

Seminar zum Studentenexperiment

Teil 3: Elektronik und Datenerfassung

Seminar zum Studentenexperiment

Überblick:

0) Wiederholung / Ergänzung, Erläuterung wichtiger Begriffe

1) Analoge Pulsformung

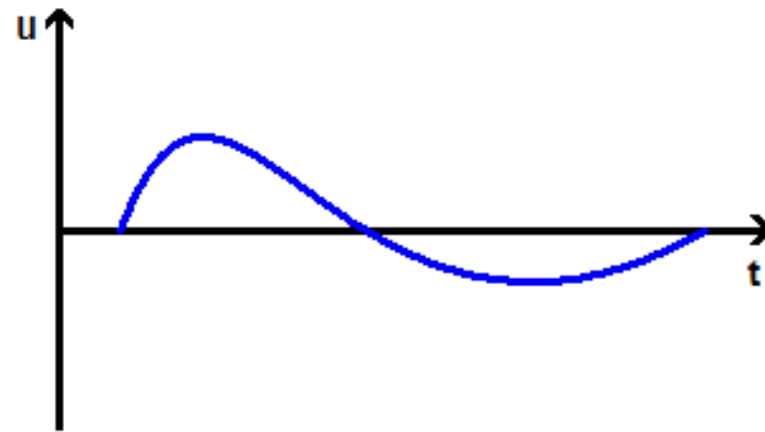
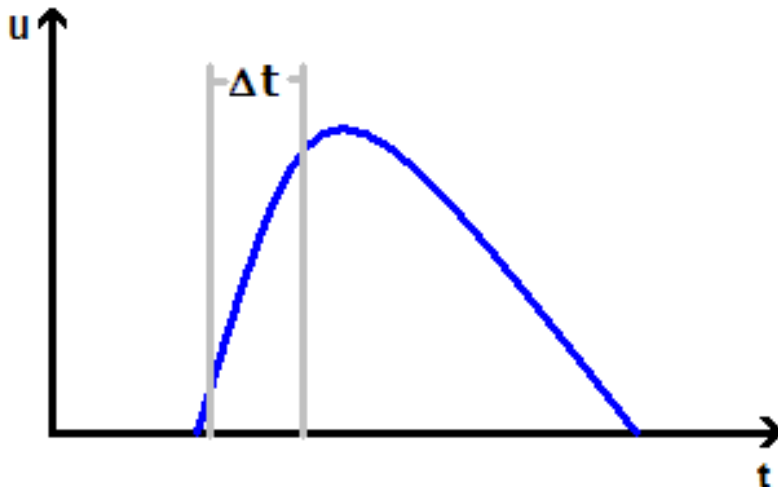
2) Digitalisierung

3) Hardwarefilter: Trigger

4) DAQ

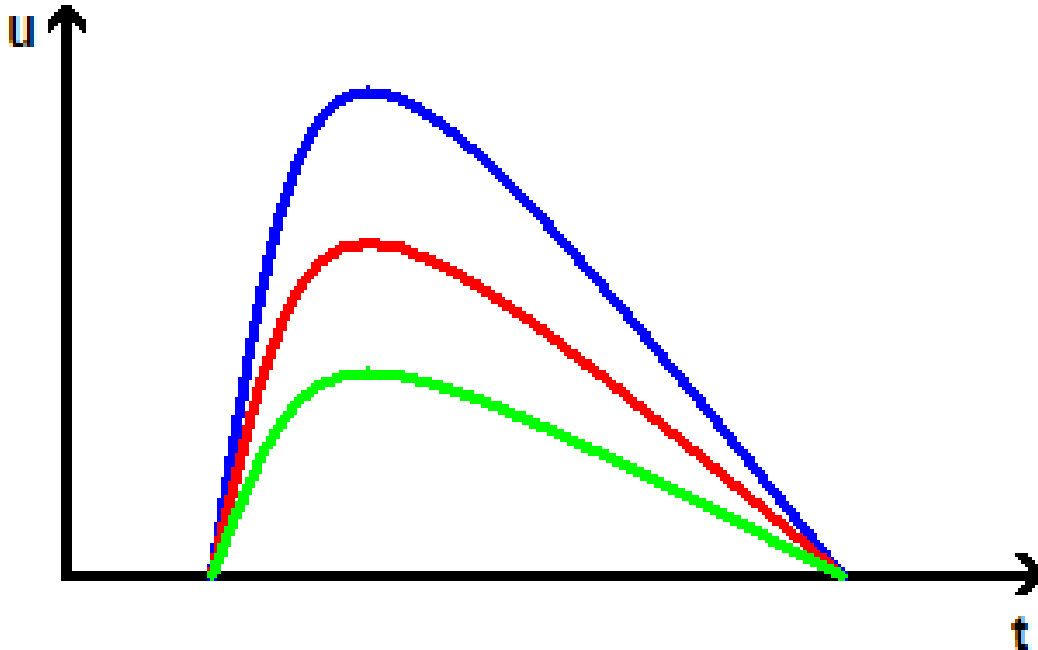
Wiederholung / Ergänzung

- Begriffe
 - Anstiegszeit: Zeit die das Signal braucht um von 10% auf 90% der maximalen Amplitude anzusteigen.
 - Unipolar: Signal nur positiv oder nur negativ
 - Bipolar: Signal hat Vorzeichenwechsel



