskop gezeigt, dass trotz einem beliebig grossen Marktangebot an handelsüblichen Oszillographen, sich die speziell für die Hochspannungsmesstechnik entwickelten Geräten durchgesetzt haben. Sicher wird das auch bei den digitalen Messgeräten so sein. Es müssen Geräte sein, die die speziellen Bedürfnisse der Stossspannungsmesstechnik wie:

- o EMV
- o einfache Bedienung durch das Prüffeldpersonal
- o Zuverlässigkeit
- o sicheres triggern bei den typischen Impulsverfahren
- o Robustheit

erfüllen.

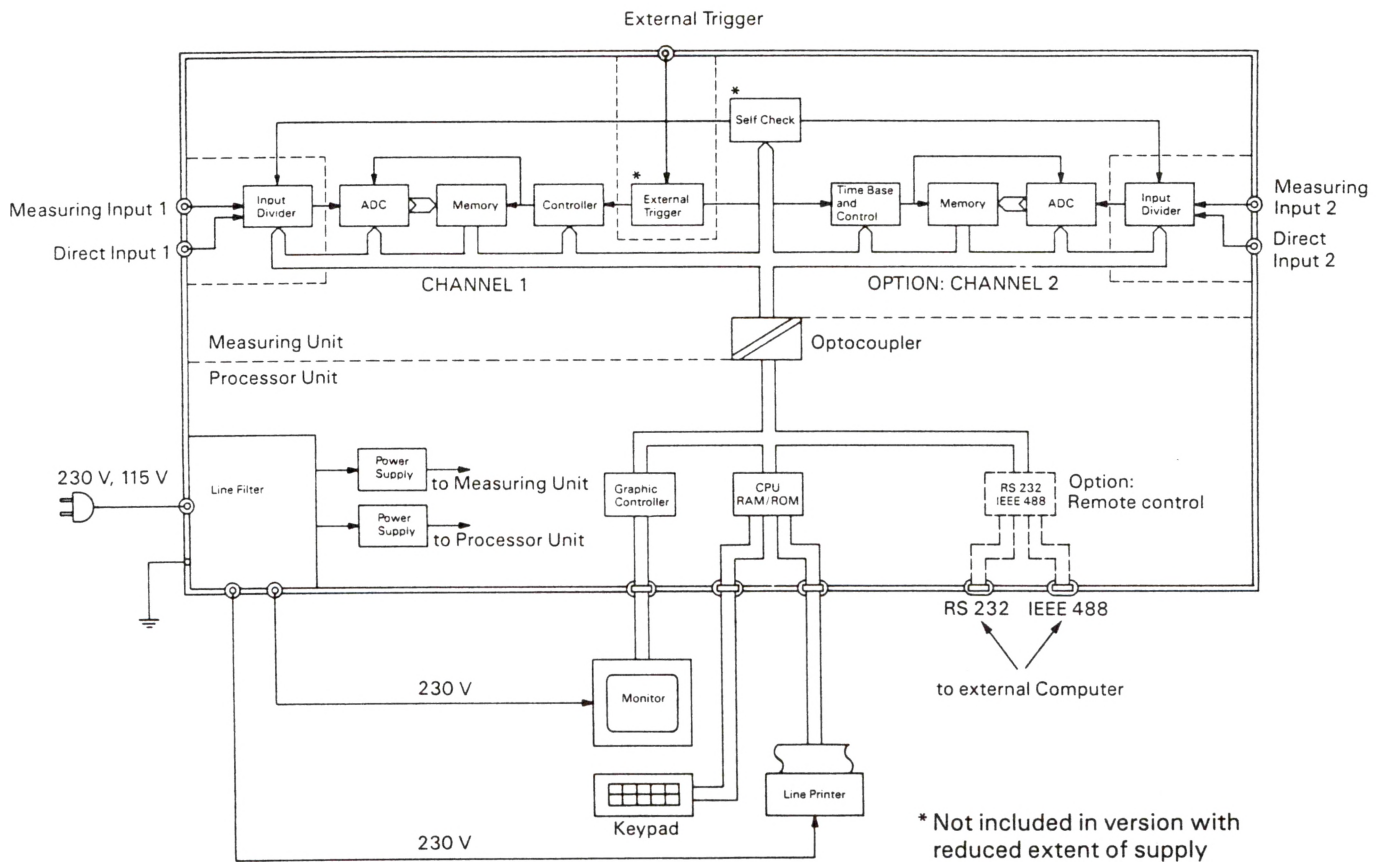
Was nützt ein hochkompliziertes Gerät, das im entsprechenden Moment nichts oder nicht das richtige misst?

