

Archiv-Ex.:
FZR-30
Februar 1994

F. Gabriel und P. Michel

Entwicklung eines TDC mit extrem
kleiner Totzeit für schnelle
Triggerprozesse

Entwicklung eines TDC mit extrem kleiner Totzeit für schnelle Triggerprozesse

F. Gabriel¹, P. Michel²

Forschungszentrum Rossendorf e.V.

¹ Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik

² Institut für Kern- und Hadronenphysik

1 Einleitung

In der experimentellen Kern- und Teilchenphysik spielen Zeitmessungen im Nanosekunden- bzw. Subnanosekundenbereich eine wichtige Rolle. Flugzeiten geladener und neutraler Teilchen liefern unmittelbare Informationen über Teilchengeschwindigkeiten. Aus Messungen von Zerfallszeiten kann die Lebensdauer instabiler Zustände experimentell ermittelt werden. Darüberhinaus sind Zeitmessungen im Nano- und Subnanosekundenbereich zur indirekten Bestimmung von Teilchenparametern beispielsweise bei der Auslese von Driftkammern, Vieldrahtproportionalkammern, Lawinenzählern oder Szintillationszählern von Bedeutung. So nutzt man bei der Auslese von Vieldrahtproportionalkammern die vom Ort abhängige unterschiedliche Signallaufzeit des Ladungsimpulses in einer Verzögerungsleitung [1]. Durch Messung der Zeitdifferenz an beiden Enden der Verzögerungsleitung kann über einen Kalibrierungsfaktor die Teilchenkoordinate im Detektor ermittelt werden. Gleiches gilt z.B. für lange Szintillationsdetektoren. Über die Messung der Lichtlaufzeitdifferenz an beiden Enden des Szintillators kann der Teilchenort berechnet werden [2],[3]. Um die gemessene Zeit als Experimentparameter in einen speicherbaren Ereignisvektor zu integrieren, muß sie mit einer angemessenen Auflösung digitalisiert werden. Im hier zur Diskussion stehenden Zeitbereich hat sich in der Vergangenheit folgende Methode durchgesetzt. Die Meßzeit wird über eine Zeit-Analog-Konvertierung in eine zeitproportionale Spannung oder Ladung gewandelt. Üblicherweise realisiert man dieses durch Aufladen eines Kondensators über eine Konstantstromquelle. Anschließend werden Spannung oder Ladung mit konventionellen ADC bzw. QDC digitalisiert. Die Totzeit wird hierbei im wesentlichen durch die ADC- bzw. QDC- Konvertierungszeit bestimmt und liegt im Mikrosekundenbereich (z.B. Le Croy FERA 4300 4.8 Mikrosekunden für 10 bit) [4]. Mit diesen Verfahren werden bei kommerziellen Geräten bis zu 50 ps elektronische Zeitauflösung angegeben. Ein wesentlicher Nachteil dieser Technik ist die zur Digitalisierung notwendige Konvertierungszeit im Mikrosekundenbereich. Eine Integration der Zeitinformation in schnelle Triggerprozesse ist wegen der großen Totzeiten nicht sinnvoll.