Wiederholung / Ergänzung

- Signalformen von Detektoren
 - In der Regel unipolar
 - Für gegebenen Detektor: gleiche Anstiegszeit, gleiche Signalform (sofern im linearen Bereich)



Teil 1

Analoge Pulsformung

1: Analoge Pulsformung

- Generelles Problem in analoger Signalverarbeitung: Rauschen
 - Was ist Rauschen?
 - intrinsische Störgröße
 - nur statistische Eigenschaften bekannt
 - breites Frequenzspektrum
 - Zusammenhang zwischen spektraler Rauschleistungsdichte und Effektivwert von Spannung/Strom
- $$U_{\text{Eff}} = \sqrt{\int S_v(f) df} \quad \frac{d u_{\text{eff}}^2}{df} = S_v(f)$$
- Möglichst großes Signal/Rausch-Verhältnis gewünscht

1: Analoge Pulsformung - Rauscharten

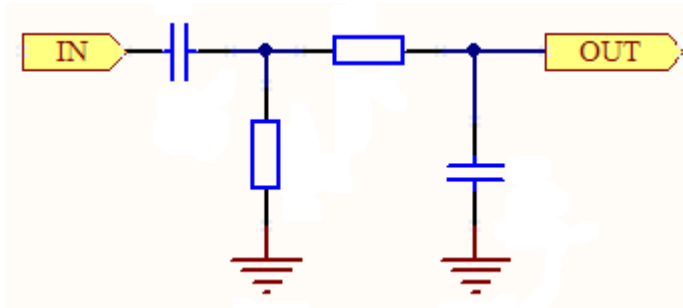
- Es gibt verschiedene Rauschquellen – charakteristisches Frequenzspektrum
 - Thermisches Rauschen (White Noise) $\langle u \rangle^2 = 4k_B T R \Delta f$
 - Geschwindigkeitsfluktuation durch Temperatur
 - Tritt in jeder Art von Leitern auf
 - Schrotrauschen $\langle i \rangle^2 = 2e I_0 \Delta f$
 - Statistische Schwankungen bei Durchbrechen einer Potentialbarriere, Ladungsquantisierung führt zu Anzahlfluktuation

1: Analoge Pulsformung - Rauscharten

- 1/f-Rauschen
 - Fast überall zu finden (menschliche Stimme, Rotation der Erde, ...)
 - Verschiedene Ursachen, z.B.: In Halbleitern werden Ladungsträger vom Gitter aufgefangen und nach einer Zeit wieder freigegeben -> näherungsweise 1/f Verteilung
- Frequenzspektrum wird ggf. durch Aufbau verändert
 - Quelle von Schrotrauschen vor ladungsempfindlichem Verstärker gibt 1/f²-Spektrum nach Verstärker

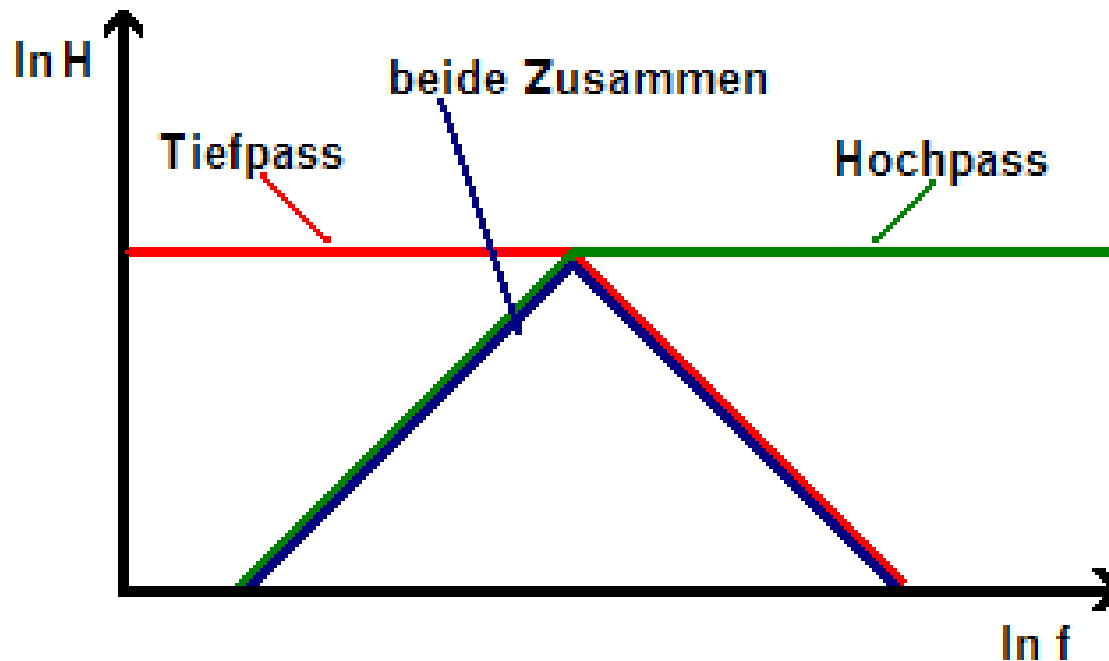
Signal/Rausch-Verhältniss Optimieren

- Mit CR-RC-Filter Rauschen minimieren



$$\tau_H = \tau_L$$

- Übertragungsfunktion eines CR-RC-Filters:



