

KFK-324

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

Februar 1965

KFK 324

*Gesellschaft für Kernforschung m. b. H.
Zentralbücherei*

Zyklotron-Laboratorium

Ein einfacher Zeit-zu-Impulshöhe-Konverter
für Stoppsignalfrequenzen von 3-40 MHz

W. Schweimer



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

EIN EINFACHER ZEIT-ZU-IMPULSHÖHE-KONVERTER FÜR STOPPSIGNALFREQUENZEN VON 3–40 MHz

W. SCHWEIMER

Zyklotron-Laboratorium Kernforschungszentrum, Karlsruhe

Eingegangen am 29. Juli 1964

A simple time-to-pulse-height converter working with tunnel diodes is described. The equipment is especially well suited for measuring the time of flight of neutrons generated in a cyclotron. The starting signals used are the plate current pulses of a 56 AVP or a similar photomultiplier. A sine wave decoupled at the power

oscillator of the cyclotron generates the stopping pulses. The frequency of the sine wave may be 3 up to 40 Mc/s. The linear range of the converter is shorter by 7 ns than the period of the sine wave. With the Karlsruhe isochronous cyclotron a line width of the prompt gamma radiation of 1.6 ns was measured.

1. Einleitung

In einem Zyklotron werden die Ionen nur in einem schmalen Bereich der Beschleunigungsspannung beschleunigt. Daher kann man ein Zyklotron als gepulste Neutronenquelle verwenden, die folgende Eigenschaften hat: Die zeitliche Breite Δt der einzelnen Neutronenimpulse ist gleich der Breite der beschleunigten Ionenwolken im Zyklotron an der Stelle, wo sich das Neutronentarget befindet. Der zeitliche Abstand T der Neutronenimpulse ist bei Festfrequenzzyklotronen konstant und gleich der Periode der Beschleunigungsspannung.

Die Neutronen brauchen eine Zeit t , um die Flugstrecke L vom Neutronentarget im Zyklotron bis zum Neutronendetektor zu durchfliegen.

$$t = L/\beta c = nT - t_1 + t_0$$

L = Länge des Flugweges,

βc = Geschwindigkeit der Neutronen,

n = Ganze Zahl größer als 0,

T = Periode der Beschleunigungsspannung,

t_1 = Zeit zwischen der Ankunft des Signals des Neutronendetektors am Zeitmeßgerät und dem nächsten Maximum der Beschleunigungsspannung.

Daher $0 \leq t_1 \leq T$,

t_0 = Eine von der Neutronenenergie unabhängige Zeit, die von den Laufzeiten der elektrischen Signale durch die Kabel zum Zeitmeßgerät herührt.

Der vorliegende Bericht befaßt sich mit einem Zeit-zu-Impulshöhe-Konverter zur Bestimmung von t_1 . Die Periodenzahl n kann durch eine grobe Energiemessung bestimmt werden und die Zeit t_0 erhält man aus der prompten γ -Strahlung des Neutronentargets, was hier nicht näher erläutert wird.

Der uns interessierende Zeit-zu-Impulshöhe-Konverter soll von dem Impuls des Neutronendetektors gestartet werden und in dem Moment gestoppt werden,

wenn die Beschleunigungsspannung eine vorgewählte Phase erreicht. Daraus ergeben sich die zu verwendenen Start- und Stoppsignale: Der Anodenstrom eines Fotovervielfachers (Neutronendetektor) und eine am Zyklotronsender ausgekoppelte sinusförmige Wechselspannung.

Die bis einschl. 1962 veröffentlichten Schaltungen von Zeit-zu-Impulshöhe-Konvertern wurden von Bonitz in einem zusammenfassenden Bericht behandelt¹⁾. Die Anpassung dieser Schaltungen an die hohe Frequenz der Stoppsignale macht elektronische Schwierigkeiten, denn die Frequenz kann bis zu 40 MHz betragen²⁾.

Die Zeitauflösung des Konverters, gestartet mit Fotovervielfacherimpulsen verschiedener Höhen, soll bei 1 ns liegen, weil die Breite der Neutronen-Impulse am Neutronentarget des Karlsruher Zyklotrons ca. 1 ns beträgt. Diese Forderungen lassen sich relativ einfach mit Tunnelkathoden erfüllen, wie im folgenden gezeigt wird.

2. Elektronische Schaltung

2.1. PRINZIP

Die Abb. 1 zeigt das Blockdiagramm.

Die Form und Größe der Startsignale hängen von dem Neutronendetektor ab. Die Anstiegszeit der Startimpulse soll kleiner als 2 ns sein. Die Abfallszeit kann beliebig sein, von einigen ns bis zu einigen μ s. Die Polarität der Startimpulse muß negativ sein und ihre Höhe zwischen -50 mV und -5 V auf 50Ω liegen.

