

**KFA**

**KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH**  
**GESELLSCHAFT MIT BESCHRÄNKTER HAFTUNG**  
**Zentrallabor für Elektronik**

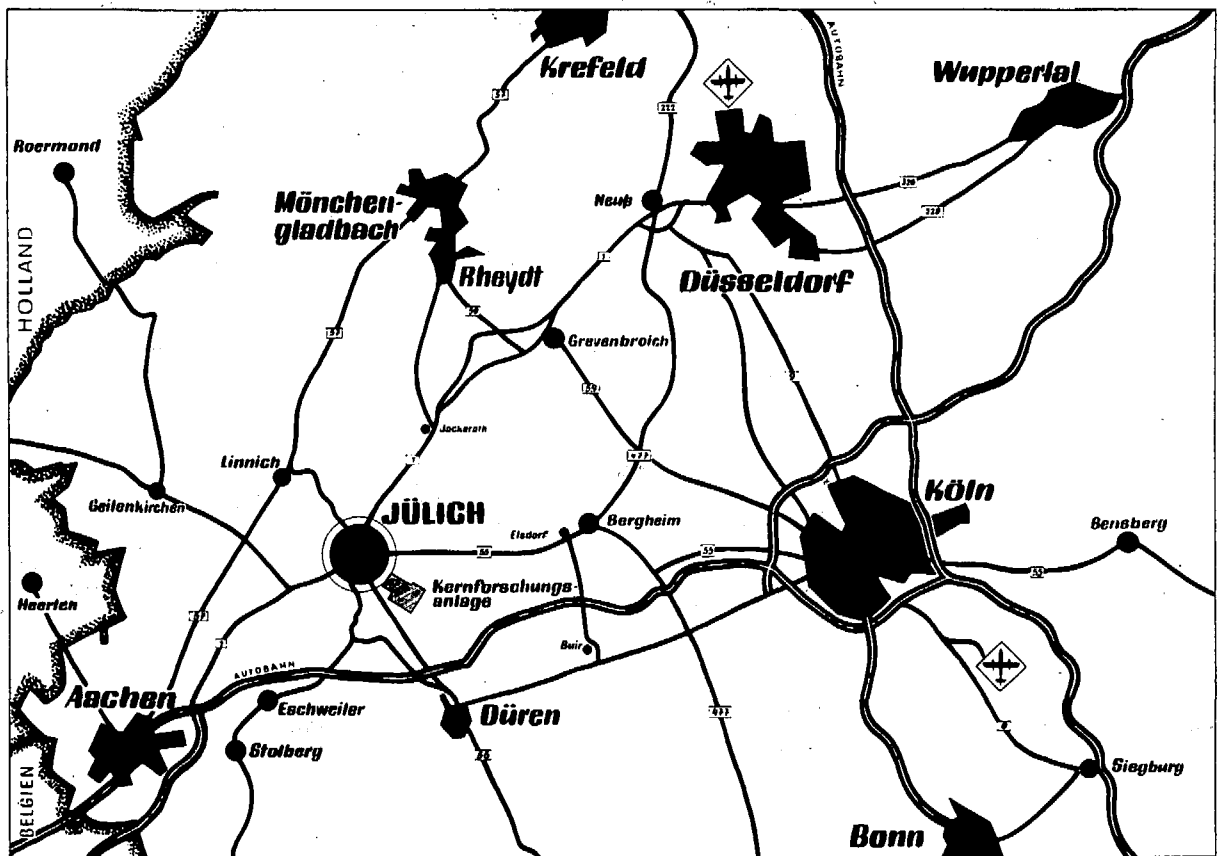
**Impulsdivisionsstufen**  
**in der nuklearen Elektronik**

von

Klaus Abend

**Jül - 660 - ZE**  
**Mai 1970**

Als Manuskript gedruckt



**Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 660**  
 Zentrallabor für Elektronik Jül – 660 – ZE

Dok.: Nuclear Physics - Electronics  
 Electronics - Nuclear Physics  
 DK: 539.1 : 621.38

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH,  
 Jülich, Bundesrepublik Deutschland

# **Impulsdivisionsstufen in der nuklearen Elektronik**

von

Klaus Abend

## G l i e d e r u n g

### 1. Einleitung

#### 1.1 Einführung

#### 1.2 Anwendung von Impulsdivisionsstufen zur:

##### 1.2.1 Impulsformdiskriminierung

##### 1.2.2 Teilchenidentifizierung, $dE/dx$ , E-Systeme

##### 1.2.3 Messung mit ortsauflösenden Detektoren

### 2. Aufzeichnung einiger Möglichkeiten für die Division von Impulsen

#### 2.1 Gegenüberstellung "analoge" und "digitale" Division

#### 2.2 "Analoge" Divisionsstufen

##### 2.2.1 Logarithmische Amplituden-Zeitkonversionstechnik mit R-C-Netzwerken

##### 2.2.2 Ausnutzung der Beziehungen zwischen Strom, Spannung und Zeit bei kapazitiven Integratoren

##### 2.2.3 Anwendung von logarithmischen Kennlinien von einzelnen, aktiven oder passiven Bauelementen

#### 2.3 "Digitale" Divisionsstufen

##### 2.3.1 Division in einem Rechner nach direkter Analog-Digital-Konversion der zu dividierenden Signale

##### 2.3.2 Anwendung des Wilkinson-Verfahrens mit variablem Kondensatorentladungsstrom zum Aufbau einer Divisionsstufe

##### 2.3.3 Verwendung eines "Stufenweise Annäherungs-ADC" mit variabler Bezugsspannung zum Aufbau einer Divisionsstufe

### 3. Zusammenfassung

## 1. Einleitung

### 1.1 Einführung

Impulsdivisionsstufen finden in nuklear physikalischen Experimenten eine immer häufigere Verwendung. Entsprechend den Anforderungen der Experimente bezüglich notwendiger Geschwindigkeit zur Verarbeitung hoher Zählraten oder aber notwendiger Genauigkeit finden entweder analoge oder digitale Divisionsstufen Verwendung.

Insbesondere werden Divisionsstufen bei der Impulsformdiskriminierung, bei der Teilchenidentifizierung in  $dE/dx$ , E-Systemen und bei ortsauflösenden Detektoren eingesetzt.