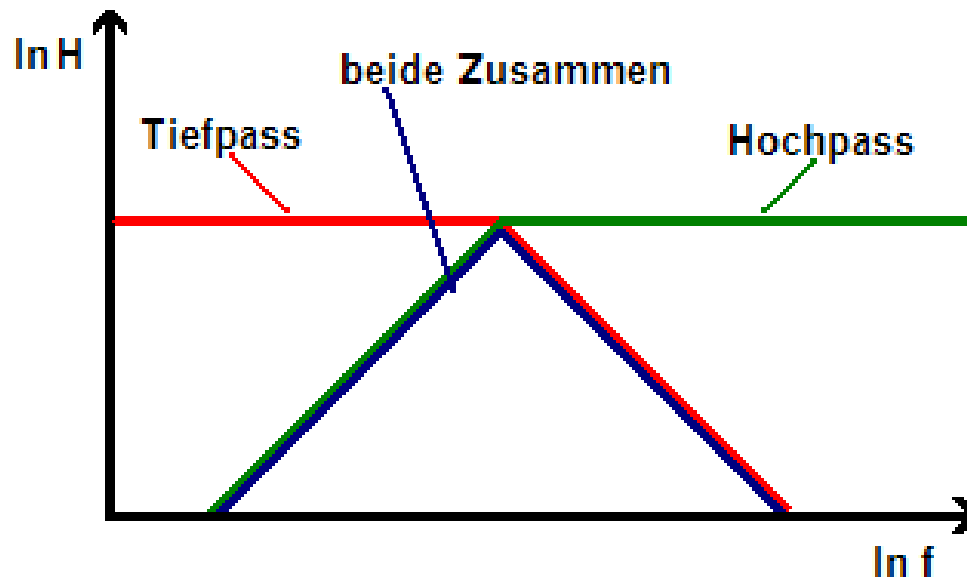
$$|H(\omega)|^2 = \left| \frac{1}{i\omega\tau} \frac{1}{1 + \frac{1}{i\omega\tau}} \right|^2 = \frac{\omega^2 \tau^2}{\omega^2 \tau^2 + 1}$$

Signal/Rausch-Verhältnis Optimieren

- Mittleres Rauschspannungsquadrat:

$$\langle U \rangle^2 = \int_0^\infty |H(\omega)|^2 (U_1^2 + U_2^2 + \dots) d\omega$$

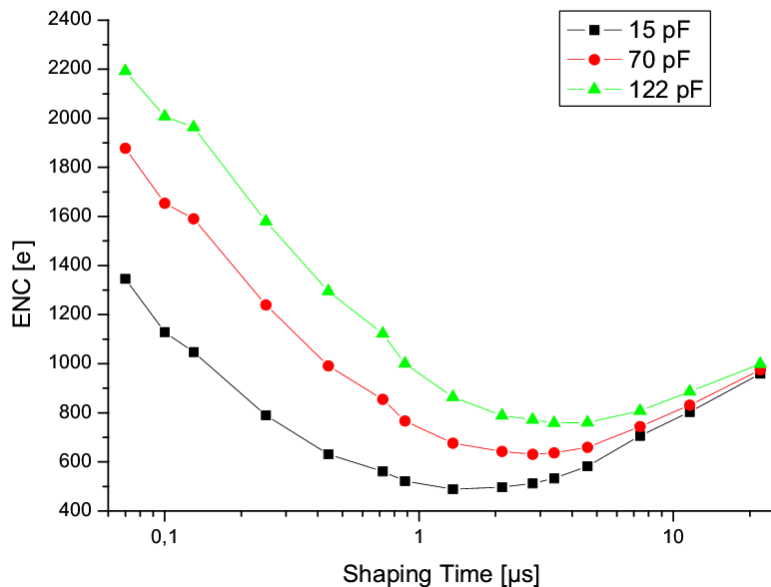
- stillschweigende Annahme: Rauschquellen sind unkorreliert
- $H(\omega)$: Übertragungsfunktion des Filters
- Übertragungsfunktion “schneidet“ viel Rauschen weg



Rauschunterdrückung

- Typische Abhängigkeit Rauschamplitude von Shapingzeitkonstante

- ENC: Rauschen am Ausgang der Elektronik, normiert auf Ausgangssignal das ein Elektron am Eingang hervorruft



- Rauschamplitude nicht einziges Entscheidungskriterium
 - **Zeitauflösung verschlechtert sich**, muss bei Wahl von τ berücksichtigt werden

Teil 2

Digitalisierung

2: Digitalisierung

- Warum Digital?
 - nur digitale Information speicherbar und auswertbar
 - jede analoge Stufe ist Rauschquelle -> möglichst früh Digitalisieren
- Informationsumwandlung, was ist das?
 - analoges Signal ist **kontinuierlich in Zeit und Amplitude**
 - sehr viel Information in Signal enthalten
 - Pulsform, -höhe, -dauer, Zeitpunkt, ...
 - Teilweise mit enormer Genauigkeit, nur durch Rauschen begrenzt