Mit einem 50Ω -Arbeitswiderstand an der Anode eines 56 AVP oder eines elektronisch ähnlichen Fotovervielfachers und einem Plastik-Szintillator erhält man Impulse, deren Anstiegszeit und Höhe den obengenannten Bedingungen genügen.

An die Form der Stoppsignale wird keine Bedingung gestellt. Sie sollen den Spannungsbereich von $+2$ V auf 75Ω schnell übersteigen, weil der Impulsformer im

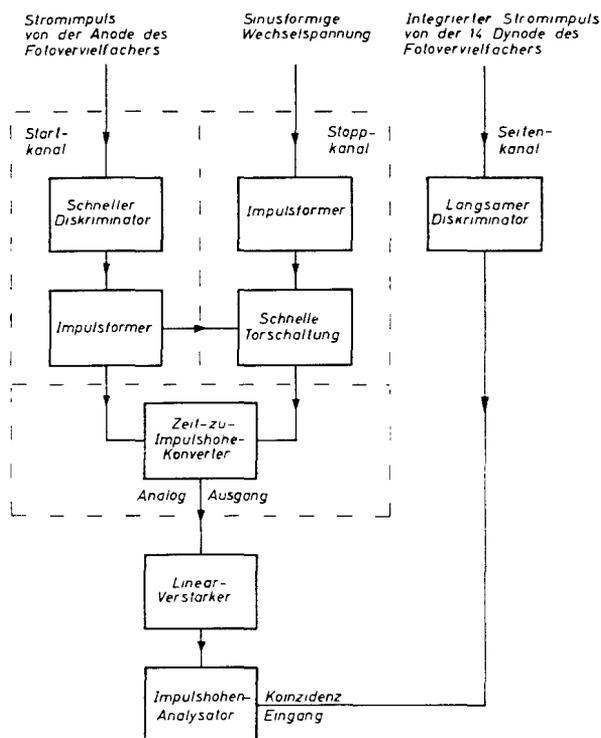


Abb. 1. Blockdiagramm des Zeit-zu-Impulshöhe-Konverters mit Seitenkanal-Diskriminator und Impulshöhenanalysator.

Stoppkanal bei +2 V anspricht. Eine Sinuswelle mit 4 V Scheitelspannung ist ein geeignetes Stoppsignal.

Der schnelle Diskriminator im Startkanal liefert ein Ausgangssignal, wenn der Startimpuls eine vorgeählte Schwelle erreicht hat. Das Ausgangssignal wird im Impulsformer differenziert, damit das Eingangssignal für den eigentlichen Zeit-zu-Impulshöhe-Konverter so kurz wie möglich ist.

Im Impulsformer des Stoppkanals wird die sinusförmige Wechselfspannung, die vom Zyklotron kommt, in eine periodische Folge von Nadelimpulsen umgewandelt. Die schnelle Torschaltung läßt nur den auf einen Startimpuls folgenden positiven Nadelimpuls durch.

Der eigentliche Zeit-zu-Impulshöhe-Konverter besteht aus einem bistabilen Univibrator und einem Integrationsglied. Der Univibrator wird von dem Ausgangsimpuls des Impulsformers im Startkanal in den höheren Spannungszustand gebracht und vom Ausgangsimpuls der Torschaltung wieder in den Anfangszustand zurückgeschaltet. Dadurch erhält man eine Rechteckspannung, deren Länge gleich der Zeit zwischen dem Startsignal und dem nächsten Durchgang der Sinuswelle durch die Phase ist, bei der die Nadelimpulse erzeugt werden.

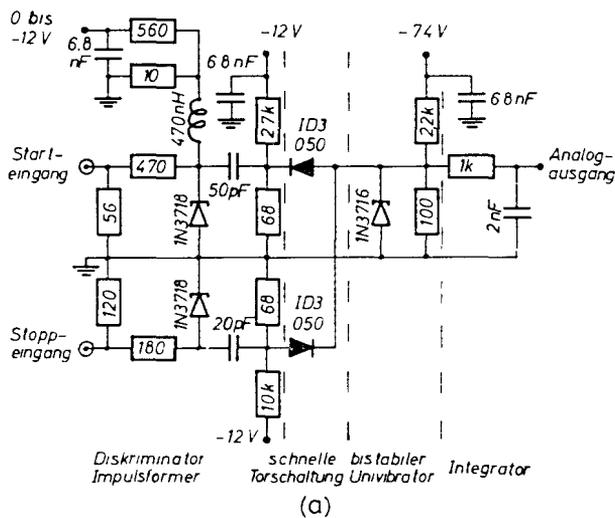
Die Rechteckspannung wird integriert. Die so er-

haltene Analogspannung am Integrationskondensator ist proportional zu der obengenannten Zeit. Die Weiterverarbeitung dieser Spannung erfolgt mit langsamer (500 kHz) Elektronik.