### 1.2

#### 1.2.1 Impulsformdiskriminierung

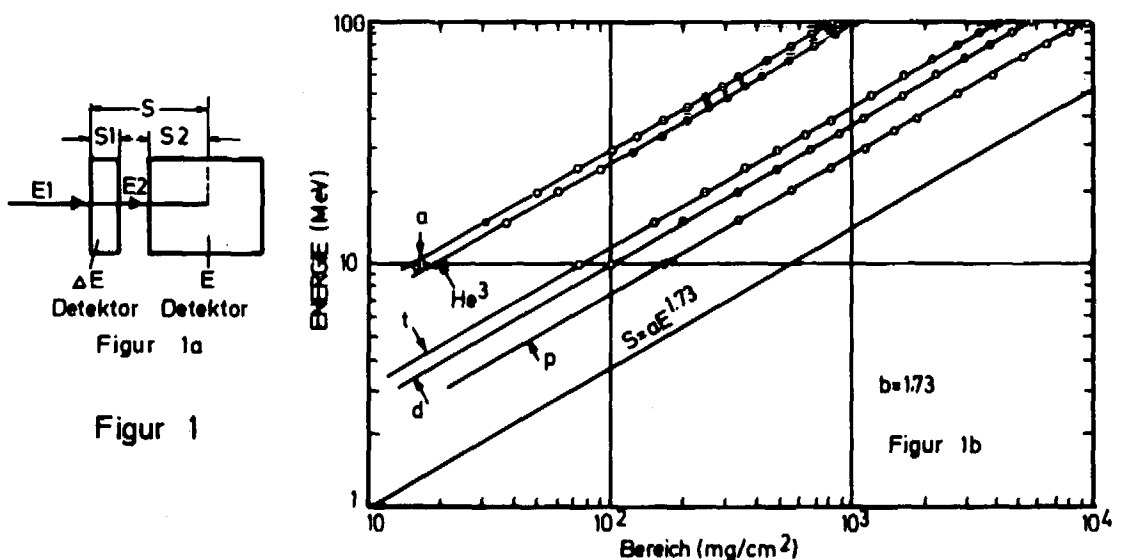
Bei dem Einsatz von methangefüllten Proportionalzählrohren zur Messung eines schnellen Neutronenspektrums ist die bei niedrigen Energien ( $\leq 10$  KeV) auftretende Ionisation durch die Rückstoßprotonen vergleichbar mit der Ionisation durch  $\gamma$ -Strahlung aus dem Untergrund. Bei der Betrachtung der spezifischen Ionisation durch Rückstoßprotonen bzw.  $\gamma$ -Strahlung und der daraus resultierenden Impulsform am Zählrohrarbeitswiderstand ist es möglich, durch Impulsformdiskriminierung Neutronen wesentlich niedrigerer Energie zu messen, obwohl die gemessenen Impulshöhen gleich sind. Die Weglänge von einem 100 KeV Proton in einem 2 Atm. methangefüllten Zählrohr ist ungef. 0,5 cm, dagegen hat ein durch  $\gamma$ -Strahlung entstehendes Konversionselektron der gleichen Energie eine Weglänge von ungef. 8 cm. Wenn zum Beispiel die Projektion der Ionisationsspur des Elektrons auf den Zähldraht in einem 5 cm Durchmesser-Zählrohr zwischen 1 und 2 cm schwankt, so resultiert daraus ein veränderlicher Impulsanstieg von etwa 0,3  $\mu$ sec. am Arbeitswiderstand des Zählrohres. Der Impulsanstiegsunterschied bei einem Impuls, der durch Rückstoßprotonen ausgelöst wird, beträgt dagegen im gleichen Zählrohr bei einer Projektionslänge der Ionisationsspur auf den Zähldraht von 0,05 cm nur etwa 0,002  $\mu$ sec. Durch Verhältnisbildung von Impulshöhenmaximum am Zählrohr zu der Impulshöhe des nach einer festen Zeit während des Anstiegs "geklippten" Impulses ist somit eine prinzipielle Teilchendiskriminierung möglich.

### 1.2.2 Teilchenidentifizierung, $dE/dx$ , $E''$ - Systeme

Verschiedene geladene Teilchen gleicher Energie verlieren in Absorbern unterschiedlich an Energie. Es gilt die Beziehung für den Energieverlust  $dE/dx$  durch Teilchen mit der Energie  $E$ .

$$dE/dx \approx m \cdot Z^2/E \quad (1)$$

Wobei  $m$  gleich der Masse des Teilchens und  $Z$  seine Ordnungszahl ist. Mit einem sehr dünnen Detektor, in dem ein Teilchen einen Teil seiner Energie verliert, läßt sich prinzipiell die Teilchenart bestimmen. Ein anderes System zur Teilchenidentifizierung, welches die Verarbeitung eines weiten Energiebereiches für unterschiedliche Teilchenarten gestattet, bietet die in Bild 1 a gezeigte Detektoranordnung. [1]



In Bild 1 b ist dargestellt, daß bei leichten Nukliden für Energien oberhalb 3 MeV die empirische Beziehung gilt:

$$S = a \cdot E^b \quad (2)$$

Mit  $S$  = Reichweite im Detektor,  $a$  = Teilchenkonstante,  $b$  = Konstante, proportional zur Veränderungsrate des Energieverlusts und  $E$  = Teilchenenergie.

Unter Benutzung dieser Beziehung gestattet das in Bild 1 a dargestellte Detektorsystem zusammen mit einer Divisionsstufe, daß eine von der Teilchenenergie E weitgehend unabhängige Information über die Teilchenart gewonnen werden kann. Es gilt, wenn der  $\Delta E$ -Detektor direkt auf dem E-Detektor montiert ist:

$$S = S_1 + S_2 = a \cdot E_1^b \quad (3a)$$

$$S_2 = a \cdot E_2^b \quad (3b)$$

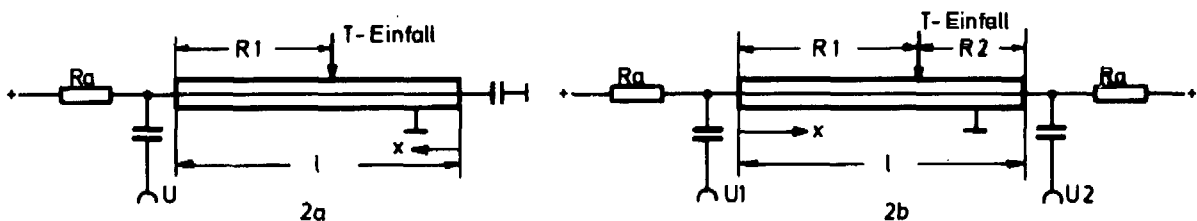
$$\frac{S_1}{a} = E_1^b - E_2^b \quad (3c)$$

$$\frac{S_1}{a} = (E + \Delta E)^b - E^b \quad (3d)$$

Durch die Messung der beiden Signale am  $\Delta E$  und am E-Detektor und durch die Verhältnisbildung kann somit eine weitgehend energieunabhängige Information über die detektierte Teilchenart gewonnen werden.

### 1.2.3 Messung mit ortsauflösenden Detektoren

Der Einsatz von Halbleiterzählern mit Widerstandsmaterial oder Proportionalzählrohren mit Widerstandsdraht gestattet den lokalisierenden Nachweis von Teilchen.



Figur 2

In Bild 2a ist ein solcher Detektor dargestellt. Sind die nachzuweisenden Teilchen monoenergetisch, ist die Gasverstärkung konstant und treten keine Wandeffecte auf, so wird am Arbeitswiderstand  $R_a$  ein Signalimpuls erzeugt, dessen Amplitude  $U$  direkt proportional zum Einfallort  $x$  längs des Detektors ist. Es gilt,

mit  $\rho_0$  = spezifischer Widerstand des Widerstandmaterials und  $R_a$  wesentlich größer als  $\rho_0 \cdot \ell$ :

$$U = Q_0 \cdot x \cdot \rho_0 = Q_0 \cdot R_1 \quad (4)$$

mit  $Q_0$  = Konstante Ladungsmenge, die durch das monoenergetische Teilchen im Detektor erzeugt wird. Die in Bild 2b dargestellte Anordnung dagegen gestattet, zusammen mit einer Impulsdivisionsstufe, eine von der Teilchenenergie unabhängige Messung des Einfallortes des Teilchens. Es gelten die Beziehungen:

$$\frac{U_1}{Q_0 \cdot [\rho_0 \cdot x + R_a]} = \frac{R_a}{\rho_0 \cdot x + R_a} \quad (5a)$$

$$\frac{U_2}{Q_0 \cdot [\rho_0 \cdot (1-x) + R_a]} = \frac{R_a}{\rho_0 \cdot (1-x) + R_a} \quad (5b)$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_a + \rho_0 \cdot (1-x)}{R_a + \rho_0 \cdot x} \quad (5c)$$

Das Verhältnis  $U_1/U_2$  ist damit ein Maß für den Ort des Teilchen-nachweises im Detektor, das eine von der Teilchenenergie unabhängige Ortsinformation liefert. Der Quotient  $U_1/(U_1+U_2)$  ist sogar eine lineare Funktion vom Ort.

## 2. Aufzeichnung einiger Möglichkeiten für die Division von Impulsen

### 2.1 Gegenüberstellung "analoge" und "digitale" Division

Für die Durchführung der Impulsdivision werden drei Verfahren angewendet:

Die Division mit reinen Analogstufen, die digitale Division und eine Kombination beider Verfahren. Bei der Division mit Analogstufen werden die Proportionalität zwischen  $U$  und  $I$  oder auch  $U$ ,  $I$  und  $t$  an aktiven oder passiven Bauelementen für die Rechenoperation ausgenutzt.