2: Digitalisierung

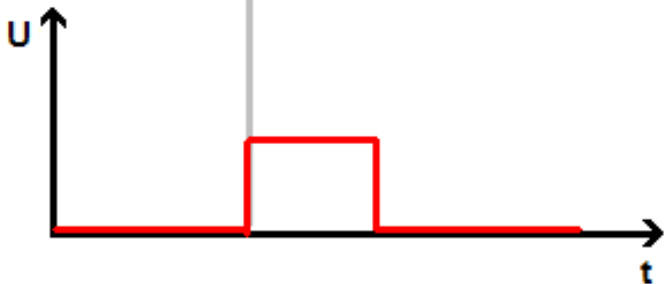
- In der Regel: Nicht möglich jede Information zu erhalten
 - verschiedene Informationsarten benötigen verschiedene Verarbeitung -> technischer Aufwand
 - Meist nicht alle Information benötigt
 - z.B. nur geflossene Ladung und Zeitpunkt des Pulses
 - Genauigkeit der digitalen Erfassung beschränkt ->weiterer Informationsverlust
- **Wichtige Entscheidung: Welche Information ist wichtig, welche nicht; wie genau muss gemessen werden**

2: Digitalisierung - Methoden

- Diskriminator:
 - Eingang: ein analoges Signal: $U(t)$
 - Ausgang: ein Digitales Signal (binärer Zustand), Zeitverhalten jedoch kontinuierlich!
 - Unterscheidet 2 Zustände des Eingangssignals
 - Treffer Ja/Nein

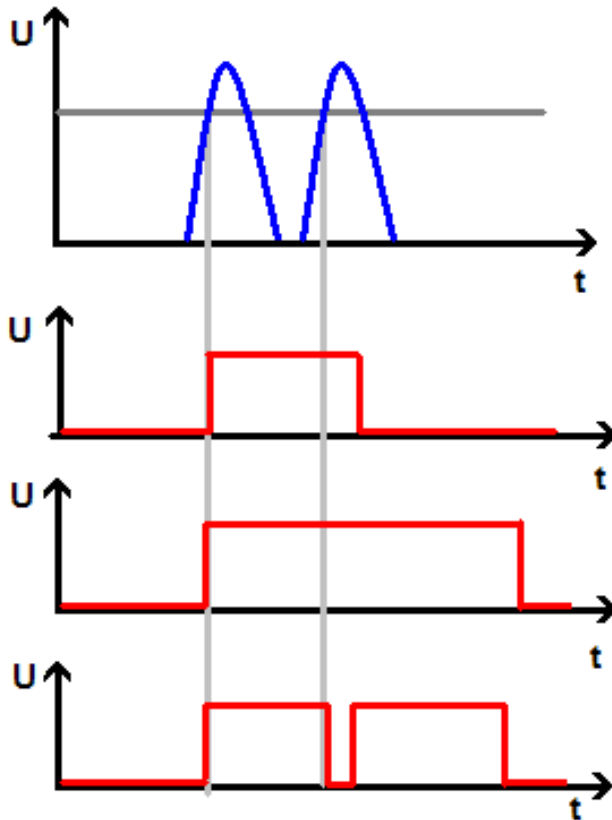
2: Diskriminatoren - LED

- LED Leading Edge Discriminator (Schneller Diskriminator mit einer Schwelle)
 - Lösen bei eingestelltem Niveau der Anstiegsflanke aus
 - geben Ausgangspuls konstanter Breite (einstellbar)



- **Funktionieren gut bei großer Signalamplitude**
- z.B. schnelle PM an Plastik Szintillator, PM in Sättigung betrieben -> reine Zeitsignalerzeugung
- Problem bei LEDs: **Timewalk**

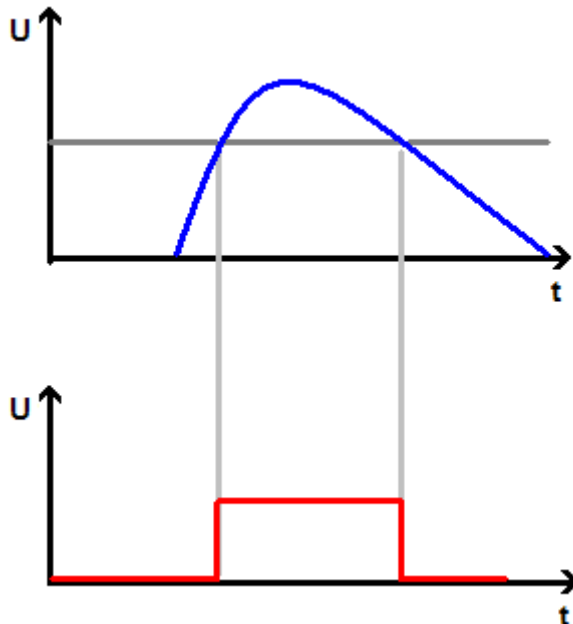
2: Diskriminatoren - LED



- Leading Edge Discriminator
 - Problem: zweite Flanke, während LED Ausgangspuls gibt
 - unterschiedliche Betriebsarten:
 - Totzeit, weitere Flanke wird ignoriert
 - Ausgangspuls wird bei “Nachtriggerung” um eine Pulsbreite verlängert (Updating Discriminator)
 - Ausgangspuls wird abgebrochen und neuer Puls der normalen Breite wird ausgegeben (Burst Guard)