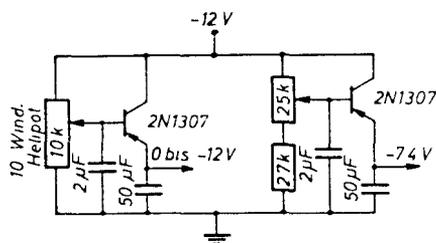
2.2. DISKRIMINATOR UND IMPULSFORMER IM STARTKANAL

Die Abb. 2a zeigt das Schaltschema des schnellen Anteils der Elektronik. Davon ist der obere linke Teil der Diskriminator und Impulsformer des Startkanals. Der Diskriminator funktioniert nach dem von Whestone und Kounosu³⁾ und van Zurk⁴⁾ beschriebenen Prinzip. Der Diskriminator erzeugt Impulse von ungefähr einheitlicher Höhe mit einer Anstiegszeit von 1.3 ns. Die Ansprechschwelle kann mit dem 10 kΩ Potentiometer der Abb. 2b von -50 mV bis -5 V eingestellt werden.

Die Ausgangsimpulse des Diskriminators werden mittels des 50 pF-Kondensators und den folgenden Widerständen und Streukapazitäten differenziert. Die Zeitkonstante der Differentiation beträgt etwa 1.5 ns.



(a)



Alle Widerstandswerte in Ohm
(b)

Abb. 2. Schaltschema des Zeit-zu-Impulshöhe-Konverters. a: Schneller Anteil der Schaltung, b: Gleichspannungsversorgungskarte.

Die Form des differenzierten Impulses ließ sich nicht messen, weil mit dem Tastkopf des Oszillographen die Streukapazitäten wesentlich verändert wurden. Der Wert des Kondensators (50 pF) wurde durch Probieren erhalten.

Nachdem der Diskriminator geschaltet hat, ist er bis zu $0.1 \mu\text{s}$ unempfindlich und erreicht in etwa $1 \mu\text{s}$ wieder seine vorgewählte Empfindlichkeit. Diese lange Totzeit vermindert die Überlagerung von Impulsen am Ausgang des Konverters.

2.3. IMPULSFORMER IM STOPPKANAL

Der linke untere Teil der Abb. 2a zeigt das Schalt-schema des Impulsformers im Stoppkanal. Der Spannungsabfall an dem 180Ω Widerstand ist wesentlich größer als der an der Tunnelodiode.

Der Strom durch die Tunnelodiode ist daher sinusförmig, die Spannung an ihr rechteckig. Durch Differentiation dieser Rechteckspannung mittels des 20 pF-Kondensators erhält man Nadelimpulse, deren Breite so groß ist wie die Schaltzeit der Tunnelodiode. Diese beträgt bei den verwendeten Typen 1.3 ns. Die Kapazität von 20 pF des Kondensators wurde durch Probieren erhalten.

2.4. SCHNELLE TORSCHALTUNG UND BISTABILER UNIVIBRATOR

Die schnelle Torschaltung wird von den beiden Ge-Dioden ID3 050 und dem nachfolgenden Univibrator gebildet. Die Schaltzeit der Ge-Dioden beträgt 0.1 ns.

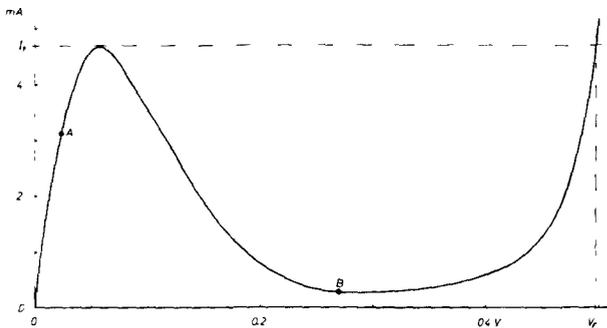


Abb. 3. Kennlinie und stabile Arbeitspunkte der Ge-Tunnelodiode 1N3716.

Im startbereiten Zustand steht die Ge-Tunnelodiode 1N3716 auf dem Punkt A der Abb. 3. Dieser Punkt wird mit dem $2.5 \text{ k}\Omega$ -Potentiometer der Abb. 2b eingestellt.