Bei der digitalen Division werden die beiden durcheinander zu dividierenden Impulsamplituden zunächst direkt digitalisiert und dann durcheinander dividiert. Bei dem dritten Verfahren werden die beiden Impulsamplituden zunächst analog oder digital miteinander verglichen und das Ergebnis des Vergleiches direkt in digitaler Form angeboten. -

Je nach den Anforderungen des Experimentes und dem möglichen elektronischen Aufwand fällt die Entscheidung für eines der Systeme. Im weiteren Teil des Berichtes werden die wichtigsten bekannten Divisionsverfahren erläutert und miteinander bezüglich Auflösung, Geschwindigkeit und Dynamik verglichen.

## 2.2 Analoge Divisionsstufen

### 2.2.1 Logarithmische Amplituden-Zeitkonversionstechnik mit R-C-Netzwerken

Der Entladevorgang eines Kondensators über einen Festwiderstand wird beschrieben durch die Gleichung:

$$U(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (6)$$

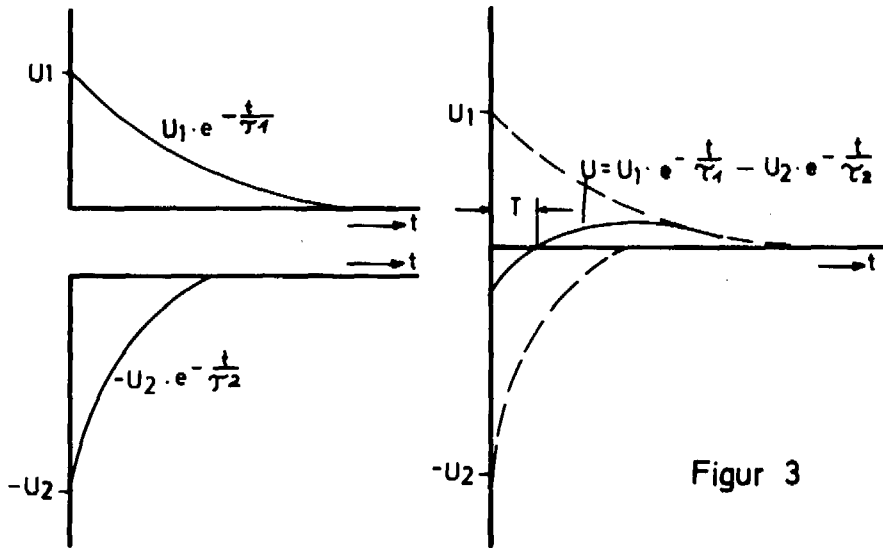
Dabei ist  $U_0$  die Kondensatorspannung, bei der die Entladung einsetzt, und  $\tau$  die Zeitkonstante  $R \cdot C$  ;

$R$  = Entladewiderstand und  $C$  = Kondensatorkapazität.

Von Biggerstaff [2] wurde diese Beziehung zum ersten Mal für den Bau einer Impulsdivisionsstufe ausgenutzt.

Zunächst werden zwei Kondensatoren auf die Spannungen der durcheinander zu dividierenden Impulse  $U_1$  und  $-U_2$  aufgeladen (Fig. 3). Danach werden die Kondensatoren in einer festen Zeitkonstante entladen und die Spannungen gleichzeitig addiert.

(Figur 3 s. Seite 6)



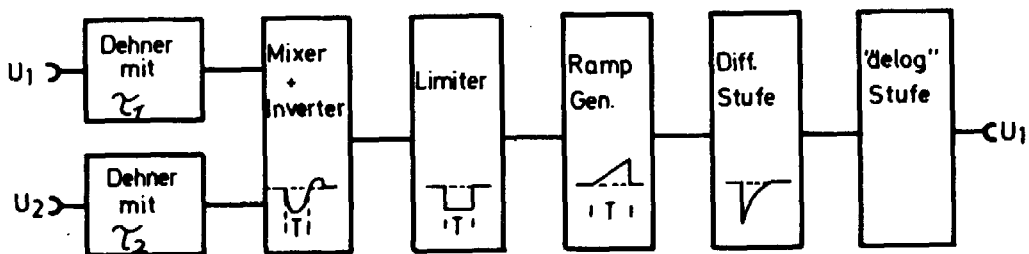
Figur 3

Die Zeit  $T$ , bis die Spannungssumme gleich Null wird, ist ein Maß für das Verhältnis  $U_1/U_2$ . Es gilt die Beziehung:

$$T = \frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \cdot \ln \cdot \frac{U_1}{U_2} \quad (7)$$

Diese Schaltung hat den Nachteil, daß erstens  $U_2$  immer größer als  $U_1$  sein muß und daß zweitens die Zeitdauer der Division von den Eingangssignalamplituden abhängt, und daß drittens der Zusammenhang zwischen Meßgröße und Quotient nicht linear ist.

Von E. F. Bennet [3] wurde eine nach diesem Prinzip arbeitende Schaltung angegeben, die von K. Abend und J. Lips [4] für die Impulsformdiskriminierung zwischen Rückstoßprotonenimpulsen aus wasserstoffgefüllten Proportionalzählrohren und Impulsen von Konversionselektronen des Zählrohrs gebaut worden ist. Fig. 4 zeigt das Blockschaltbild der Divisionsstufe,



Figur 4

Das Eingangssignal der Divisionsstufe,  $U_1$ , ist der stark differenzierte Impuls des Zählrohres und  $U_2$  der Originalimpuls des Zählrohres. Die Divisionsschaltung wurde mit Röhren aufgebaut und dividierte bei einer Dynamik  $D = 1:3$  mit einer Genauigkeit von 1 % und bei einer Dynamik von  $D = 1:8$  mit einer Genauigkeit von 15 %. Die Schaltung verarbeitet Eingangsimpulse für  $U_1 \geq 1$  Volt und liefert Ausgangsimpulse entsprechend den Verhältnissen  $U_1/U_2$  zwischen 15 und 95 Volt. Die maximale Impulsrate, die mit der Divisionsstufe verarbeitet werden konnte, lag bei etwa 1000 Impulsen/sec.

Von Kuhlmann [5] wurde eine Schaltung in Transistortechnik mit etwa gleicher Dynamik und Genauigkeit, die nach diesem Prinzip arbeitet, veröffentlicht.

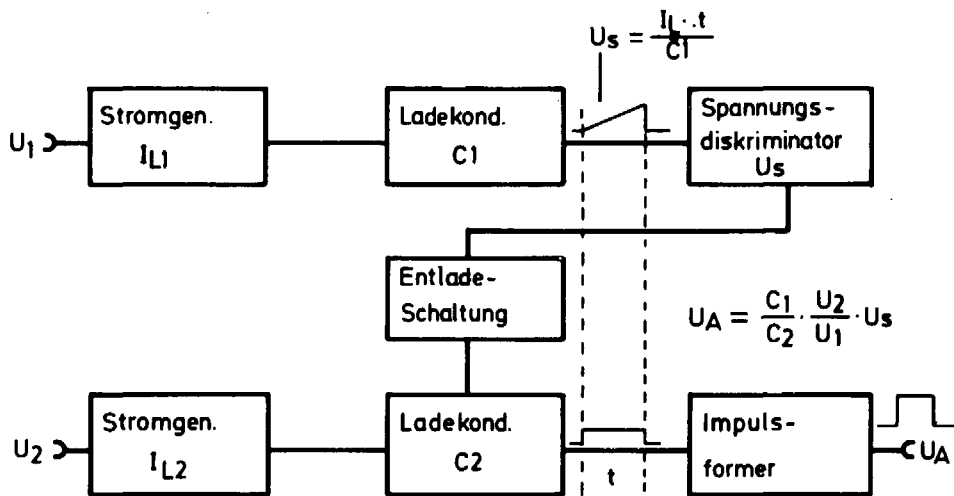
#### 2.2.2 Ausnutzung des Verhältnisses von Spannung, Strom und Zeit in kapazitiven Integratoren

Wird ein Kondensator mit einem konstanten Strom aufgeladen, so steigt die Spannung am Kondensator proportional der Ladezeit an. Befindet sich an dem Kondensator ein Diskriminator, der bei Erreichen einer Kondensatorspannung  $U_s$  anspricht, so ist die Zeit, die bis zum Erreichen dieser Schwelle notwendig ist, gegeben durch

$$t = C \cdot U_s / I_L \quad (8)$$

Mit  $C$  = Kondensatorkapazität,  $U_s$  = Schwellspannung des Diskriminators und  $I_c$  = Ladestrom des Kondensators. Von Zukuda [6] wurde diese Beziehung zum Aufbau einer Impulsdivisionsstufe ausgewertet. In Fig. 5 ist die Funktion der Divisionsstufe dargestellt.