2 Anforderungen an einen Zeit-Digital-Konverter für Triggerapplikationen

Moderne Experimente in der Kern- und Teilchenphysik zeichnen sich oft durch hohe Luminositäten (ca. $10^{32} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) und große Detektorakzeptanzen (4π) aus. Die im Detektor auftretenden Zählraten liegen in der Größenordnung von 10^6 bis 10^7s^{-1} . Werden insbesondere seltene Prozesse im Mikrobarn- bzw. Nanobarnbereich untersucht, so besteht die Aufgabe eines schnellen Triggerprozesses vor allem in der Eliminierung uninteressanter Reaktionen. Das heißt innerhalb einer Triggerzeit von größenordnungsmäßig 100 ns müssen die Eventstrukturen auf Signaturen der seltenen Reaktion geprüft werden. Das ist insofern sinnvoll, da die Erzeugung eines vollständigen Eventvektors mit Totzeiten um einige 10 μs verbunden ist (TDC- und ADC-Konvertierungszeiten) und nur dann vorgenommen werden sollte, wenn eine off line Datenanalyse für dieses Ereignis notwendig wird. Neben der Systemtotzeit wird dadurch auch die Anzahl redundanter Speicherdaten reduziert. Um die Signatur bestimmter Ereignisse im Triggerprozeß zu erfassen, können wegen der geforderten Zeitlimits, z.B. Szintillationszählermuster, Zeitkorrelationen oder Detektorsignaleigenschaften (z.B. Pulshöhe, Risetime) ausgewertet werden. Können die genannten Parameter als unabhängige Größen betrachtet werden, genügt oft die Diskriminierung und eine einfache logische Verknüpfung. Müssen im Triggerprozeß mehrere Fenster auf einen Parameter gesetzt oder auf kombinierte Parameter (z.B. Teilchenflugzeit in Abhängigkeit vom Szintillationszählermuster) verarbeitet werden, so sind prinzipiell die Einzelparameter zu messen, d.h. zu digitalisieren und mittels schneller Prozessoren oder Look Up Units auf die gesuchte Triggerbedingung zu testen. Für Meßzeiten im Nano- bzw. Subnanosekundenbereich wird daher ein TDC benötigt, dessen Konvertierungs- bzw. Totzeit das Meßzeitintervall nur unwesentlich übersteigt. Um bei Oszillatorfrequenzen von 125 MHz dennoch Kanalbreiten (LSB) von ca. 1 ns zu erhalten, wird in [5] eine Lösung beschrieben, die auf der Interpolation des Meßzeitintervalls zwischen den Clocks des Oszillators beruht. Die damit erreichbare Zeitauflösung liegt bei ca. 0.5 ns und ist für die meisten Anwendungen im Triggerprozeß zu schlecht. Eine Erhöhung der Taktfrequenz auf 170 MHz bringt, wie die Autoren zeigen, wegen der begrenzten Bandbreite der verwendeten Bauelemente keine wesentliche Verbesserung. Weitere Nachteile des Verfahrens bestehen im Aufwand sowie im Abgleich der Interpolatorschaltung, die sich entscheidend in der Linearität des Konverters niederschlägt.

Die Fortschritte in der Halbleitertechnologie zu immer höheren Grenzfrequenzen hin erlauben seit kurzem über die Realisierung des Start-Stop-Zählerkonzeptes mit Taktfrequenzen um einige GHz, das direkte Zeit-Digital-Konvertierungsprinzip zu verwenden. Damit ist es prinzipiell möglich, Zeitaufösungen um 200 ps zu erreichen. Diese Parameter wären insofern interessant, da sich schnelle Triggerdetektoren wie Szintillationszähler oder Lawinendetektoren durch vergleichbare Zeitaufösungen auszeichnen.

3 Aufbau des Real Time to Digital Converters (RTDC)

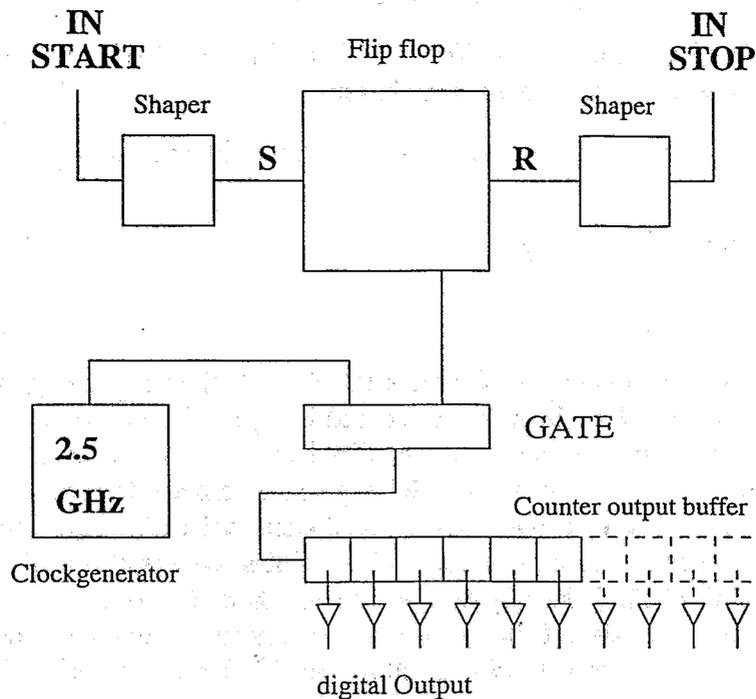


Abb1. Schematischer Aufbau des Real Time to Digital Converters (RTDC)

Abb.1 zeigt das Konzept des RTDC, daß auf dem Start-Stop-Zähler-Prinzip mit einer Taktfrequenz von 2.5 GHz beruht. Um den Pegel und die Flankensteilheit der Start- bzw. Stoppeingangssignale (üblicherweise ECL-Pegel der 10 K-Serie mit $3 \text{ ns } t_{n/f}$) auf die schaltzeitinternen Parameter anzupassen, werden entsprechende Formungsstufen an jedem Eingang vorgesehen. Das Start-Stop-Flip-Flop dient zur Speicherung des Startimpulses bis zum Eintreffen des Stopimpulses. Gleichzeitig steuert es das Zählertor. Der Zähler ist ein Asynchronzähler, um die maximal mögliche Zählfrequenz der Digitalbausteine auszunutzen. Über die Ausgangspufferstufen wird die gemessene Zeit im Binär-code ausgegeben. Die Ausgangssignale entsprechen dem Signalstandard der Eingangssignale (ECL-Serie 10K).