Es wird noch darauf hingewiesen, dass die meisten "Digitalen Speicher Oszilloskope" (DSO) nicht speziell einmalige Vorgänge (single shot), wie sie in der Impulsmesstechnik vorkommen, ausgelegt sind. Damit ist auch das Datenblatt irreführend, denn die dort angegebenen Daten beziehen sich auf repetierende Messsignale. Bei nicht repetierenden Impulsen nehmen diese Daten rapide ab.

2.) Aufbau

Alle digitalen Impulsmessgeräte (Transientenrecorder) sind im Prinzip sehr ähnlich aufgebaut.

Das Funktionieren wird anhand des speziell für die Hochspannungsmesstechnik entwickelten DIAS (Digitales Impuls Analyse System) erklärt.



2.1) Eingangsteiler

Um mit den bestehenden Hochspannungsteilern und -shunts kompatibel zu bleiben, und um weiterhin ein gutes Nutz-/Störsignalverhalten zu erreichen, muss der Eingangsteiler für Spannungen bis zu 1600 Volt ausgelegt sein.

Ebenfalls ist es wie beim Hochspannungsszilloskop sinnvoll, die Abschwächerstufung mit dem Faktor $\sqrt{2} = 1.26$ (1 - 1.26 - 1.59 - 2..) auszulegen. Herkömmliche Transientenrecorder haben meist eine 1 - 2 - 5 - 10.. Stufung. Damit ist es jedoch nicht möglich, das Gerät optimal auszusteuern.

2.2) Analog-Digital-Wandler (ADC)

Das "Herzstück" eines jeden Transientenrecorders ist der ACD. Hier wird das analoge Signal in eine digitale Information umgewandelt.

Zwei seiner wichtigsten Eigenschaften sind:

- o Amplitudenauflösung
- o Zeitauflösung

Amplitudenauflösung

Sie gibt an, in wieviele digitale "Stufen" das analoge Eingangssignal umgewandelt wird. Die Auflösung wird in Anzahl Bit angegeben und berechnet sich:

$$\text{Auflösung} = 2^{\text{Anzahl Bit}}$$

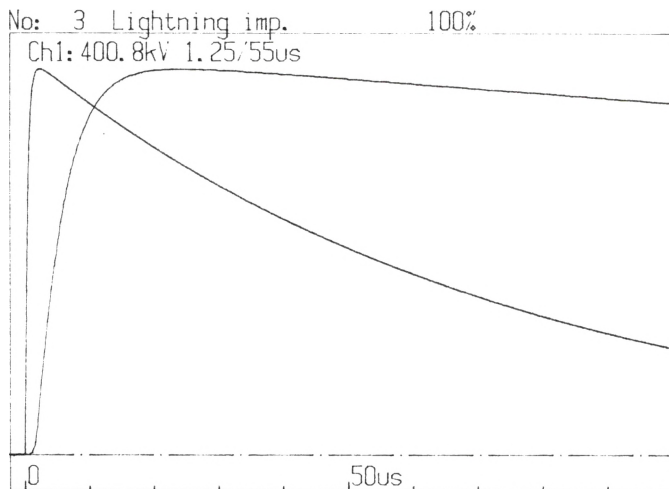
Die kleinste digital noch wahrnehmbare Eingangsspannungsänderung beträgt demzufolge:

$$\frac{\text{max. Eingangsspannungsbereich}}{\text{Auflösung}}$$

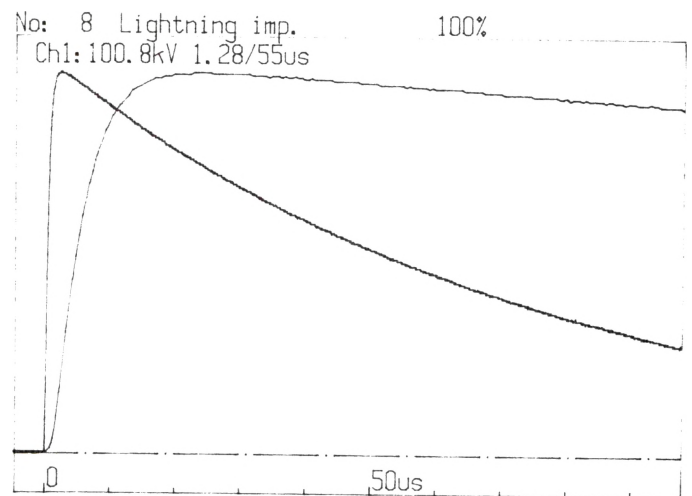
Dies entspricht der Wertigkeit eines LSB (Least Significant Bit).

Bit	Auflösung	
	2^{Bit} [Stufen]	$1/2^{\text{Bit}}$ [%]
7	128	0.8
8	256	0.4
9	512	0.2
10	1024	0.1
12	4096	0.025

Typische in der Impulsmesstechnik verwendete ADC's haben 8 oder 10 Bit Auflösung



10 Bit ADC



8 Bit ADC

Aus obigen Ueberlegungen geht hervor, dass ein 10 Bit ADC gegenüber einem 8 Bit eine um den Faktor 4 grössere Auflösung hat. Wird der ADC nicht voll angesteuert, so reduziert sich dabei seine Auflösung. Bei einer Aussteuerung von 50 % verliert man 1 Bit Amplitudenauflösung, daher kommt auch die Forderung nach einer feinen Eingangsteilerabstufung.

Nicht zu verwechseln ist die Auflösung mit der Genauigkeit. Diese Daten sind nicht direkt proportional. So hat ein 10 Bit ADC nicht die vierfache Genauigkeit eines 8 Bit ADC's.

Typische Genauigkeitswerte sind:

8 Bit ADC	< 2 %
10 Bit ADC	< 1 %

Zeitauflösung

So wie der ADC die Amplitude in diskrete Stufen einteilt, so wird auch in der Zeitachse das Signal zu diskreten Zeitpunkten gemessen (sample). Dies bedeutet, dass für schnelle, nicht repetierende Signale der ADC in der Lage sein muss, eine Messung in sehr kurzer Zeit durchzuführen. Die Angaben erfolgen in:

Messungen / Sekunde oder Abtastfrequenz

ADC Wandlerv Verfahren

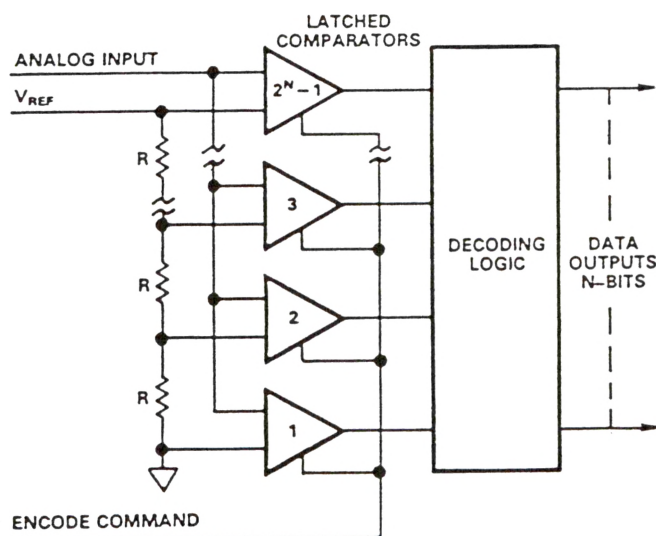
Für die in der Impulsmesstechnik geforderten hohen Abtastfrequenzen kommen 3 Wandlertypen in Frage:

Flash ADC (Parallel-, oder Direktverfahren)

Wie der Name schon andeutet, erfolgt die Digitalisierung in einem Arbeitsgang. Pro Digitalisierungsstufe erfolgt hier ein Vergleich der Eingangsspannung mit seiner entsprechenden Referenzspannung. Bei einem 8 Bit ADC werden folglich 256 Referenzspannungen und Komperatoren benötigt! Die Ausgangsinformation der Komperatoren ("Thermometercode") muss anschliessend noch in einen Dual-code umgewandelt werden.