(Figur 5 s. Seite 8)



Figur 5

Die beiden Kondensatoren C1 und C2 werden mit den Strömen  $I_{L1}$  und  $I_{L2}$ , die proportional den Eingangsamplituden  $U_1$  und  $U_2$  sind, aufgeladen. Erreicht die Spannung am Kondensator C1 nach der Zeit  $t$  die Ansprechschwelle  $U_s$  und wird zu diesem Zeitpunkt die Aufladung des Kondensators C2 gestoppt, bzw. eine Entladung eingeleitet, so gilt dann für  $U_A$ , die Spannung an C2,

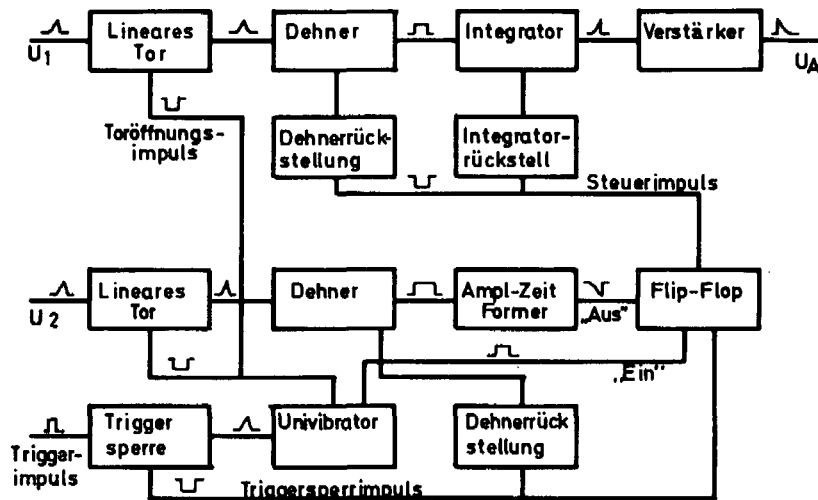
$$U_A = \frac{I_{L2} \cdot t}{C_2} \quad (9)$$

Mit Gleichung (8) wird dann

$$U_A = \frac{I_{L2} \cdot C_1}{I_{L1} \cdot C_2} \cdot U_s = \frac{U_2 \cdot C_1}{U_1 \cdot C_2} \cdot U_s \quad (10)$$

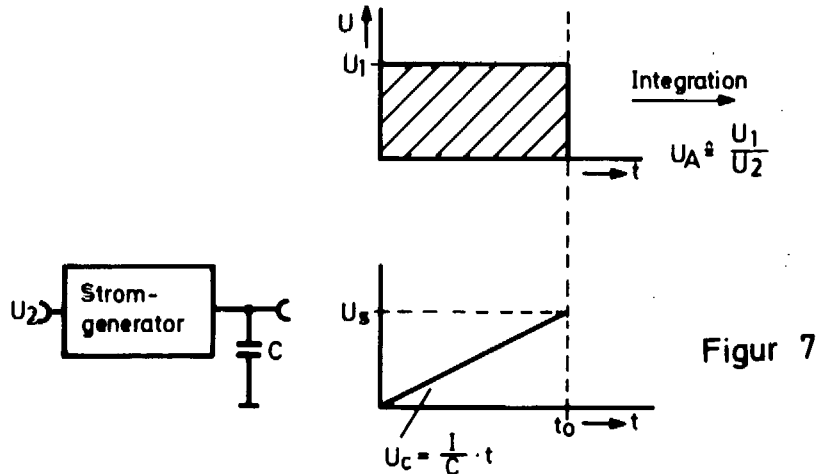
Die Spannung  $U_A$  ist damit direkt proportional dem Verhältnis der beiden Eingangsamplituden.

Auch diese Schaltung hat den Nachteil, daß immer  $U_1$  größer als  $U_2$  sein muß und daß die Divisionszeit abhängig ist von der Höhe der Eingangsimpulse. Dagegen hat sie gegenüber der in 2.2.1 dargestellten Schaltung den Vorteil der direkten Proportionalität. Von Kuhlmann [7] wurde eine Schaltung aufgebaut, die nach einem solchen Prinzip arbeitet. Das Blockdiagramm ist in Fig. 6 dargestellt.



Figur 6

Die kompletten Schaltungsunterlagen sind in [7] beschrieben. Die Funktion dieser Schaltung ist etwas anders als die der von Zukuda beschriebenen Schaltung. In Fig. 7 ist das Prinzip der von Kuhlmann verwendeten Schaltung dargestellt.



Figur 7

Es wird  $U_1$  so lange gedehnt, bis der Kondensator C auf die Schwellenspannung  $U_s$  des Diskriminators aufgeladen ist, dabei repräsentiert das Erreichen der Schwellenspannung  $U_s$  das Ende der Amplituden-Zeitkonversion (siehe Fig. 6). Die Aufladung von C erfolgt mit einem zu  $U_2$  proportionalen Strom. Bis zum Erreichen der Schwellenspannung  $U_s$  wird die  $U_1(t)$ -Charakteristik integriert, die schraffierte Fläche aus Figur 7 ist proportional  $U_1/U_2$ .

Diese von Kuhlmann aufgebaute Schaltung ist in Röhrentechnik und hat eine Dynamik von etwa 1:5. Die Schaltung verarbeitet Eingangsimpulse für  $U_1$  zwischen 30 und 100 V und für  $U_2$  zwischen 10 und 33 V. Die maximale Impulsfolgefrequenz ist 5 KHz für eine Dynamik  $D = 1:3$ , mit einer Linearität von  $< 10\%$