Die eigentlichen Probleme bei der Realisierung dieser Schaltung liegen im Layout der Leiterplatte und in der Bauelementewahl. Unter anderem ist dabei folgendes zu beachten:

- Die Signalleitungen müssen entweder extrem kurz gehalten oder es müssen angepaßte Leitungen (Striplinie) verwendet werden
- Signalleitungen und Versorgungsspannungen werden prinzipiell auf verschiedenen Leiterplattenseiten untergebracht

- Durch ausreichende Abblockkondensatoren ist sicherzustellen, daß keine Schaltimpulse auf den Betriebsspannungsleitungen entstehen
- die Gehäuseformen und die Pinbelegung der Logikschaltkreise muß ein Layout entsprechend o.g. Forderungen ermöglichen
- Parasitäre Kapazitäten der Widerstände und parasitäre Induktivitäten der Kondensatoren müssen extrem klein sein
- Die Abmessung aller Bauelemente muß extrem klein sein

4 Meßergebnisse

4.1 Linearität

Für eine Oszillatorfrequenz von 2.5 GHz (LSB=400ps) und einen dynamischen Bereich von 5 bit wurden die differentielle und integrale Nichtlinearität der TDC experimentell ermittelt. Abb.2 zeigt den Mittelwert der digitalisierten Zeitinformation im gesamten dynamischen Bereich (a) und an einem Randbereich (b). Da die im Testgenerator eingestellte Meßintervallschrittweite nicht genügend reproduzierbar war, wurde das zu bestimmende Zeitintervall simultan mit einem Le Croy TFC(4303)-FERA(4300) System gemessen. Es ist bemerkenswert, daß, wie in (a) ersichtlich, praktisch keine integrale Nichtlinearität auftritt. Die typische differentielle Nichtlinearität beträgt ± 50 ps und ist damit wesentlich kleiner als LSB/2.

4.2 Auflösung

Für die Beurteilung der Zeitauflösung des RTDC sind einige grundlegende Betrachtungen notwendig. Zunächst gilt es zu berücksichtigen, daß sowohl Startimpuls als auch Stopimpuls asynchron zur Oszillatorfrequenz auftreten. Für ein unbekanntes Zeitintervall führt diese Tatsache für die Start- und Stopzeit jeweils zu einem Fehlerbeitrag von $\sqrt{12}$ ·LSB. Diese Größe entspricht der Standardabweichung einer gleichmäßigen Verteilung in einem Intervall der Länge LSB [6] und repräsentiert die Streuung des Start- bzw. Stopimpulses innerhalb einer Oszillatorperiode. Die quadratisch addierten Beiträge von asynchronen Start- und Stopimpuls liefern somit einen Beitrag zum Meßfehler von $\sqrt{6}$ ·LSB. Da die Betrachtung generell für ein Meßzeitintervall unbekannter Länge gilt, entspricht dieser Fehler einem mittleren Fehler für die Zeitmessung. Betrachtet man die Zeitauflösung des asynchronen Start- Stop- Zählers unter der Voraussetzung eines exakt bekannten Meßzeitintervalls, so variiert die theoretische Standardabweichung quadratisch von 0 bis 0.5·LSB. Wenn das Meßzeitintervall genau dem ganzzahligen Vielfachen der Oszillatorperiode (LSB) entspricht, sollte die Streuung der digitalisierten Zeitinformation 0 betragen. Der maximale Fehler von 0.5·LSB tritt auf, wenn das Meßzeitintervall einem halbzahligen Vielfachen von LSB entspricht.