Die Ge-Diode im Startkanal ist in Leitrichtung vorgespannt, die im Stoppkanal in Sperrichtung, wenn der Univibrator startbereit ist. Weil die Ausgangs-

impulse der Impulsformer kleiner als die Schwellspannung der Ge-Diode sind, kann im startbereiten Zustand nur ein Impuls aus dem Startkanal den Univibrator umkippen. Wenn also ein Startsignal die vorgewählte Schwelle des schnellen Diskriminators erreicht, wird der bistabile Univibrator vom Punkt A auf den Punkt B gebracht.

Dadurch ändert sich die Vorspannung der Ge-Dioden so, daß die Diode im Startkanal in Sperrichtung, die im Stoppkanal in Leitrichtung vorgespannt ist. Der erste jetzt ankommende positive Nadelimpuls aus dem Stoppkanal bringt den Univibrator in die Anfangsstellung zurück.

Wegen der Zuleitungsinduktivität springt die Spannung an der 1N3716 nach Überschreiten des Höckerstromes erst auf einen Wert zwischen V_F und B und schwingt sich dann auf den Punkt B ein. Mit einer induktivitätsarmen Verdrahtung erreicht man Einschwingzeiten von 3 ns.

2.5. MECHANISCHER AUFBAU

Wegen der hohen Empfindlichkeit des Integrationsgliedes gegen Einstreuung von elektrischen Störungen (siehe Abschnitt 3.1) ist eine gute Abschirmung unumgänglich. Deshalb wurden der schnelle Diskriminator und Impulsformer im Startkanal, der Impulsformer im Stoppkanal und der bistabile Univibrator mit dem Integrationsglied in je ein vollständig geschlossenes Gehäuse aus Kupferblech von $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ eingebaut.

Die Zuleitung der Gleichspannungen geschieht über Durchführungskondensatoren.

Die "langsame" Elektronik ist auf Schaltkarten gelötet.

3. Ergebnisse

Die Eigenschaften des Zeit-zu-Impulshöhe-Konverters wurden mit den Impulsen eines Hg-Impuls-generators und den Impulsen eines Fotovervielfachers mit Plastik-Szintillator und γ -Präparat geprüft.

3.1. ELEKTRONISCHES ZEITRAUSCHEN

Um die Grenze der erreichbaren Zeitauflösung zu bestimmen, wurde der Zeit-zu-Impulshöhe-Konverter mit Impulsen einheitlicher Höhe und kurzer Anstiegszeit eines Hg-Impuls-generators betrieben. Das Blockdiagramm der Meßanordnung ist in Abb. 4 dargestellt.

Die Impulse des Hg-Impuls-generators werden mit einem Impulstransformator in je 2 Impulse verschiedener Polarität aufgespalten. Die negativen Impulse werden dem Startkanal zugeführt, die positiven dem Stoppkanal. Auf diese Weise hat jeder Startimpuls den

zugehörigen Stoppimpuls. Die schnelle Torschaltung wird daher nicht geprüft.

Die Koaxialkabel, die den Impulstransformator mit dem Start- und Stopp-Eingang des Konverters verbinden, sind verschieden lang. In der Abb. 4 sind sie durch die Verzögerungsleitungen angedeutet. Aus der Längendifferenz der beiden Kabel kann man die Differenz der Ankunftszeit zwischen Start- und Stoppsignal berechnen.

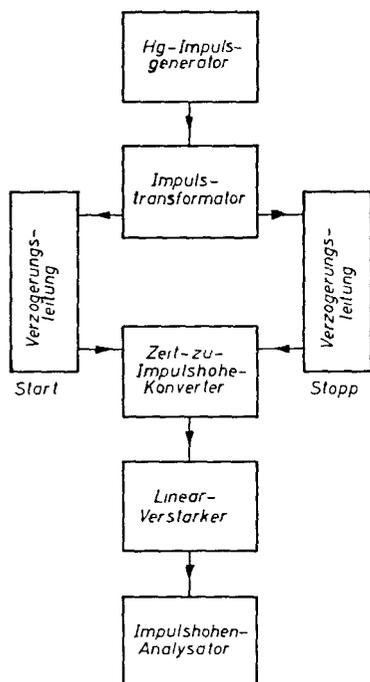


Abb. 4. Meßeinrichtung zur Bestimmung des elektronischen Zeitrauschens und der integralen Linearität des Zeit-zu-Impulshöhe-Konverters.

Für jedes Kabelpaar erhält man im Vielkanalanalysator eine Linie, deren Halbwertsbreite 0.12 ns entspricht. Diese Linienbreite ergibt sich aus dem Rauschen des Linearverstärkers, was sich mit einer direkten Messung der Rauschspannung zeigen läßt. Diese beträgt $4.6 \mu\text{V}$ effektiv am Verstärkereingang, gemessen mit dem Hewlett Packard R.M.S. Voltmeter, Model 400 D. Die Analogspannung am Eingang des Verstärkers beträgt $90 \mu\text{V/ns}$. Die Halbwertsbreite des Rauschens ($2.3 \times 4.6 \mu\text{V}$) dividiert durch die Analogspannung ergibt die gemessene Halbwertsbreite.