2: Diskriminatoren - TOT-Diskriminator

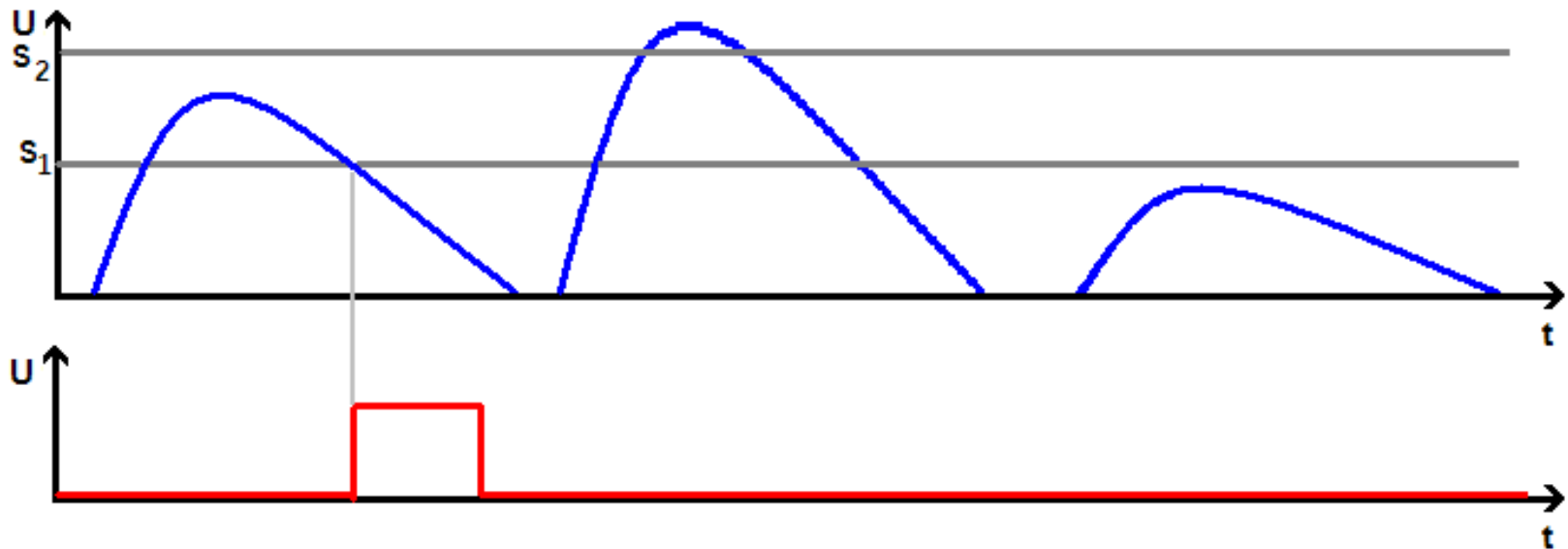
- Ausgang ist genau dann HIGH, wenn analoger Eingang über bestimmter Schwelle ist.



- praktische Anwendung: Messung der geflossenen Ladung durch Messung der Pulsdauer
- Teilweise Timewalk
herausrechenbar (bei bekannter Pulsform und durch gemessener Dauer bekannter Amplitude)

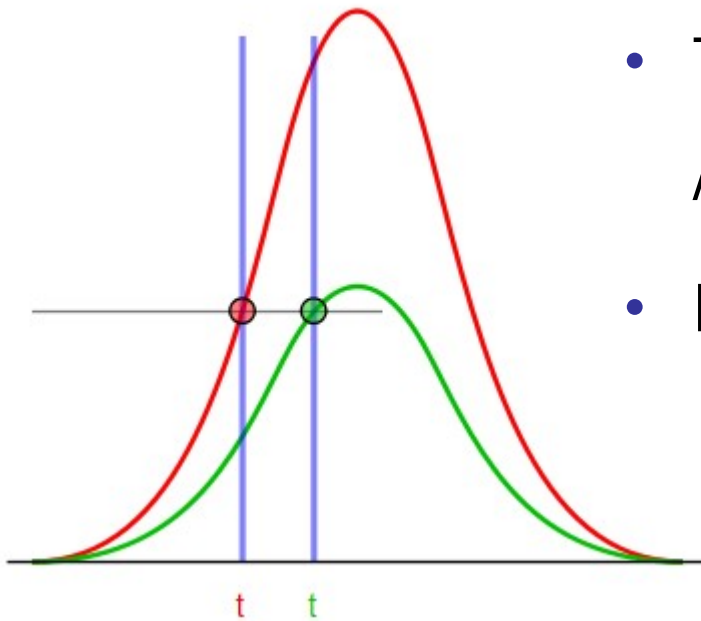
2: Diskriminatoren - SCA

- SCA Single Chanel Analyzer
 - Ähnlich wie LED: zusätzlich obere Schwelle
 - Ausgang ist HIGH, wenn Eingangspuls oberhalb erster Schwelle aber noch unterhalb zweiter Schwelle ist.