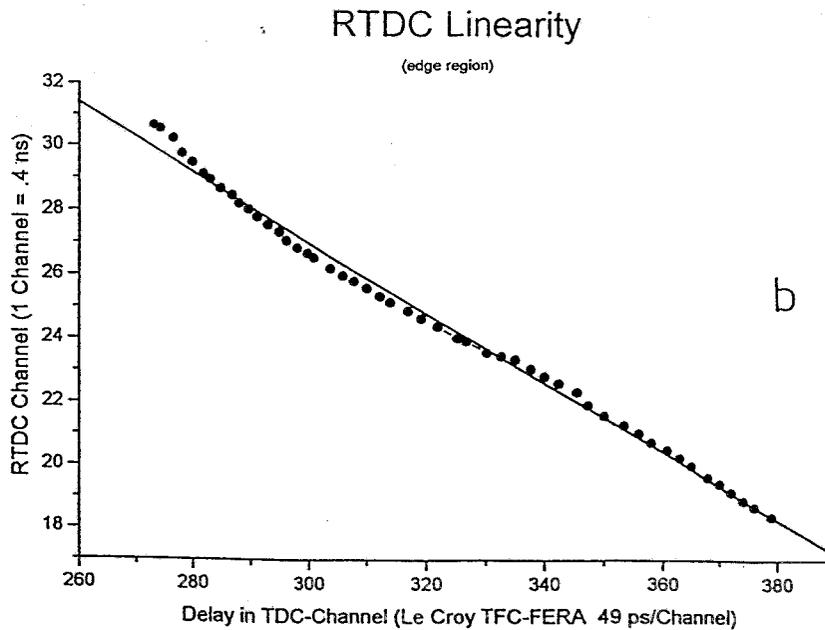
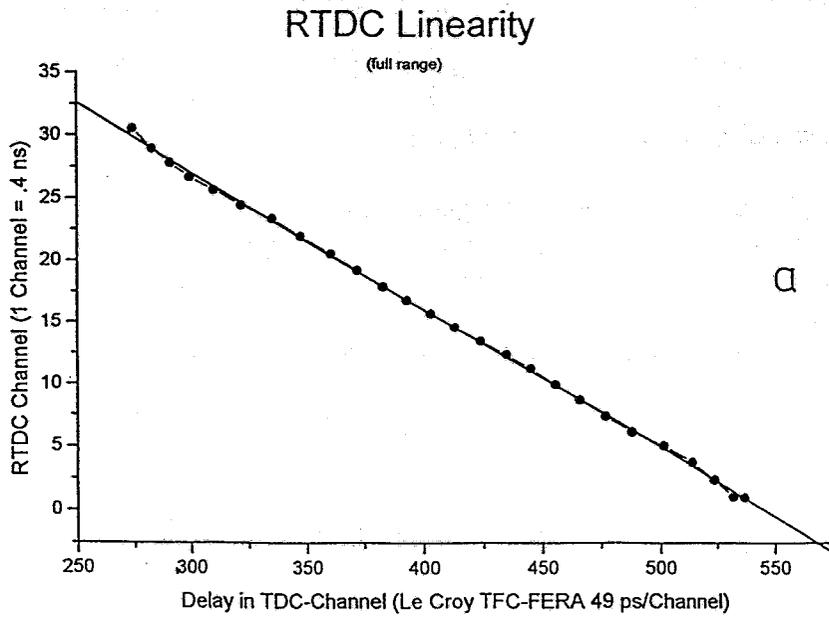


Abb.2 Linearität des RTDC
 (a) im gesamten Meßbereich
 (b) am Rand des Meßbereiches

Der mathematische Zusammenhang zwischen σ und t_m wird durch die Gleichung:

$$\sigma = \sqrt{\chi - \chi^2} \quad (1)$$

gegeben, wobei $\chi = t_m/LSB - INT(t_m/LSB)$.

Abb.3 zeigt die in 100ps-Schritten gemessene Zeitauflösung des RTDC. Gestrichelt eingezeichnet ist die o.g. funktionale Abhängigkeit $\sigma(\chi)$, die nur in der Asynchronität von Meßzeitintervall und Oszillatortakt begründet ist. Da abgesehen von einem kleinem Randbereich am Spektrenende (entspricht $t_m \rightarrow 0$) alle Meßwerte mit $\sigma(\chi)$ sehr gut übereinstimmen, können zusätzliche elektronische Einflüsse auf die Zeitauflösung für diese Taktfrequenz ausgeschlossen werden. Damit kann als maximaler Digitalisierungsfehler $\pm LSB/2$ (200 ps) angegeben werden.