Mit diesem Verfahren werden heute ungefähr folgende Daten erreicht:

Auflösung	Abtastfrequenz
8 Bit	20 - 500 MHz
10 Bit	10 - 60 MHz

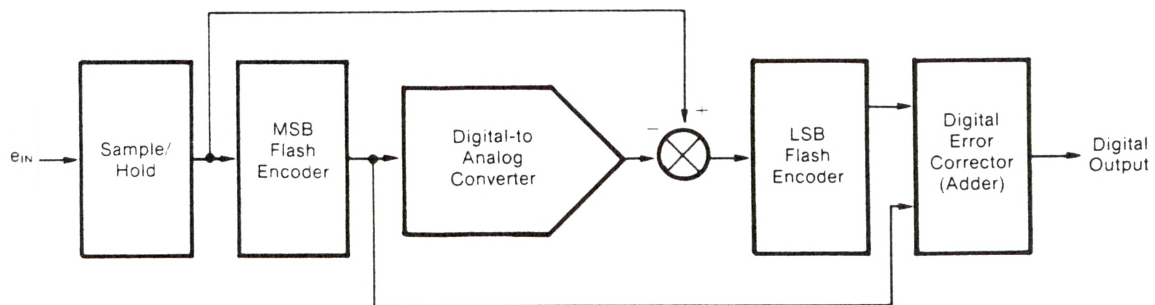


Subranging ADC

Mit diesem Verfahren wird eine grössere Amplitudenauflösung als mit dem Flash ADC erreicht. Im wesentlichen werden hier zwei in Serie geschaltete Flash ADC verwendet. Der Erste macht eine "Grobwandlung" mit reduzierter Amplitudenauflösung. Diese so gewonnene digitale Information wird anschliessend mit einem DAC wieder "analogisiert" und vom Messignal subtrahiert. Der zweite Flash ADC führt jetzt die "Feinwandlung" durch. Die resultierende Gesamtauflösung entspricht dabei der Summe der beiden einzelnen Flash ADC. Durch die Serieschaltung von zwei Flash ADC wird aller-

dings die max. Abtastfrequenz geringer als bei einem Flash ADC ausfallen. Mit diesem Verfahren werden heute ungefähr folgende Daten erreicht:

Auflösung	Abtastfrequenz
10 Bit	25 - 100 MHz
12 Bit	10 - 20 MHz



CCD Charge Coupled Device

Dies ist ein Verfahren mit dem Abtastfrequenzen ähnlich den Flash ADC und Amplitudenauflösungen ähnlich dem Subranging ADC erreicht werden. Hier wird im Messzeitpunkt keine Analog-Digital-Wandlung durchgeführt. Das Messsignal wird abgetastet und jeder Messpunkt in einem Analogspeicher zwischengespeichert. Die Speicherung geschieht in Form von Ladung in einem Kondensator. Nachdem der ganze Messzyklus abgeschlossen ist, werden die einzelnen Ladungsspeicher ausgelesen und mit einem im Vergleich zur Einspeicherung relativ "langsamen" ADC digitalisiert.

Mit diesem Verfahren werden heute ungefähr folgende Daten erreicht:

Auflösung	Abtastfrequenz
10 - 11 Bit	bis 1 GHz

2.3.) Memory (Speicher)

Im Speicher werden die vom ADC digitalisierten Daten zwischengespeichert. Von der Speicherlänge und der Abtastfrequenz hängt die Messdauer ab. Sie berechnet sich:

$$\text{Messdauer} = \frac{\text{Speicherlänge}}{\text{Abtastfrequenz}}$$

z.B.	Speicherlänge	:	4000 Messungen
	Abtastfrequenz	:	40 MHz
	Messdauer	:	100 μ s

Bei gegebener Messdauer (Typ 1.2/50 μ s Impuls) genügt es also nicht nur die Abtastfrequenz zu erhöhen, auch der Speicher muss entsprechend vergrößert werden.