Der Integrationskondensator (Abb. 2a) bestimmt die Größe der Analogspannung. Verkleinert man seine Kapazität, so vergrößert man die Analogspannung und verkleinert dadurch die Linienbreite. Aber der lineare Bereich der Analogspannung wird ebenfalls kleiner. Mit einem 0.2 nF Integrationskondensator und einem

etwas schnelleren Linearverstärker wurden 15 ps Halbwertsbreite gemessen. Auch diese Linienbreite wurde praktisch nur von dem Rauschen des Verstärkers erzeugt, so daß das Rauschen am Ausgang des Konverters kleiner als 10 ps ist.

Weil mit einem Fotovervielfacher und mit einem Zyklotron keine kleinere Zeitauflösung als 1 bis 2 ns erreichbar ist, wurde eine Integrationskapazität von 2 nF gewählt. Die elektronische Zeitauflösung beträgt dann 0.12 ns. Dieser Wert ist noch vernachlässigbar gegenüber der Zeitstreuung, die vom Zyklotron und vom Fotovervielfacher stammt. Der lineare Bereich der Analogspannung beträgt dann 350 ns.

3.2. ZEITAUFLÖSUNG MIT DEM ZYKLOTRON

Bei Bestrahlung eines beliebigen Targets mit dem internen Strahl des Zyklotrons entstehen prompte γ -Strahlen im Target. Mißt man die Zeit der Ankunft dieser γ -Strahlen in einem Plastik-Szintillator in bezug auf eine Phase der Beschleunigungsspannung im Zyklotron, so erhält man eine Linie, deren Halbwertsbreite die für Flugzeitmessungen maßgebende Zeitauflösung ergibt.

Am Karlsruher Isochron-Zyklotron wurde ein dickes Cu-Target mit 30, 40 und 50 MeV-Deuteronen bestrahlt. Innerhalb des Zyklotronbunkers, in 6 m Abstand vom Cu-Target, wurde ein Detektor aufgestellt, bestehend aus einem NE102 Plastik-Szintillator (20 mm Durchmesser, 19 mm dick) mit einem 56 AVP Fotovervielfacher. Der Detektor war von allen Seiten, außer der dem Cu-Target zugewandten, mit mindestens 50 cm Normalbeton abgeschirmt. Der Anodenstrom des Fotovervielfachers wurde über ein 50 m langes Kabel in den Starteingang des Konverters geleitet. Der Stromimpuls der 14. Dynode wurde über ein Kabel mit ähnlicher Länge in einen Integrator geleitet. Der Ausgang des Integrators war an den langsamen Diskriminator der Abb. 1 angeschlossen. In den Resonanztopf des Zyklotronsenders wurde eine 0.5 cm^2 Schlaufe eingebaut, mit der man eine sinusförmige Wechselspannung mit $2.8 V_{\text{eff}}$ (33 MHz) erhält. Sie wurde in den Stoppeingang des Konverters geleitet.

Die so erhaltene prompte γ -Linie bei $E_d = 30 \text{ MeV}$ zeigt die Abb. 5. Bei 40 und 50 MeV Deuteronen wird die Neutronenproduktion größer und damit auch der Untergrund. Die prompte γ -Linie bleibt aber noch gut erkennbar.

Der Anteil der Linienbreite, die vom Zyklotron allein stammt, beträgt $1.25 \pm 0.25 \text{ ns}$.