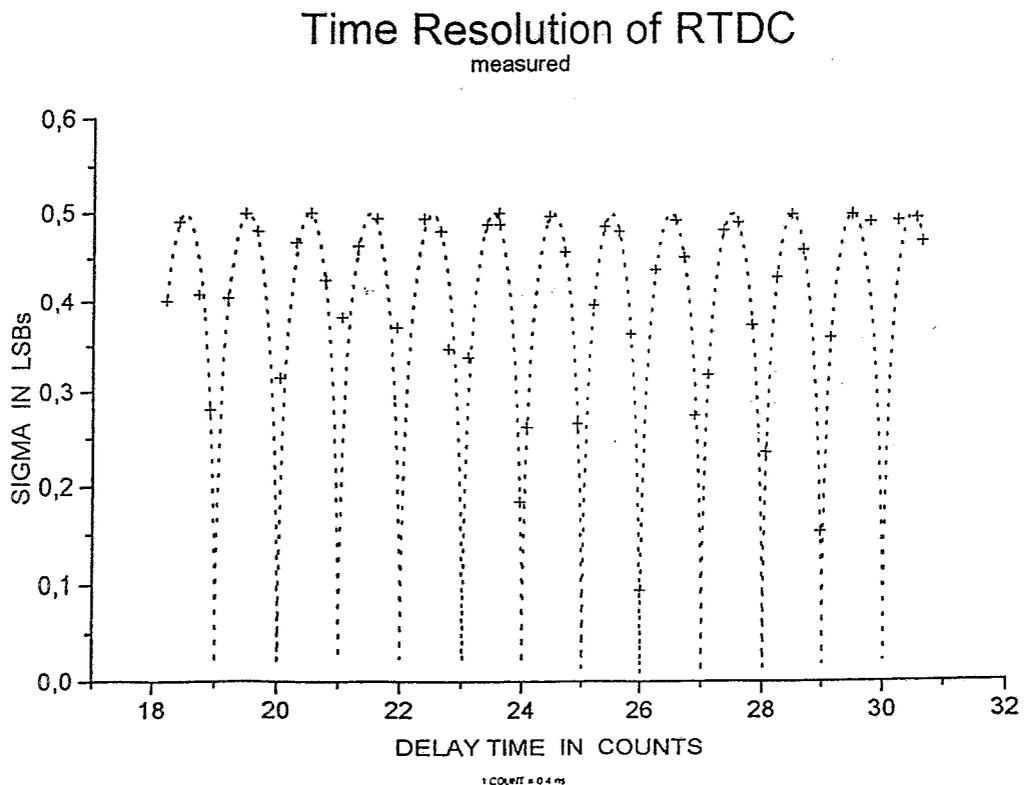


Abb.3 Experimentell bestimmte Zeitauflösung des RTDC
(gestrichelt eingezeichnet: theoretische Auflösung aufgrund des asynchronen Start-Stop-Zählprinzipes)

4.3 Eingang-Ausgang-Verzögerung (Transittime)

Die Digitalisierung der Meßzeit durch Zählung von Oszillatorimpulsen erfordert bis auf die Signallaufzeiten keine zusätzliche Totzeit. Die Totzeit des RTDC beträgt somit:

$$T_t = A + n \cdot B + C \quad (2)$$

wobei A die Signallaufzeit vor und nach dem Binärzähler (ca. 1.5 ns), B die Signallaufzeit durch eine Zählerstufe (ca. 500 ps), n die Zahl der Bits und C die Einschwingzeit der Ausgangssignale (ca. 500 ps) repräsentiert. Die Signallaufzeit vom Anliegen des Stoppsignales bis zum Vorliegen der lesefähigen Ausgangssignale beträgt damit ca. 4.5 ns. Damit ist der vorgestellte RTDC auch unter diesem Gesichtspunkt hervorragend zum Aufbau eines komplexen Triggersystemes geeignet.

5 Mögliche Anwendungen

5.1 Zweiseitige Auslese von Szintillatorstreifen (COSY-TOF)

Der hier beschriebene Echtzeit-zu-Digitalkonverter wurde zur Koordinatenbestimmung an einem langen Szintillatorstreifen ($2500 \times 100 \times 14 \text{ mm}^3$, NE 110) eingesetzt und getestet. Die Information über den Durchgangsort des Teilchens in der Koordinatenrichtung parallel zur Szintillatorlänge gewinnt man durch zweiseitige Lichtauslese und Messung der Lichtlaufzeitdifferenz. Für die angegebene Szintillatorgeometrie beträgt die maximale Lichtlaufzeit ca. 12 ns. 96 derartiger Streifenelemente werden im COSY-TOF-Spektrometer [7] ringförmig aneinandergesetzt und bilden ein Stopdetektorsegment. Dabei soll über die Streifennummer der Laborwinkel φ und über die Ortskoordinate längs des Streifens der Winkel θ on line bestimmt und in den Triggerprozeß integriert werden. Insbesondere geht es dabei um die Eliminierung der elastischen pp-Streuung, die bei COSY-Energien den Hauptanteil am Wirkungsquerschnitt bildet. Abb.4 zeigt die beidseitige Auslese des langen Szintillatorstreifens und schematisch den für den koordinatenabhängigen Teil der Triggerelektronik. Die Verzögerung D_1 entspricht der totalen Lichtlaufzeit im Szintillator und sichert die eindeutige Zuordnung von Start- und Stopimpuls im TDC. Am Teststrahl des Protonensynchrotrons am CERN wurden mit dieser Anordnung methodische Untersuchungen zur Orts- und Zeitauflösung durchgeführt. Die Messung erfolgte mit 1 GeV/c Pionen (minimal ionisierend). Ein Masterszintillator unmittelbar vor dem langen Szintillator begrenzte das Strahlprofil auf eine Breite von 3 cm. Abb.5 zeigt das Zeitspektrum, gemessen mit einem Pionenstrahl. Die ermittelte Zeitauflösung der gesamten Anordnung (Szintillator/Photomultiplier/TDC) betrug ca. 380 ps, was einer Ortsauflösung von 4 cm entspricht.