2.4. Controller (Steuereinheit)

Der Controller hat folgende zwei Hauptaufgaben

- o Entsprechend der eingestellten Messdauer erzeugt er die richtige Abtastfrequenz für den ADC.
- o Er sorgt dafür, dass nach dem Triggersignal die Messung nach Ablauf der Messzeit minus der sogenannten "Pre-Trigger"-Zeit angehalten wird. Da das Messgerät ungeachtet eines Triggerereignisses immer das Messsignal wandelt und abspeichert ist es möglich, auch Ereignisse vor dem Triggerzeitpunkt festzuhalten. Damit ist es in den meisten Fällen möglich ohne eine externe Triggerquelle zu arbeiten.

2.5.) Prozessoreinheit

Ihre Aufgabe ist es die Messeinheit entsprechend den Einstellungen des Bedieners zu steuern. Des Weiteren wertet sie die gemessenen Daten aus und gibt sie auf die entsprechenden Peripheriegeräte wie Monitor und Drucker aus.

Da es sich im vorliegenden Fall um ein Messgerät der Hochspannungstechnik handelt, wurde aus EMV-Gründen die Prozessor- von der Messeinheit galvanisch getrennt.

2.6.) Peripheriegeräte

Tastatur

Was früher über diverse Schalter und Tasten eingestellt wurde wird heute über eine Tastatur dem Gerät mitgeteilt. Für einfachere Systeme genügt eine reine Softkeytastatur. Darunter versteht man eine Anordnung von z.B. 10 Tasten deren Funktion auf dem Monitor dargestellt ist. Durch das Ändern der Funktion lassen sich so beliebig viele Eingaben realisieren.

Monitor (Bildschirm)

Seine Hauptaufgabe besteht in der Darstellung der gemessenen und berechneten Daten. Ein Problem liegt in seiner endliche Auflösung. Handelsübliche Monitore haben eine Auflösung in der Größenordnung von 400 x 600 Punkten (Pixel). Damit kann nicht in jedem Fall die gemessene Kurve in Ihrer vollen Auflösung dargestellt werden. Für einen 8 Bit ADC (256 Amplitudenstufen) reicht die Y-Auflösung noch aus.

Printer (Drucker)

Meistens wird ein Printer für die Kopie des Monitors auf Papier verwendet (Hardcopy). Er unterliegt den gleichen Auflösungsproblemen wie der Monitor.

Plotter

Um das beschränkte Auflösungsvermögen des Monitors und Printers zu umgehen wird meist ein Plotter eingesetzt. Seine Auflösung ist ungefähr 10 x grösser. Somit können auch Messungen hochauflösender ADC's in ihrer vollen Genauigkeit dargestellt werden.

2.7.) Remote Control (Schnittstelle)

Wohl ein Hauptvorteil der digitalen Messgeräte besteht darin, dass sie über international normierte Schnittstellen fernsteuerbar sind. Darunter wird das Einstellen aller Aufzeichnungsparameter wie auch die Übertragung der Messwerte verstanden. Somit wird erreicht, dass das Messgerät in einem automatischen Prüfablauf, in Verbund mit anderen Geräten, von einem übergeordneten Rechner gesteuert werden kann.

Meistens werden folgende beiden Schnittstellen verwendet:

RS 232 C

Da es sich hier um eine serielle Schnittstelle handelt ist die Datenübertragung relativ langsam. 4000 Messwerte brauchen bei einer Baudrate von 9600 Baud eine Übertragungszeit von ca. 8 Sekunden. Der Vorteil dieser Schnittstelle liegt in der einfachen und billigen galvanischen Entkopplung über Lichtleiterkabel. Somit lässt sich das Messgerät gut im nicht geschirmten Prüffeld einsetzen.

IEEE 488

Hier handelt es sich um ein 8 Bit (= 1 Byte) Bussystem mit Datenraten von bis zu 100 kByte/sec. Die Kabellänge ist auf wenige Meter beschränkt. Da es sich um einen aufwendigen parallelen Bus handelt ist auch die Realisation der galvanischen Trennung sehr aufwendig und teuer. Diese Schnittstelle sollte folglich nur bei Geräten an einem geschirmten Standort verwendet werden.