3.3. EICHUNG DES KONVERTERS MIT PERIODISCHEN TESTIMPULSEN

Zur Eichung des Zeit-zu-Impulshöhe-Konverters

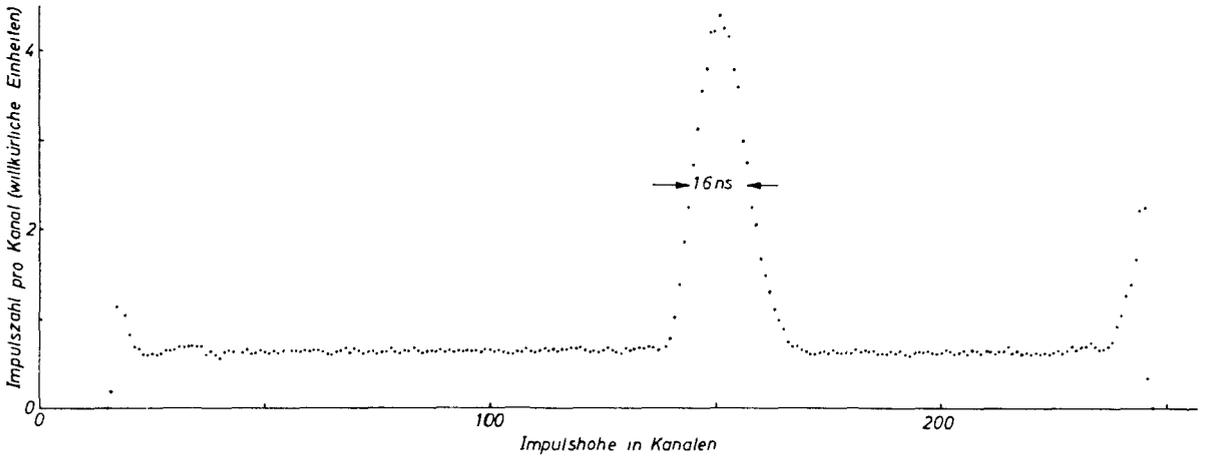


Abb. 5. Linie der prompten γ -Strahlung, die beim Beschuß eines dicken Cu-Targets mit 30 MeV-Deuteronen erhalten wurde. Es wurde kein Untergrund abgezogen.

kann man 2 Verfahren anwenden. Mit der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Methode erhält man für jede Einstellung der Verzögerungsleitungen eine Linie. Die Position dieser Linien als Funktion der zugehörigen Verzögerung des Stoppsignals gegenüber dem Startsignal zeigt die Abb. 6.

Mit dieser Methode erhält man für jeden Startimpuls den zugehörigen Stoppimpuls. Die Zeit zwischen einem Stoppimpuls und dem nächsten Startimpuls be-

trägt einige Millisekunden. Es ist also kein Einfluß von dem einem Startimpuls vorangehenden Stoppimpuls möglich.

3.4. EICHUNG DES KONVERTERS MIT DEM UNTERGRUNDSPEKTRUM

Wenn man eine hochfrequente Sinuswelle in den Stoppkanal leitet, folgen die Stoppimpulse so schnell aufeinander, daß ein Einfluß des einem Startimpuls

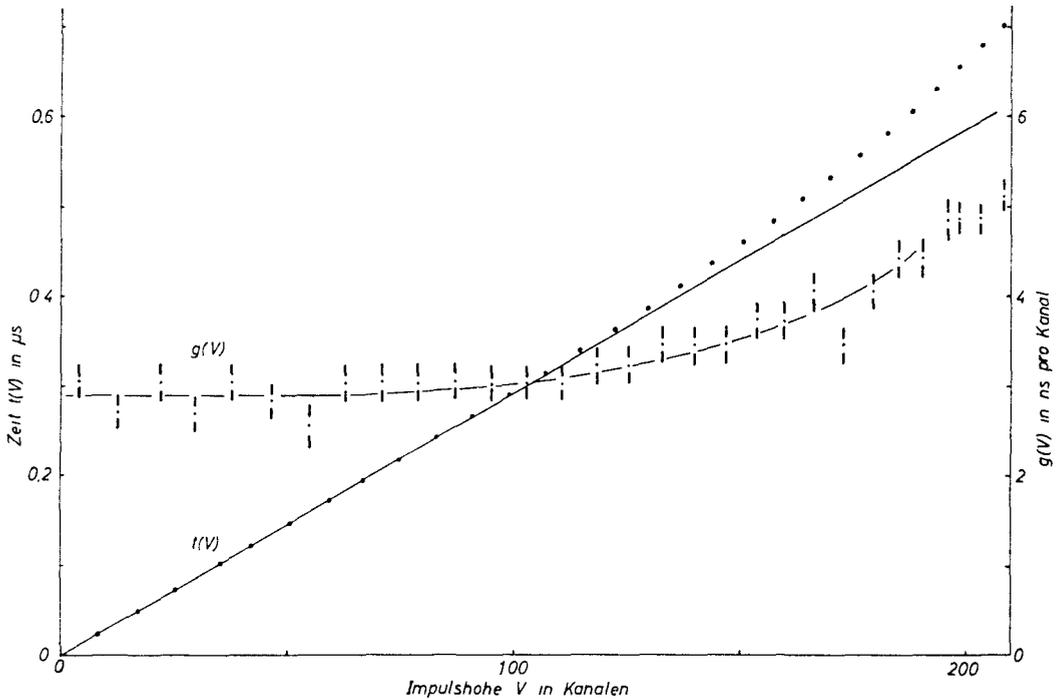


Abb. 6. Eichkurven des Zeit-zu-Impulshöhe-Konverters, die mit der Meßeinrichtung der Abb. 4 erhalten wurden. $t(V)$: Integrale Linearität, $g(V)$: Differentielle Linearität.