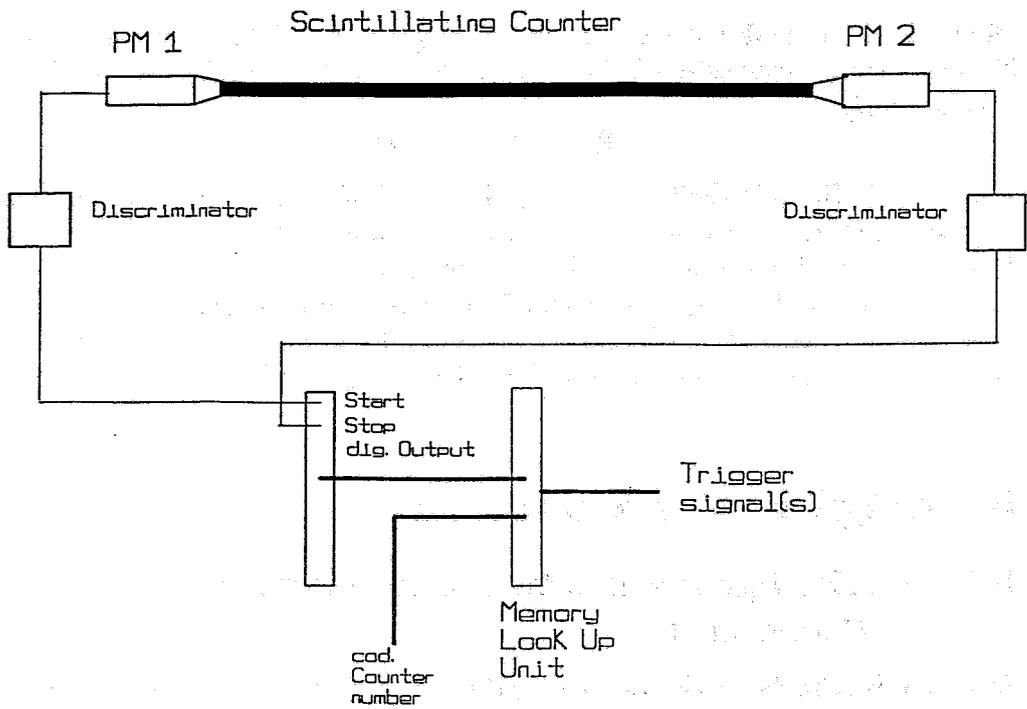


Abb.4 Erzeugung eines ortsabhängigen Triggersignals durch beidseitige Auslese eines Szintillatorstreifens und Digitalisierung mittels RTDC

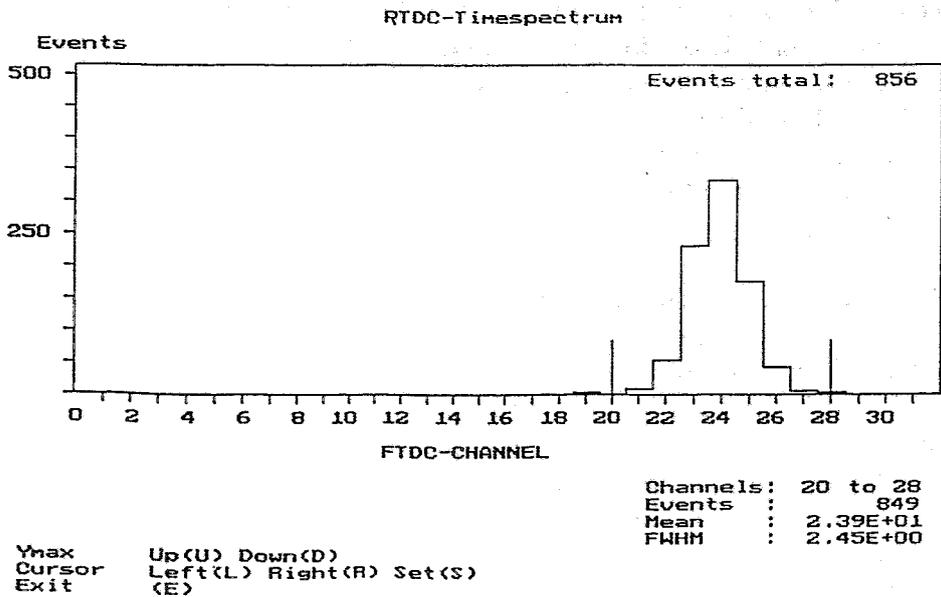


Abb.5 RTDC - Spektrum der Lichtlaufzeitdifferenz eines zweiseitig ausgelesenen Szintillatorstreifens. Mittels Masterszintillator wurde der 1 GeV/c Pionenstrahl auf 3 cm begrenzt.