### 2.2.3 Ausnutzung der logarithmischen Kennlinien einzelner aktiver oder passiver Halbleiterbauelemente

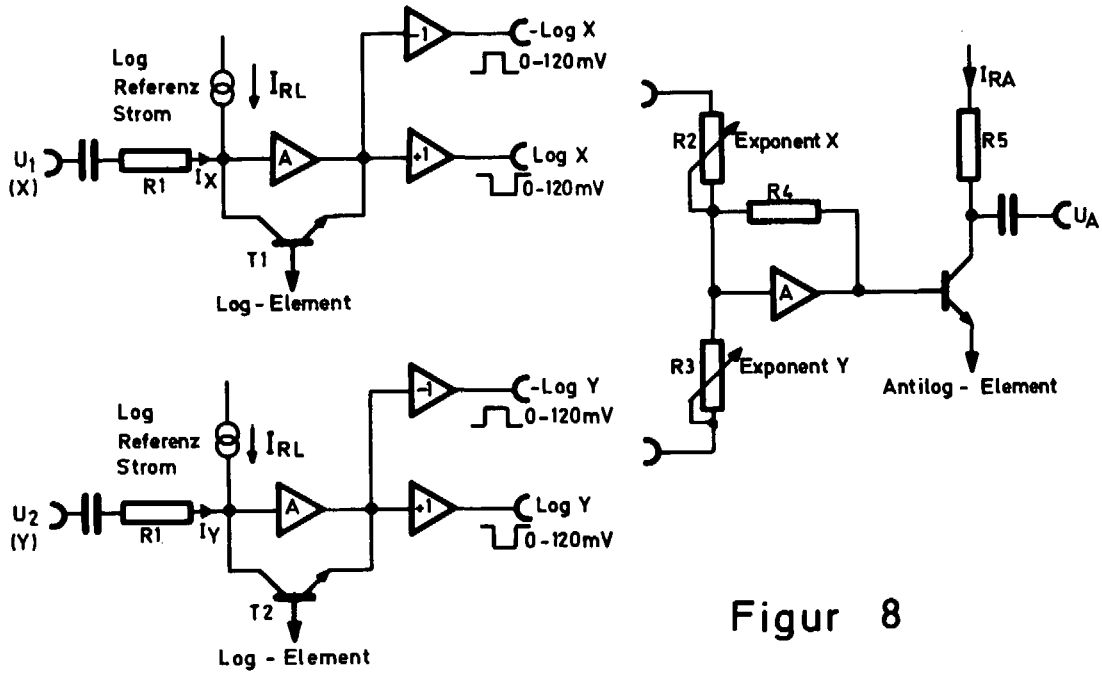
Der p-n-Übergang in Diode und Transistor zeigt eine logarithmische Proportionalität zwischen Strom und Spannung. Von Sah [8] ist gezeigt worden, daß das Stromspannungsverhältnis bei einer Diode nicht exakt durch eine reine Exponentialfunktion beschrieben werden kann, da der Diodenstrom zusätzlich eine Oberflächenleckstrom-Komponente und eine Rekombinationskomponente enthält. Ein Einsatz von Dioden als "Log"-Element bei Divisionsstufen hoher Genauigkeit ist daher nicht sinnvoll. Dagegen ist der Kollektorstrom  $I_c$  eines Transistors, wenn die Spannung zwischen der Basis des Transistors und dem Kollektor  $U_{CB} = 0$  ist, exakt proportional dem Exponenten der Emitter-Basis-Spannung  $U_{eB}$  am Transistor.

Dieses Verhältnis, das bei einigen Transistoren über 9 Dekaden für  $I_c$  gilt, wird beschrieben durch die Gleichung

$$I_c = I_1 \cdot [\exp(q \cdot U_{eB} / KT) - 1] \quad (11a)$$

$$\frac{K \cdot I}{q} = 25.9 \text{ mV} \quad (11b)$$

Von Gibborn, Horn und Petterson sind Transistoren als logarithmische Elemente in analogen Impulsdivisionsstufen zum ersten Mal eingesetzt worden. Von Strauss [9] ist ein universeller Analog-Impulshöhenrechner entwickelt worden, der zuerst in Deutschland von Fieg und Werle [10] und von K. Abend und E. Bittl [11] nachgebaut worden ist.



Figur 8

In Fig. 8 sind die prinzipiellen Blockschaltbilder der von Strauss entwickelten Einheiten für einen Rechner dargestellt. Die Einheiten können so zusammengeschaltet werden, daß die folgenden Rechenoperationen durchgeführt werden können:

$$Y = K \cdot X \quad (12a)$$

$$Y = \log_b \cdot x \quad (12b)$$

$$Y = b^x \quad (12c)$$

$$Y = x^K \quad (12d)$$

$$0.4 \leq K \leq 2.5 \quad (12e)$$

Dabei sind X die Amplituden der Eingangssignale, Y die Amplitude des Ausgangsimpulses.

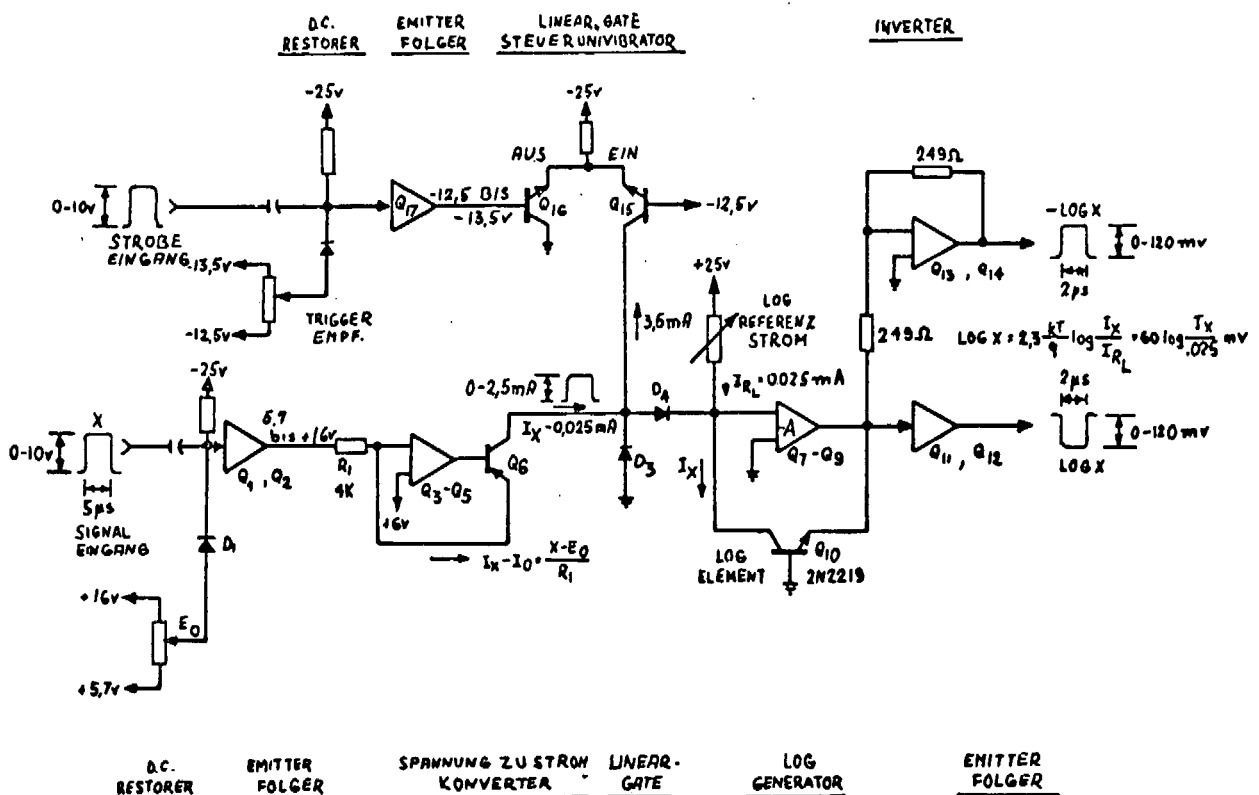
Die beiden zu dividierenden Eingangsspannungen  $U_1$  und  $U_2$  (siehe Figur 8) erzeugen einen Strom  $I_x$  bzw.  $I_y$ , die proportional der Höhe von  $U_1$  und  $U_2$  sind. Die logarithmische Konversion wird in den Transistoren  $T_1$  und  $T_2$  erzeugt, die als Rückkopplungselemente der Operationsverstärker mit der Verstärkung A geschaltet werden. Die Ausgangsspannung des Verstärkers ist proportional dem Logarithmus des Kollektorstroms der Transistoren  $T_1$  bzw.  $T_2$ . Der Kollektorstrom  $I_c$  der Transistoren  $T_1$  und  $T_2$  besteht aus den Komponenten  $I_{RL}$  und dem Eingangsstrom  $I_x$  bzw.  $I_y$ . Dabei gilt die Beziehung:

$$\Delta U_{EB} = \frac{K \cdot T}{q} \cdot \ln \left( \frac{I_{RL} + I_x}{I_{RL}} \right) = \frac{K \cdot T}{q} \cdot \ln \left( \frac{I_x}{I_{RL}} + 1 \right) = \log X \quad (13)$$