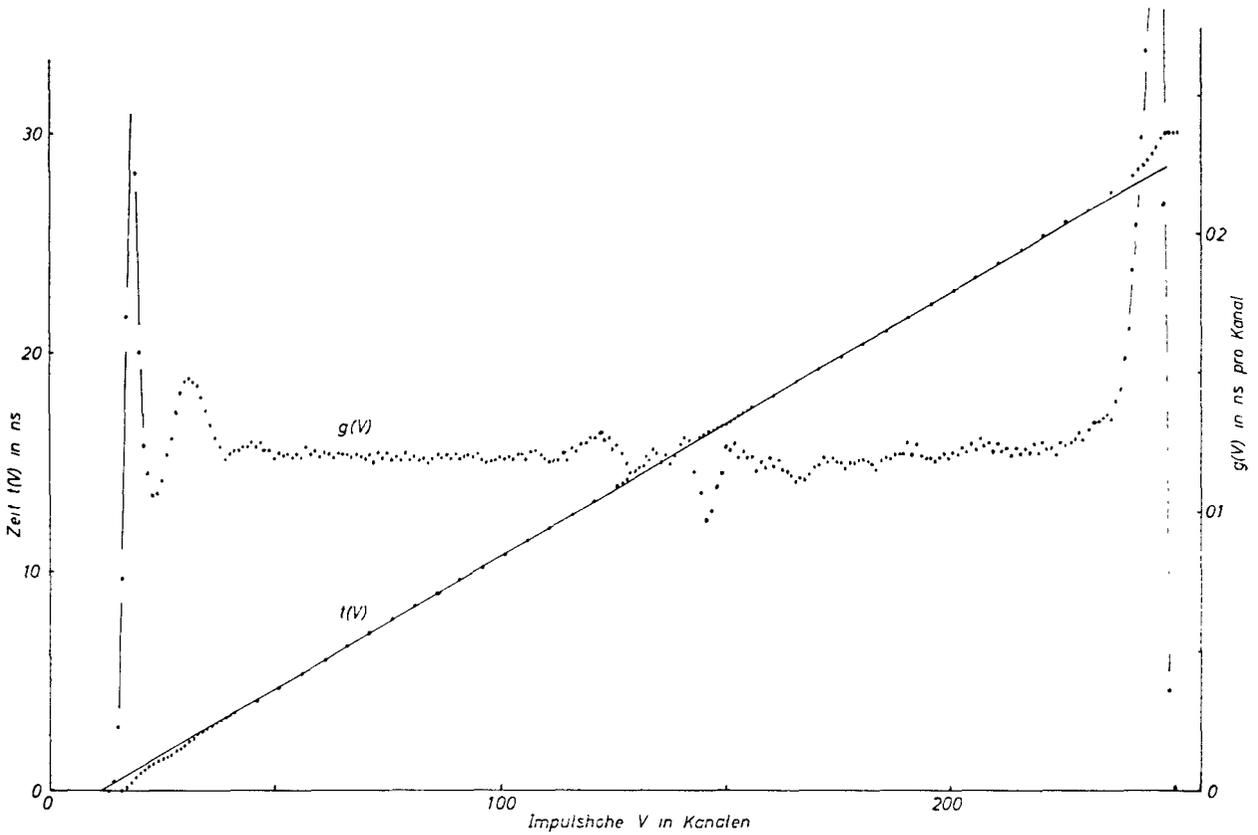


Abb. 7. Eichkurven, die aus dem in Abschnitt 3.4-beschriebenen Untergrundspektrum erhalten wurden; die Stoppfrequenz betrug 33.050 MHz.

vorangehenden Stoppimpuls zu erwarten ist. Weil dieses die normale Betriebsart des Konverters ist, muß man eine Methode anwenden, die es gestattet, die Eichkurve unter diesen Bedingungen zu erhalten.

Deshalb wurden in einer weiteren Messung als Startsignale die eines Szintillationszählers verwendet und als Stoppsignale die am Zyklotron ausgekoppelte Sinusspannung (oder die eines Oszillators mit gleicher Frequenz und Spannung). Auf diese Weise erhält man eine Art Untergrundspektrum, aus dem sich die Eichkurve berechnen läßt, weil die Zeitverteilung der Startimpulse konstant ist.

Es sei dN/dV die Zahl der in Kanal V registrierten Ausgangsimpulse des Konverters und n die Zahl der Impulse, die die Schwelle des Startkanal- und Seitenkanal-Diskriminators erreichten, multipliziert mit der Stoppfrequenz, so ist

$$g(V) = (1/n) \cdot (dN/dV),$$

$g(V)$ ist die differentielle Linearität in ns/Kanal.