In Abb.6 ist die längs des Streifens gemessene Ortsauflösung zusammen mit der gleichzeitig mittels Le Croy TFC(4303) FERA(4300) gemessenen Ortsauflösung dargestellt.

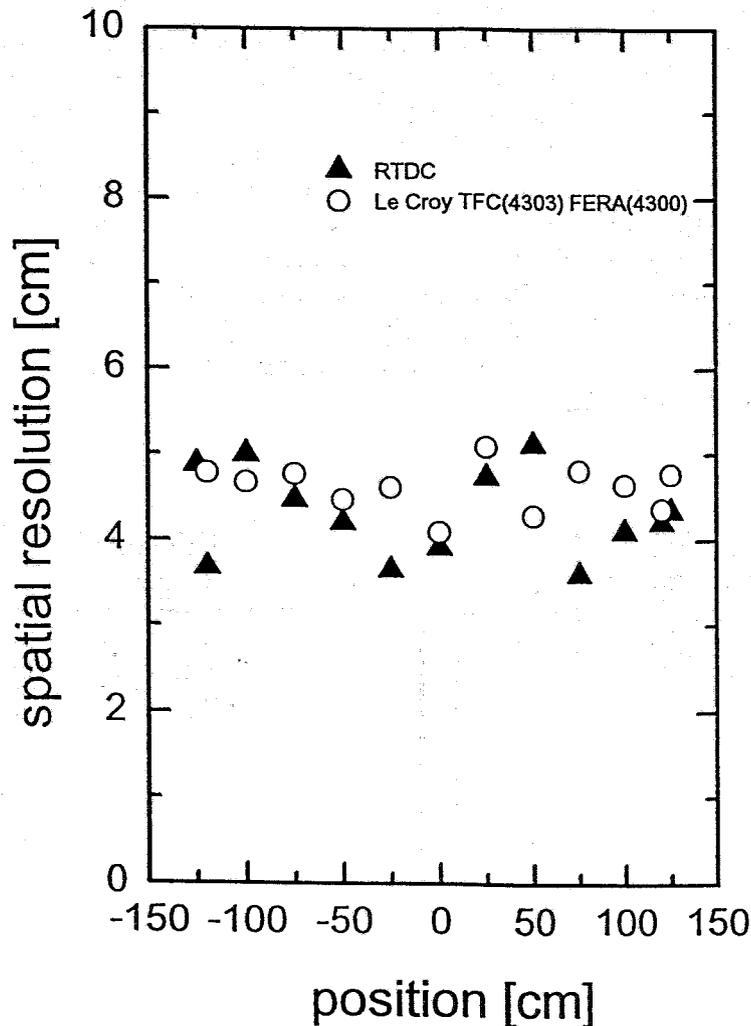


Abb.6 Auflösung der Koordinatenmessung am langen Szintillator mit RTDC und konventioneller TDC

Für diesen Anwendungsfall ist bemerkenswert, daß beide Meßverfahren keine Unterschiede hinsichtlich der Zeitauflösung aufweisen. Das ist zu verstehen, wenn man annimmt, daß beide TDC keinen wesentlichen Anteil zur Zeitauflösung liefern. Die Zeitauflösung wird hier hauptsächlich durch die Lichtdispersion im Szintillator bestimmt. Während das Le Croy System die Konvertierung in ca. 5 Mikrosekunden beendet hat, stellt der hier vorgestellte RTDC die faktisch gleichwertige Information bereits nach 4.5 ns zur Verfügung und ist damit in den Triggerprozeß einbindbar.

5.2 Teilchenspurenabhängiges Flugzeitfenster (COSY-ZDF)

Ein weiteres Großexperiment an COSY ist das im Bau befindliche 0° -Spektrometer (Zero Degree Facility, ZDF) [8]. In diesem Magnetspektrometer werden Teilchenspuren in Drahtkammern und Szintillationsdetektoren gemessen. Da im Magnetfeld die Teilchenspur nur vom Impuls abhängt, soll zur zusätzlichen Massenidentifikation die Teilchengeschwindigkeit über eine Flugzeit zwischen einem Start- und Stopzintillationshodoskop gemessen werden. Da die Flugzeit über die Flugstrecke, d.h. über die Kombination der getroffenen Start- und Stopzähler mit der Teilchengeschwindigkeit zusammenhängen, müssen beide Parameter zur Bildung eines Triggersignales auf bestimmte Geschwindigkeitsfenster on line digitalisiert und in einer Look Up Unit (z.B. Le Croy 2373) geprüft werden. Abb.7 zeigt eine einfache Logik für diesen Trigger, wobei jeweils nur ein Teilchen im Spektrometer auftreten darf. Für Teilchenmultiplizitäten größer 1 ist die Schaltung prinzipiell erweiterbar.