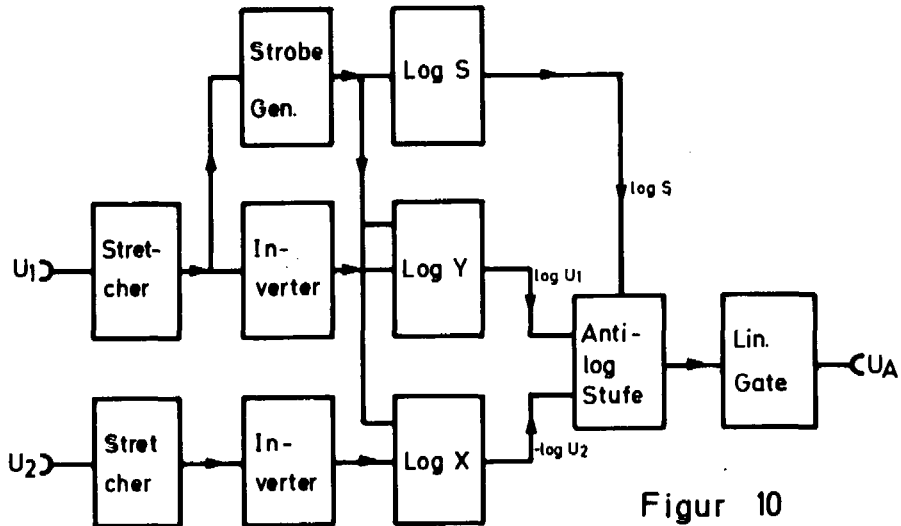
Wird dagegen der "Log"-Transistor mit der Stromdifferenz  $I_x - I_{RL}$  beaufschlagt, so gilt die Beziehung:

$$\log X = \Delta U_{EB} = \frac{K \cdot T}{q} \cdot \ln \cdot \frac{I_x}{I_{RL}} = 2,3 \cdot \frac{K \cdot T}{q} \cdot \log \frac{I_x}{I_{RL}} \quad (14)$$

Die Schaltung einer solchen Logarithmierstufe ist in Fig. 9 dargestellt:



Das Blockschaltbild einer Divisionsstufe, die mit solchen "Log"-Stufen aufgebaut wurde, zeigt Fig. 10. [11]



Figur 10

Die Einführung der zusätzlichen "Log-S"-Stufen gestattet eine Anpassung der Ausgangsspannung an die Anforderungen der nachfolgenden Schaltung. Dieser Rechner hat den Vorteil, daß, im Gegensatz zu den unter 2.2.1, 2.2.2 berichteten Divisionsstufen sowohl  $U_1$  als auch  $U_2$  unabhängig voneinander veränderlich sind, es kann  $U_1$  größer als  $U_2$  oder auch  $U_1$  kleiner als  $U_2$  gewählt werden. Außerdem ist die Verarbeitungszeit konstant und unabhängig von der Amplitude der Eingangsspannungen. Die in [12] gebaute Schaltung zeigte folgende Charakteristiken:

Variation der Eingangsspannung  $U_1$  bzw.  $U_2$  zwischen 0,35 V und 9,5 V, damit wird die Dynamik  $D = 1 : 25$  bei einer Genauigkeit von  $\pm 1,5 \%$ . Durch den Skalenfaktor "Log-S" läßt sich die Ausgangsspannung unabhängig vom absoluten Wert der Eingangsspannung variieren zwischen 0,3 und 10 V. Die minimal einstellbare Verarbeitungszeit beträgt 3,8  $\mu\text{sec}$ , das Ausgangssignal als analoge Spannung steht aber schon nach minimal 2,5  $\mu\text{sec}$  zur Verfügung. Die maximal zu verarbeitende Impulsfolgefrequenz beträgt bei der oben angegebenen Genauigkeit 85 KHz.

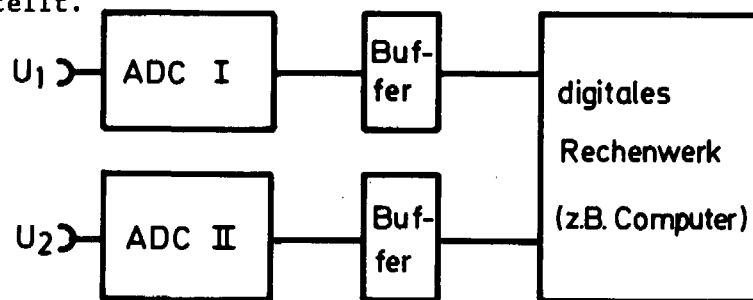
## 2.3 Digitale Divisionsstufen

### 2.3.1 Division in einem Rechner nach direkter Analog-Digital-Konversion der zu dividierenden Signale

Analog-Digital-Konverter, die nach dem Wilkinson-Prinzip mit einer Dekodierfrequenz von 200 MHz arbeiten, erlauben eine Unterteilung von 10 V Eingangsspannung in 8192 Kanäle, entsprechend einer Auflösung von 13 bit, in etwa 45  $\mu$ sec. Analog-Digital-Konverter, die nach dem Wäge-Prinzip oder einer Mischung aus beiden Verfahren arbeiten, erlauben heute die Auflösung einer 10 V Eingangsspannung in 12 bit mit einer festen Totzeit von etwa 17  $\mu$ sec. - Sollen zwei analoge Impulse  $U_1$  und  $U_2$  digital durcheinander dividiert werden, so können die dazu notwendigen beiden digitalen Werte also nach etwa 17  $\mu$ sec. zur Verfügung stehen. Unter Einbeziehung aller möglichen Fehler bei der Digitalisierung sind z.B. für eine 7 bit Genauigkeit nach der Division und einer Dynamik von 1:8 der Eingangssignale zwei 11-bit-ADC's notwendig.

Höher auflösende ADC's erlauben eine größere Genauigkeit oder Dynamik; das gilt insbesondere, wenn die Entladung des Kondensators bei einem Wilkinson ADC z.B. durch einen Strom mit exponentieller Charakteristik erfolgt. Die auftretende nicht-lineare Kennlinie kann durch Kennlinienkorrektur im Digitalrechner berücksichtigt werden.

In Fig. 11 ist das Blockschaltbild einer solchen Divisionsstufe dargestellt.



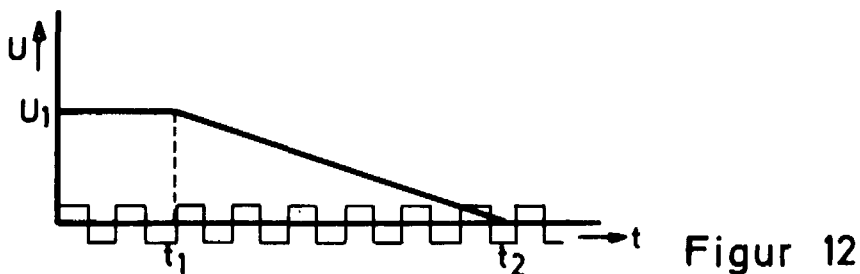
Figur 11

Nach der Digitalisierung in den beiden ADC's stehen die digitalen Worte in den beiden Speichern zur Verfügung und können von dem Rechner oder dem Rechenwerk übernommen werden. Mit einer fest verdrahteten, schnellen Divisionseinheit in einem Digitalrechner kann die Division heute in etwa 10 bis 15  $\mu$ sec durchgeführt und anschließend im digitalen Speicher abgespeichert werden. Andere schnelle "Hardware"-Divisionsstufen erlauben heute eine Division in 200 - 300 n-sec. Werden die beiden digitalisierten Werte dagegen direkt in einen Kleinrechner übernommen, und muß dort eine

"programmierte Division" durchgeführt werden, so können Verarbeitungszeiten allein für die Division von etwa 1 Millisekunde entstehen. Steht also keine schnelle Divisionsstufe zur Verfügung, so ist bei einer Impulsrate von etwa 1 KHz dieses Verfahren bereits nicht mehr verwendbar. Dagegen erlaubt die Verwendung von 2 kommerziellen ADC eine Dynamik der Eingangssignale von  $D=1 : 32$ , die beiden Eingangssignale können unabhängig voneinander variieren, zur Erzielung einer Genauigkeit von besser als 1 % aber sind ADC von mindestens 13 bit Auflösung erforderlich.