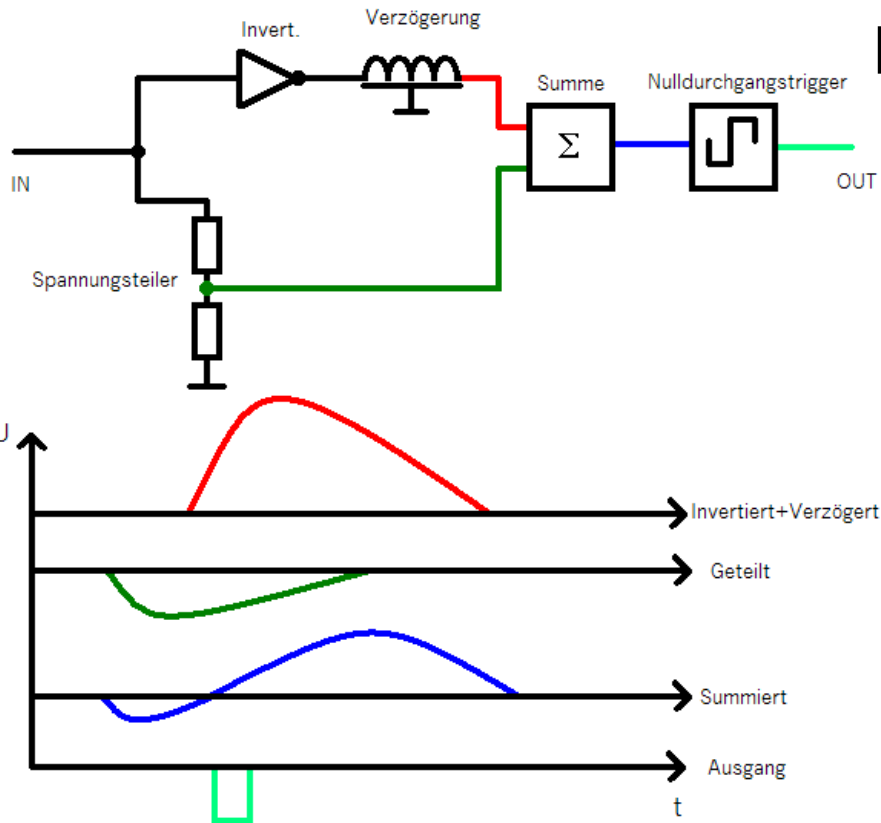
2: Diskriminatoren - CFD

- Nachteil an LEDs: **Timewalk** bei unterschiedlichen Signalamplituden.



- Timewalk begrenzt Zeitliche Auflösung erheblich
- Bessere Auflösung machbar

2: Diskriminatoren - CFD



- Lösungsansatz: Constant Fraction Discriminator
 - Signal wird aufgespalten
 - Eine Komponente wird auf Bruchteil abgeschwächt (Constant Fraction)
 - Andere Komponente wird verzögert und invertiert
 - Beides wird addiert
 - bei Nulldurchgang wird getriggert
 - Ergebnis: immer Triggierung bei konstantem Bruchteil der Maximalamplitude.
 - Erreichbare Zeitauflösung: 50 – 100 ps

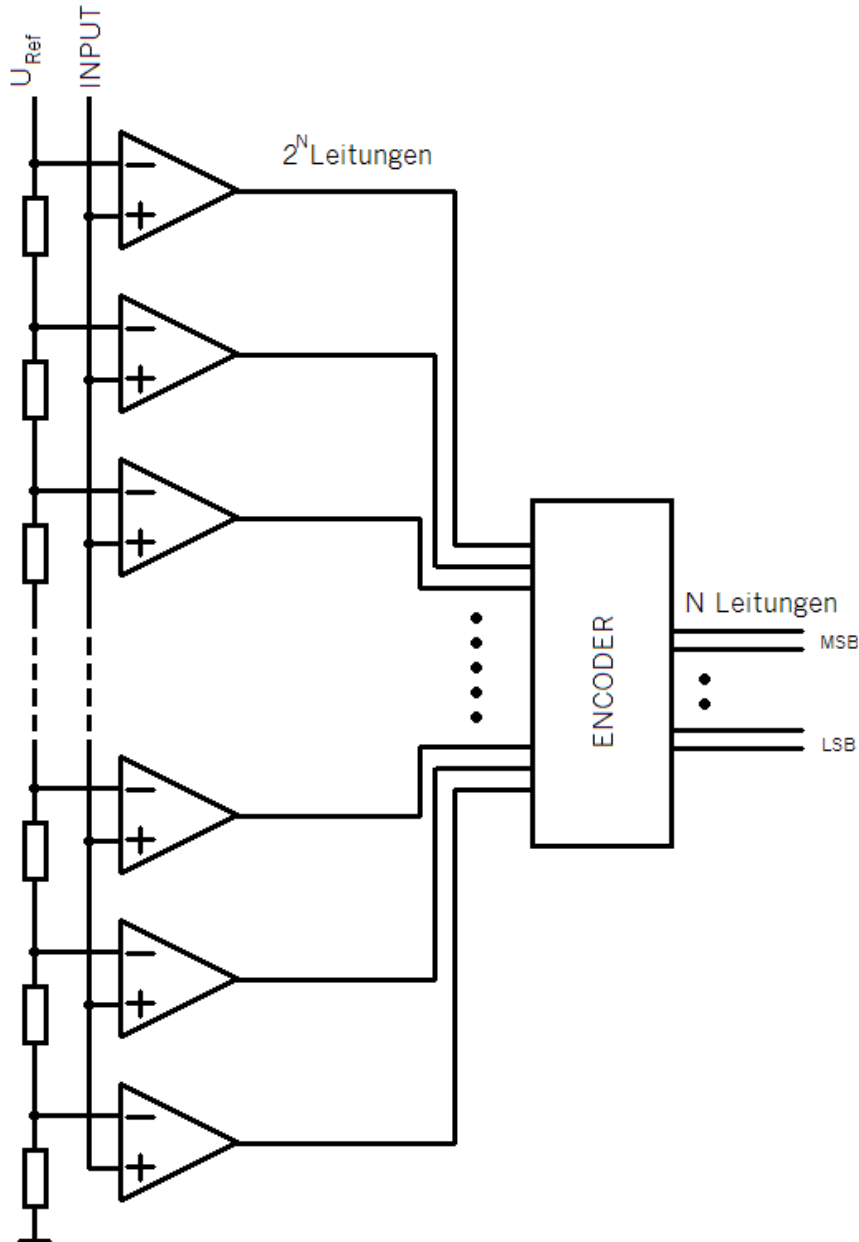
2: ADCs: Analog-Digital-Wandler

- Bisher: Analoges Signal (hoher Informationsgehalt) wird in 1 Bit Signal (relativ geringer Informationsgehalt) umgewandelt.
- Oft genauere Information erwünscht -> genauere Quantisierung der Spannung / Ladung
- -> **ADC / QDC**
- ADC misst Spannung zu einem bestimmten Zeitpunkt, Ausgabe als Binärwert