3. Auswertung

Ein weiterer grosser Vorteil der digitalen Messtechnik besteht in der Kombination der Datenerfassung und der anschliessenden, automatischen Auswertung in der Prozessoreinheit.

Amplitudenskalisierung

Da in der Hochspannungsmesstechnik dem Messgerät meistens noch ein Hochspannungsteiler oder Messwiderstand vorgeschaltet ist, ist es sinnvoll diesen mit in die Auswertung einzubeziehen. Dies bedeutet, dass diese Werte in das Messgerät eingegeben werden können. Damit wird erreicht, dass alle Amplitudenauswertungen direkt in der effektiven Hochspannungs- respektive Stromgrösse auf der Anzeige erscheinen. Folglich wird auch die ganze Einstellung mit diesen Werten durchgeführt.

Zeitauswertung

In der Hochspannungsprüftechnik müssen die Impulse gemäss den einschlägigen Normen wie IEC 60 usw. ausgewertet werden. Interessanterweise sind diese Auswertungen anders als in der übrigen Messtechnik definiert. So kann ein normales, handelsübliches digitales Speicheroszilloscope (DSO) die Impulse nicht automatisch normgerecht auswerten. Der Anwender benötigt hier zusätzlich noch einen Rechner mit einer entsprechenden Software um die vom DSO gelieferten Daten normgerecht auszuwerten. Das Problem liegt beim Erstellen der Software, beim Programmieren der richtigen Auswertealgorithmen.

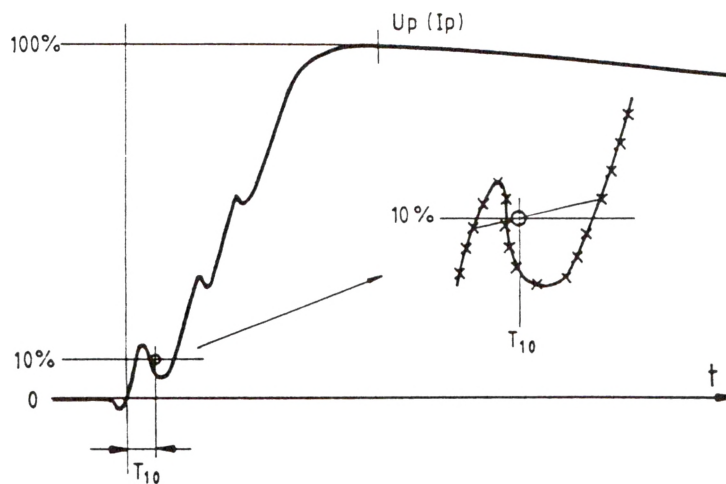
Diese Aufgabe ist dem Anwender der das speziell für die Hochspannungsmesstechnik entwickelte Messgerät DIAS einsetzt bereits abgenommen. Alle relevanten Spannungs- und Stromkurven werden hier in der Prozessoreinheit automatisch berechnet.

Leider wurde in den Normen nicht genug Rücksicht auf den programmierer genommen der die Norm in ein Rechnerprogramm umsetzen muss

Betrachten wir die Probleme und deren Lösung im DIAS anhand einiger Beispiele:

Frontzeitauswertung

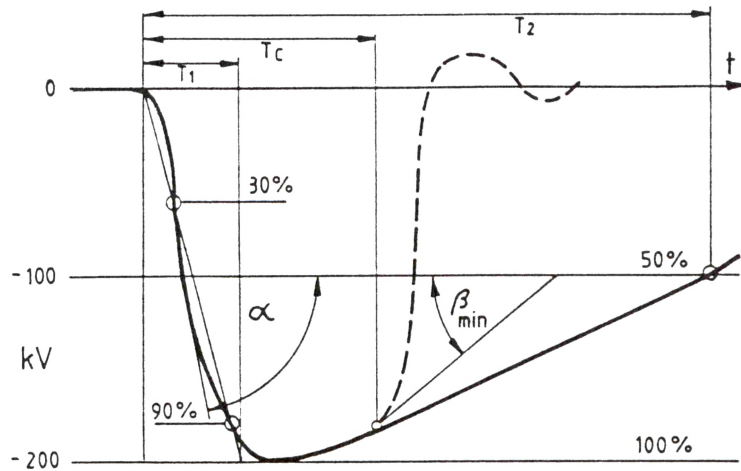
Ungeachtet der Auswertung 10 % - 90 % oder 30 % - 90 % gilt es den Zeitpunkt des entsprechenden Amplitudenwertes festzustellen. Ein Problem entsteht wenn beim entsprechenden Amplitudenwert keine Messung vorliegt oder wenn das Signal bei diesem Wert oszilliert. Gelöst wurde dieses Problem indem zwischen dem ersten Messwert unterhalb und dem letzten Messwert oberhalb des genauen Amplitudenwertes linear interpoliert wird.



Durchschlagszeit

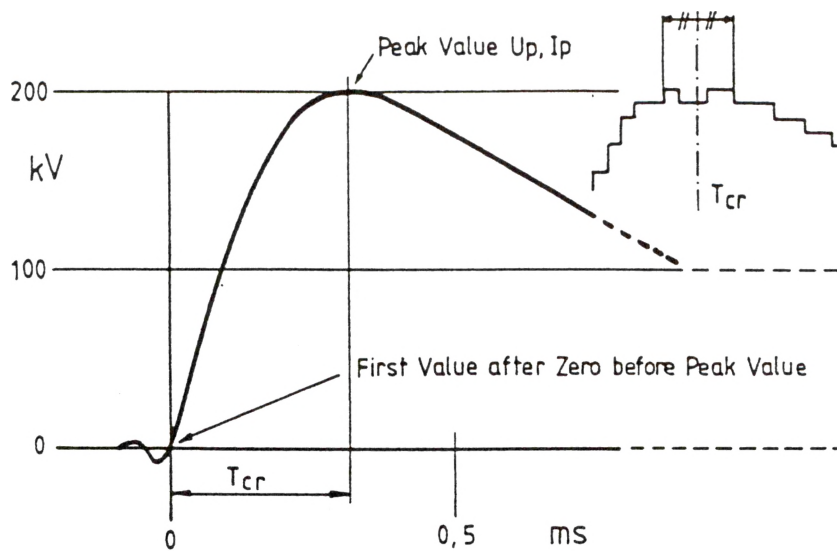
Die Norm zeichnet hier einen ganz klaren, scharfkantigen Zusammenbruch vor, von dem aus alles bestimmt wird. Leider sieht die Realität ziemlich anders aus. Der Zusammenbruch beginnt schleichend. Es gilt als eine Definition für diesen Punkt zu finden.

DIAS detektiert einen Durchschlag in dem Moment wo der Betrag der Spannungsanstiegsgeschwindigkeit (dU/dt) im Rücken grösser als die Hälfte der Anstiegsgeschwindigkeit in der Front ist.



Frontzeit bei Schaltstoss

Gemäss Norm entspricht sie der Anstiegszeit von 0 - 100 % Amplitudenwert. Damit kann sie aber nicht gleich wie vorher bei "Frontzeitauswertung" definiert ausgewertet werden. Für den Nullpunkt sucht sich DIAS, vom Spitzenwert herkommend, den ersten Messwert über der Amplitudennulllinie. Der Zeitpunkt für den Spitzenwert T_{cr} wird aus dem linearen Mittelwert zwischen dem ersten und dem letzten Spitzenamplitudenzeitpunkt gebildet.



4.) Einsatzmöglichkeiten

Prinzipiell ist ein speziell für die Hochspannungsmesstechnik entwickeltes digitales Speicheroszilloskop genau gleich wie herkömmliche analoge Messgeräte einsetzbar.

Es ersetzt folgende Einzelmessgeräte:

- o analog Oszilloskop
- o Spitzenwertvoltmeter
- o Abschneidzeitmessgerät
- o Kamera

Zusätzlich entlastet es den Prüffeldingenieur bei der Impulsauswertung und die Umwelt durch die Einsparung von Polaroidfilmen.