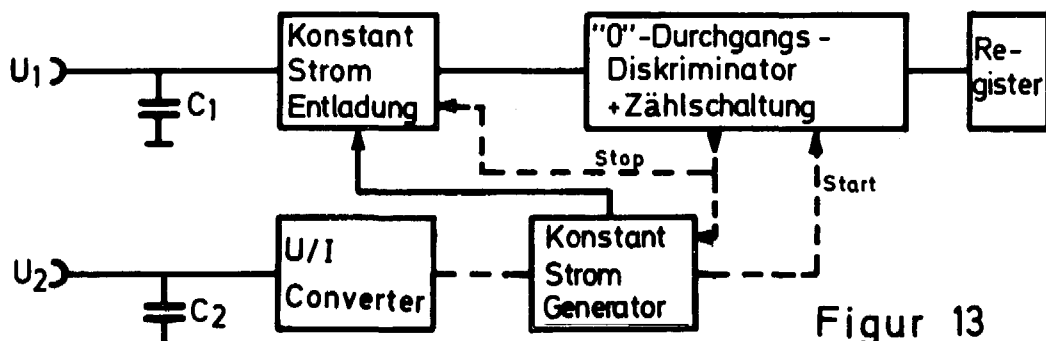
### 2.3.2 Anwendung des Wilkinson-Verfahrens mit variablem Kondensatorentladestrom zum Aufbau einer Divisionsstufe

Bevor auf die von Miller [13] entwickelte Divisionsstufe eingegangen wird, soll zunächst kurz das bereits unter 2.3.1 erwähnte Wilkinson-Verfahren erläutert werden. Ein Kondensator wird durch einen Spannungsimpuls der Amplitude  $U_1$  aufgeladen (siehe Fig. 12).



Nach einer Synchronisationszeit  $t_1$ , in der ein Oszillator mit dem Zeitpunkt der Kondensatorentladung synchronisiert wird, wird der Kondensator mit einem konstanten Strom entladen. Für die Dauer der Entladung, bis  $U_c = 0$  ist, wird die Zahl der Nulldurchgänge der Oszillatorspannung gezählt und am Ende der Entladung abgespeichert. Der Wert der abgespeicherten Zahl ist dann direkt proportional zur Spannungsamplitude  $U_1$ .

Von Miller und Senator [12] wurde ein Verfahren vorgestellt, bei dem dieses Prinzip zum Aufbau einer Divisionsstufe verwendet wurde. In Fig. 13 ist das Blockschaltbild der Schaltung dargestellt:



Bei dieser Schaltung sind wieder die Impulsamplituden  $U_1$  und  $U_2$  die durcheinander zu dividierenden Signale. Zur Digitalisierung von  $U_1$  nach dem Wilkinson-Verfahren wird von dem Konstantstrom-generator der Entladestrom von  $C_1$  gesteuert. Der Wert des Entladestroms von  $C_1$  wird durch den Spannungsstrom-Konverter entsprechend dem Wert von  $U_2$  gebildet. Im Ausgangsspeicher der Divisionsstufe steht dann direkt das Verhältnis der beiden Spannungen  $U_1$  und  $U_2$ .

Mit der hier gezeigten Schaltung, die in Transistortechnik aufgebaut ist, ist eine Dynamik der Eingangssignale von 1 : 8 erreicht worden bei einer Variation von  $U_1$  und konstanten  $U_2$ ; mit einer Genauigkeit von 0,1 %. Die Gleichzeitige Variation von  $U_2$  mit einer Dynamik von 1 : 2 verschlechterte sich die Genauigkeit auf 0,2 %. Bei dem ausgelegten System ist  $U_2$  immer größer als  $U_1$  gewählt worden, diese Beschränkung ist prinzipiell nicht notwendig.

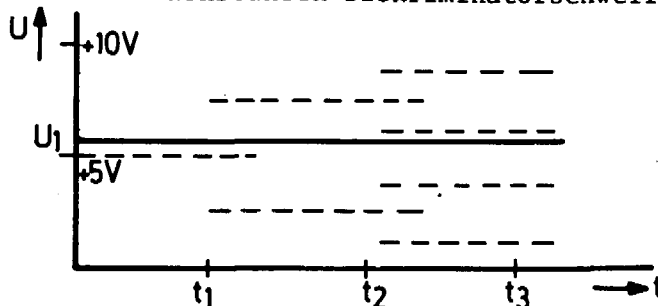
Die Schaltung arbeitet mit einer Dekodierfrequenz von 8 MHz, das bedeutet eine mittlere Verarbeitungszeit von 60  $\mu$ sec für eine Division. Komplette Schaltungsunterlagen sind in [13] dargestellt.

### 2.3.3 Anwendung eines "Stufenweise Annäherungs-ADC" mit variabler Bezugsspannung zum Aufbau einer Impulsdivisionsstufe

Von Carpey und Klein ist vom Aufbau einer Divisionsstufe mit einem "Successive Approximation ADC" in Versaille [14] berichtet worden. Bevor auf den Aufbau der Divisionsschaltung näher eingegangen wird, soll zunächst das Prinzip des "Successive Approximation ADC" kurz erläutert werden.

Der "Successive Approximation ADC" arbeitet folgendermaßen:

Die Amplitude der zu digitalisierenden Spannung (siehe Fig. 14) wird mit einer konstanten Diskriminatorschwelle  $U_2$  verglichen.



Figur 14

Zur Zeit  $t_1$  wird zunächst festgestellt, ist die Spannung  $U_1$  größer oder kleiner als 5 V, wenn 10 V die maximal mögliche zu digitalisierende Eingangsspannung sein soll. Damit wird gleichzeitig das erste Bit,



Die von Carpey und Klein angegebene Schaltung benötigte für einen Vergleich in einem Komparator etwa 50 nsec. Es wird eine Auflösung von 7 Bit mit einer differentiellen Nicht-linearität des Systems von 10 % erreicht, für die gesamte Konversion mit Abspeicherung im Buffer wurden etwa 2  $\mu$ sec benötigt. Die Eingangssignale variieren zwischen 0,5 und 5 V, der Nachteil der Schaltung ist wiederum der, daß  $U_1$  immer größer als  $U_2$  sein muß. Ein wesentlicher Vorteil der Schaltung ist, daß bei Verwendung gleicher Impulsformen von  $U_1$  und  $U_2$  keine zusätzlichen Stretcher erforderlich sind, wenn z.B. Impulse eines "Aktiv-Filter-Verstärkers" mit 3  $\mu$ sec Impulsformungszeitkonstante dividiert werden mit einer Genauigkeit von 7 bit.

### 3. Zusammenfassung

In Tabelle 1 sind die im Text beschriebenen Verfahren gegenübergestellt. Grundsätzlich läßt sich sagen, daß bei heute bekannten Divisionsverfahren die Division mit reinen "Analog-Bausteinen" schneller, aber ungenauer ist als die Division im Digitalrechner. Eine Ausnahme bildet dabei das unter 2.3.3 beschriebene Verfahren, bei dem der Quotient in digitaler Form nach ungefähr 3  $\mu$ sec angeboten wird.