Durch Aufsummieren der Kanalinhalte bis zum

Kanal V erhält man die dem Kanal V zugeordnete Zeit $t(V)$,

$$t(V) = \sum_{i=1}^V g(i) \cdot 1 \text{ Kanal.}$$

Wenn alle Startimpulse, die die Schwellen der beiden Diskriminatoren erreichen, im Impulshöhenanalysator registriert werden, ist $t(V_{\max}) = T = \text{Periode der Sinuswelle}$. Sieht man sich das Impulshöhenspektrum mit einem Oszillographen an, der mit den Startimpulsen angestoßen wird, so kann man feststellen, ob die Impulsrate am Eingang des Konverters größer ist als am Ausgang oder nicht. Das Ergebnis ist, daß beide Zählraten gleich sind, d.h.: Jeder Startimpuls, der die Diskriminatorschwelle erreicht, bekommt einen Ausgangsimpuls zugeordnet. Wenn der Startimpuls gerade auf einen Stoppimpuls fällt, befindet sich der Ausgangsimpuls in einer der beiden Endspitzen der $g(V)$ -Kurve, siehe Abb. 7.

Die Messung der $g(V)$ -Kurve läßt deutlich erkennen, daß $g(V)$ nicht völlig gleichförmig ist. Abgesehen von den Spitzen beim Ein- und Ausschalten und der Ein-

schwingung im Kanalbereich 20 bis 50, fällt die Absenkung bei Kanal 145 auf. Sie ist folgendermaßen zu erklären: Der Impulsformer im Stopppkanal macht aus der Sinuswelle eine Folge von positiven und negativen Nadelimpulsen. Die positiven Nadelimpulse sind die Stoppimpulse. Ein Teil des negativen Nadelimpulses, der nach dem Startimpuls kommt, fließt durch die in Leitrichtung vorgespannte Ge-Diode im Stopppkanal. Die Spannung an der 1N3716 wird dadurch während einer kurzen Zeit erhöht, und im Integrationskondensator wird eine zusätzliche Ladung gespeichert. In der $t(V)$ -Kurve macht sich diese Ladung durch eine geringe Parallelverschiebung der Geraden über $V=145$ zu größeren Kanälen bemerkbar. In der $g(V)$ -Kurve entsteht das Minimum. Dieses Minimum geht bei geringer Impulszahl pro Kanal im statistischen Fehler unter. Zum Beispiel ist es bei dem Spektrum der prompten γ -Linie in Abb. 5 nicht erkennbar.

Die Kanalbereiche, in denen die differentielle Linearität um mehr als 6% vom Mittelwert abweicht, sind Kanal 13 bis 35, 144 bis 148 und 229 bis 250. Die zugehörigen Zeitbereiche sind 0 bis 2.7 ns, 15.9 bis 16.4 ns und von 26.2 bis 30 ns.

Im Bereich von 0 bis 0.9 ns und von 27.6 bis 30 ns ist die Abweichung vom Mittelwert der differentiellen Linearität größer als 20%.

4. Zusammenfassung der Eigenschaften des Zeit-zu-Impulshöhe-Konverters

Speisespannung:	- 12.0 V; 0.5 W
Startsignale:	- 0.05 bis - 5 V mit $t_r \leq 2$ ns
Stoppsignale:	3 bis 40 MHz, 2.8 V_{eff} sinusförmige Spannung
Integrale Linearität:	$\pm 0.5\%$ im Bereich $T-3.3$ ns, $T \leq 350$ ns*
Differentielle Linearität:	$\pm 6.5\%$ im Bereich $T-7.0$ ns, $T \leq 350$ ns $\pm 20\%$ im Bereich $T-3.3$ ns, $T \leq 450$ ns
Maximale Zählrate:	100 kHz periodisch
Temperaturkoeffizient:	$\leq 0.7\%/^{\circ}\text{C}^{**}$

* T : Periode der Sinuswelle.

** Der Temperaturkoeffizient hängt vom Exemplar der Tunnelodiode des bistabilen Univibrators ab.

Der Verfasser möchte Herrn Dr. H. J. Langmann für die instruktiven Diskussionen danken.

Literatur

- 1) M. Bonitz, Nucl. Instr. and Meth. **22** (1963) 238.
- 2) R. L. Chase, *Nuclear Pulse Spectrometry* (McGraw Hill Book Co. 1961).
- 3) A. Whestone and S. Kounosu, Rev. Sci. Instr. **33** (1962) 423.
- 4) R. van Zurk, Nucl. Instr. and Meth. **16** (1962) 157.