2: ADCs

- Einschränkung: Messzeitpunkte können nicht beliebig nahe aneinander liegen – maximale „Samplingrate“
- weiter Bereich von Samplingraten möglich: wenige SPS bis einige GSPS
- weitere Einschränkung: Quantisierung nicht beliebig genau, Auflösungen vorhanden im Bereich 6 Bit bis 24 Bit (Beispiel: Digitalmultimeter hat oft 11 Bit)
- hohe Auflösung und hohe Samplingrate schließen sich aus, Kompromiss nötig

2: ADCs – Beispiel Flash-ADC

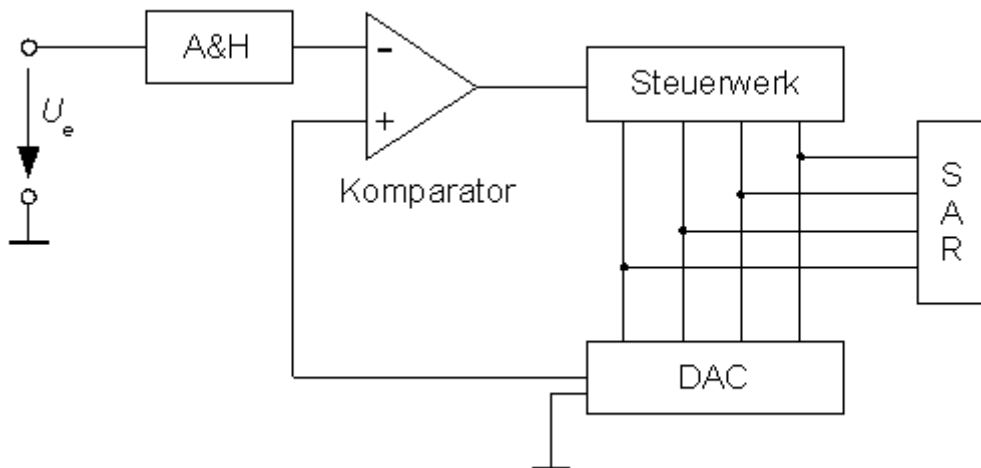


Auflösung n-Bit (Verfügbar 6 bis 12 Bit)

- besteht aus 2^n Komperatoren mit passend angelegten Schwellen
- Ausgänge werden auf Encoder gegeben
- High-Speed (bis einige GSPS)
- hoher Stromverbrauch

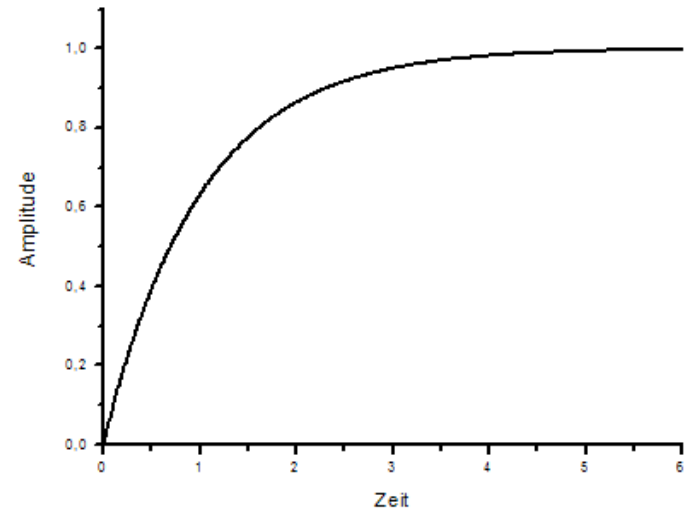
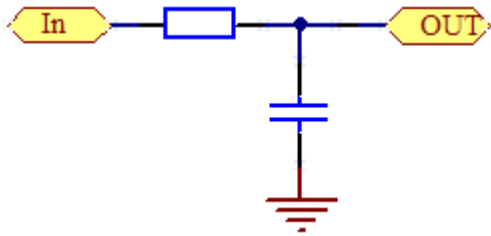
2: ADCs – Sukzessive Approximation

- Erreichbare Werte: 16 Bit bei 1 MHz
- Pro Schritt ein Bit setzen
- Eingrenzung per Intervallschachtelung
- Vorteile: bessere Auflösung, geringerer Stromverbrauch