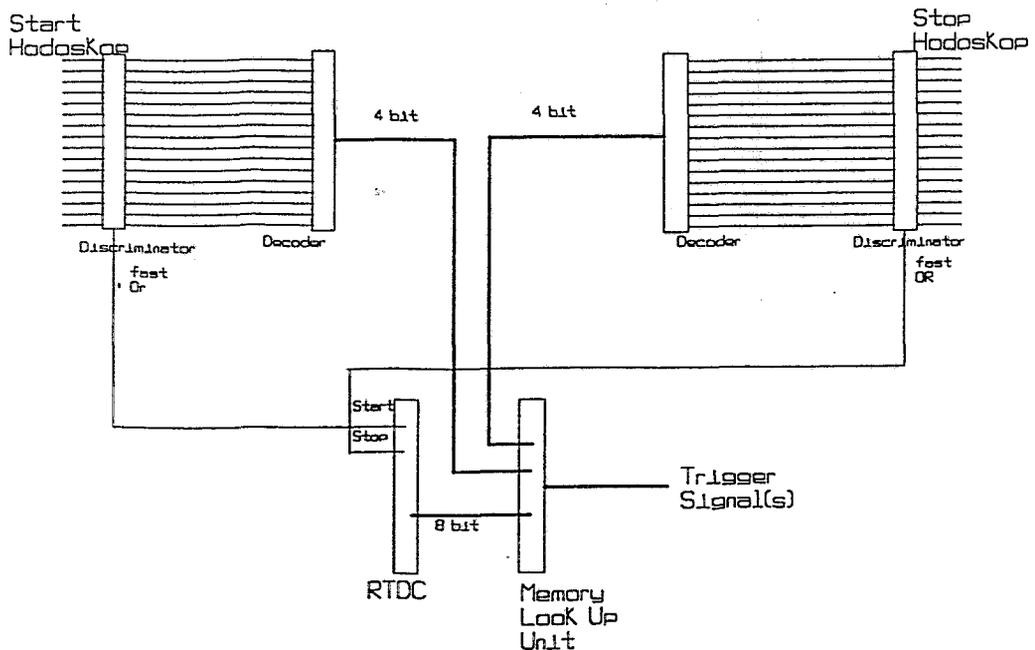


Abb.7 Triggerlogik zur Realisierung eines koordinatenabhängigen Flugzeitfensters

5.3 $n\gamma$ -Diskriminierung in Szintillatoren

Die Impulsabklingzeiten im Szintillationsprozeß sind bei einigen Szintillatormaterialien von der Ionisationsdichte abhängig, was zur Teilchenunterscheidung ausgenutzt werden kann. Neben Pulsformanalysen (Pulse Shape Analyzing Discriminator) wäre eine Echtzeit-Pulsanalyse zur $n\gamma$ -Unterscheidung durch on line-Digitalisierung der Pulslänge und schnellen Bestimmung der Signalamplitude über einen Flash-ADC (z.B. Le Croy 4504, 4 bit, Input-Output-Delay ca. 15 ns) möglich. Beide digitale Informationen können zu einem Wort zusammengefügt und ebenfalls in einer Look Up Unit getestet werden. Geht man von einem Input-Output Delay der Look Up Unit von 35 ns (Le Croy 2373) aus, würde die Totzeit einer solchen $n\gamma$ -Triggerkomponente ca. 50 ns betragen.

Literatur

- [1] R. Grove, I. Ko, B. Koskovic, v. Perez-Mendez, NIM 99 (1970) 381
- [2] A. Gobbi et al., NIM A324 (1993) 156-176
- [3] DELPHI Collaboration, NIM A303 (1991) 233
- [4] Le Croy, Fast Encoding and Readout Data Acquisition, Users manual 4300, 4303
- [5] S. Kleinfelder et al., IEEE Transactions on Nucl. sc. 38 (1991) 97
- [6] Maibaum, Wahrscheinlichkeitstheorie und mathematische Statistik, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1980
- [7] E. Kuhlmann et al., COSY Proposal #9
- [8] K. Sistemich et al., COSY Proposal #18