Da die zu verarbeitenden Signale meist in Form von Detektorimpulsen in analoger Form vorliegen, gestatten "Analoge" (2.2.1, 2.2.2, 2.2.3) oder "Analog-Digitale" Impulsdivisionsstufen (2.3.2, 2.3.3) eine direkte Signalverarbeitung. Sollen die Quotienten nach der Verhältnisbildung in einem digitalen Speicher, wie z.B. im Speicher eines Vielkanalanalysators oder auch im Kernspeicher eines Kleinrechners, abgespeichert werden, so sind die Analog-Digital-Verfahren von Vorteil, da der digitale Wert des Quotienten oft direkt in den Kernspeicher eingelesen werden kann. Bei den rein analogen Divisionsstufen steht der Quotient wieder als analoges Signal zur Verfügung, die notwendige Verarbeitungszeit der Analog-Digital-Umwandlung zur Abspeicherung in einem digitalen Speicher kann zwar asynchron erfolgen, muß aber in den meisten Fällen bei Zählratenbetrachtungen mit berücksichtigt werden.

Mit der Leistungsfähigkeit der Divisionsstufe bezüglich Dynamik, Schnelligkeit und elektrischem Aufwand sind die unter 2.2.1 und 2.2.2 beschriebenen Stufen hauptsächlich bei der Impulsformdiskriminierung eingesetzt worden. Die unter 2.3.2 und 2.3.3 beschriebenen Verfahren sind im wesentlichen bei ortsauflösenden Detektoren verwendet worden; die unter 2.2.3 beschriebene Divisionsstufe ist für beide Anwendungen geeignet und auch eingesetzt worden. Zusätzlich ist das unter 2.2.3 angegebene Verfahren in den meisten  $dE/dX$ , E-Systemen eingesetzt worden.

Die in Teil 2 beschriebenen Divisionsverfahren lassen sich mit neuen Schaltungstechniken, bis auf das unter 2.3.3 beschriebene Verfahren, alle bezüglich Dynamik, Zählrate oder Genauigkeit verbessern. So wird durch den Einsatz neuer Schaltungsentwicklungen, z. B. des 13 bit ADC der Fa. Tennelec, Oakridge/USA mit einer konstanten Konversionszeit von 4,5  $\mu\text{sec}$ , zusammen mit fest verdrahteten Divisionsstufen als Zählratengrenze bereits die Zykluszeit von heute erhältlichen Digitalrechnern als Abspeichermedien erreicht. Dabei wird die Dynamik durch die ADC's bestimmt, die Genauigkeit der Division, bedingt durch die Divisionsstufe, kann durch elektronischen Aufwand leicht an die Auflösung der ADC's angepaßt werden.

Umgekehrt können schnelle "analoge" oder "digitale" Divisionsstufen durch sog. analoge Multiplexer mit Erfolg in Systemen eingesetzt werden, in denen eine Zählratenbeschränkung durch die Analog-Elektronik am Detektor gegeben wird. Mit heute erhältlichen Stretchern mit 1  $\mu\text{V}/\mu\text{sec}$  Abfall der gedehnten Spannungsamplitude kann z. B. eine schnelle Divisionsstufe die Signalverhältnissbildung für mehrere Detektoren durchführen.

Je nach Anforderungen des Experimentators bezüglich zu verarbeitender Zählrate, Genauigkeit der Division und gegebener Dynamik der Signale durch den Detektor sollte die Entscheidung für eine Weiterentwicklung der Divisionsstufen fallen.

| Type (Text)                                                  | 2.21           | 2.22                                 | 2.23                                     | 2.31                            | 2.32                                                           | 2.33                            |
|--------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| gebaut von                                                   | Abend/Lips     | Kuhlmann                             | Abend/Bittl                              | ./.                             | Miller                                                         | Carpay/Klein                    |
| Dynamik D                                                    | 1:3            | 1:3<br>(1:5)                         | 1:25                                     | 1:100<br>ADC abh.               | $U_2 = \text{Kont. } 1:8$<br>$U_2 = \text{var. } 1:2$<br>$1:8$ | 1:9                             |
| Spannungsbereich                                             | 1V $U_1$ - 30V | 8V- $U_1$ - 100V<br>10V- $U_2$ - 30V | 0,3V- $U_1$ - 9,5V<br>0,3V- $U_2$ - 9,5V | ADC abh.                        | 0,5V- $U_1$ - 5V                                               | 0,5V- $U_1$ - 5V                |
| Beliebige Größen-<br>relation von $U_1$<br>zu $U_2$ möglich? | nein           | ja                                   | ja                                       | ja                              | ja                                                             | nein                            |
| Dauer d. Quot.<br>Bildg. von<br>$U_1/U_2$ unabhängig?        | nein           | nein                                 | ja                                       | ADC abh.                        | nein                                                           | ja                              |
| maximale periodi-<br>sche Impulsfolge-<br>frequenz           | 1 KHz          | 5 KHz                                | 85 KHz                                   | ./.                             | 15 KHz                                                         | 250 KHz                         |
| Genauigkeit<br>oder<br>Auflösung                             | $\pm 1\%$      | $< 10\%$                             | $\pm 1,5\%$                              | 7 bit<br>bei<br>11 bit<br>ADC's | 0,1 %<br><br>0,2 %                                             | 7 bit<br>bei<br>10 % diff. Lin. |
| Anwendung bei<br>Impulsform DK.                              | ja             | ja                                   | nein                                     | ./.                             | nein                                                           | nein                            |
| "<br>dE/dx, E-Systemen                                       | nein           | nein                                 | ja                                       | rel. set-<br>ten                | nein                                                           | nein                            |
| ortsaufkl. Det.                                              | nein           | ja                                   | ja                                       | rel. sel-<br>ten                | ja                                                             | ja                              |
|                                                              |                |                                      |                                          |                                 |                                                                |                                 |

## Literatur

1. Instruction Manual 423 "  
"PARTICLE IDENTIFIER" ORTEC, 100 Midland Road, OAK-RIDGE, USA
2. Biggerstaff- et.al.  
Charged particle discrimination in a CsI (Tl) detector  
Nuclear Instruments and Methods 10, 327, (1961)
3. E.F. Bennet  
An electronic pulse division circuit  
ANL - 6479, AEC Research Report
4. K. Abend, J. Kips  
Meßeinrichtung für Neutronenspektroskopie mit Pulsformdiskriminator  
KFA Jahresbericht 1965
5. W.R. Kuhlmann  
Eine Impulsdivisionsstufe für Anwendungen bei ortsempfindlichen Detektoren  
BMwF - FB K 67-61 (1967)
6. M. Tsukuda  
A Simple Pulse Dividing Circuit  
Nuclear Instruments and Methods 25 , 263 (1964)
7. W.R. Kuhlmann und B. Schimmer  
Eine Impulsdivisionsstufe  
Nuclear Instruments and Methods 40 , 113 (1966)
8. C.T. Sah  
Electronic processes and excess currents in gold doped narrow silicon  
junctions  
Phys. New. 123, 1594 (1961)
9. M.G. Strauss, R. Brenner  
General purpose analog pulse height computer  
Rev. Sci. Instrum. 36 , 12, (1965)

Literatur  
(Blatt 2)

10. F.Fieg und H.Werle  
Erprobung eines Analog-Pulshöhenrechners zur Pulsformdiskriminierung  
bei Rückstoß-Proportionalzählrohren  
INR Arbeitsbericht Nr. 294/67, GfK. Karlsruhe
11. K.Aabend, K.D. Müller, J.Schelten, W. Schmatz  
Local resolution of scattered neutrons using BF3 proportional counters  
with resistance wire  
International Symposium on nuclear electronics, Versailles (1968)
12. K.Aabend  
Eine ortsauflösende Detektorbank für Neutronenstreuexperimente  
JÜL - 582 - ZE - März 1969
13. G.L. Miller  
A Normalizing ADC for use with position-sensitive detectors  
ISPRA Nuclear electronics symposium, May 69, 19
14. W.M. Carpey, S.S.Klein  
Direct digitalization of the quotient of two pulse heights  
ISPRA Nuclear electronics symposium, May 1969, 19

Herrn Dr. J. Schelten und Herrn Dr. K.D. Müller möchte ich für anregende Diskussionen bei der Durchführung der Arbeit danken.