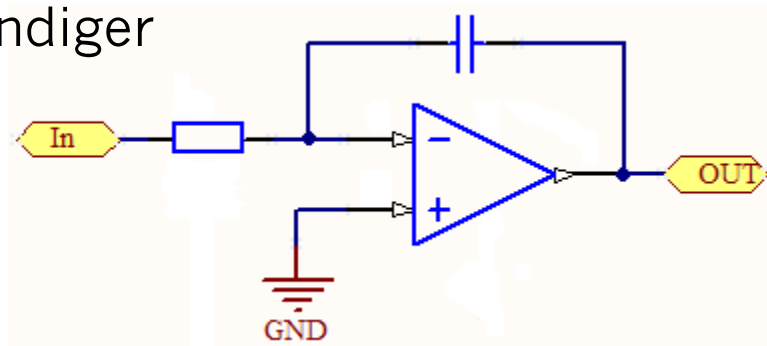


2: ADCs – QDCs

- zusätzliche Schaltung vor ADC: Integration des Stromes (Ladung sammeln)
- für “kleine” Ströme: Tiefpass

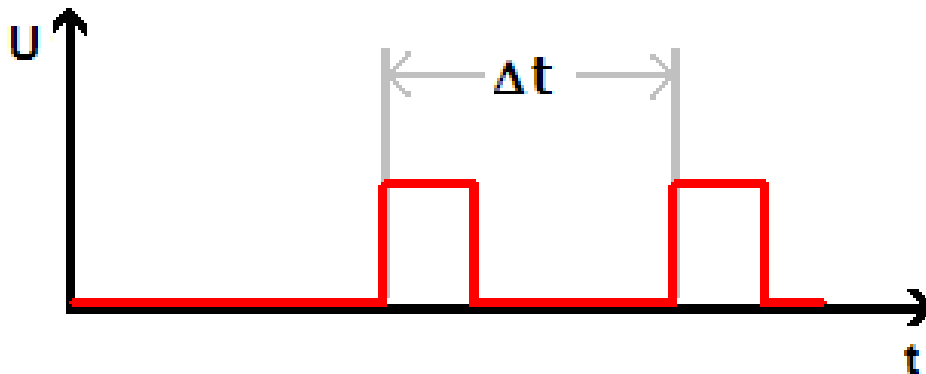
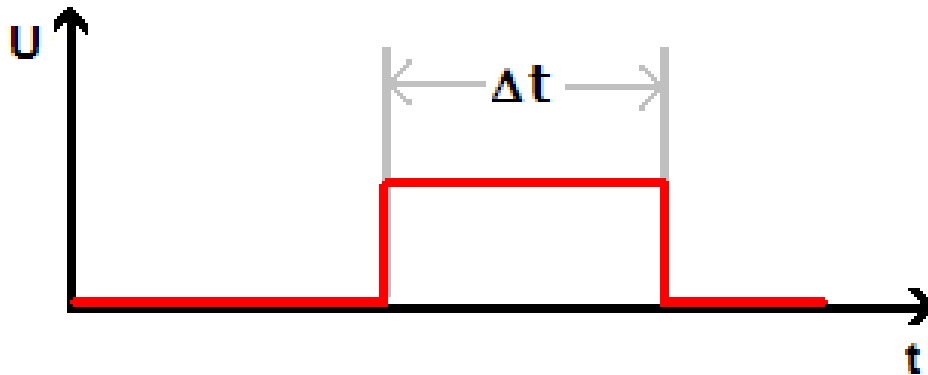


- bei größeren Strömen: Integratorschaltung mit Opamp
 - Vorteil: allgemein genauer
 - Nachteil: aufwändiger



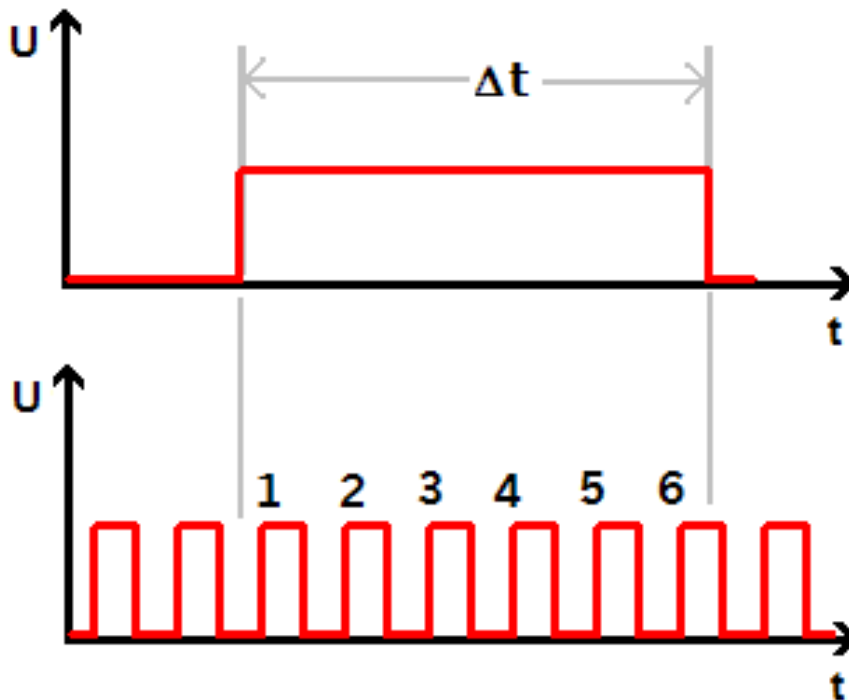
2: TDCs – Time to Digital Converter

- Ziel: Zeitinformation Digitalisieren
- Zu messende Größen
 - Dauer eines Pulses
 - Abstand zwischen zwei Pulsen



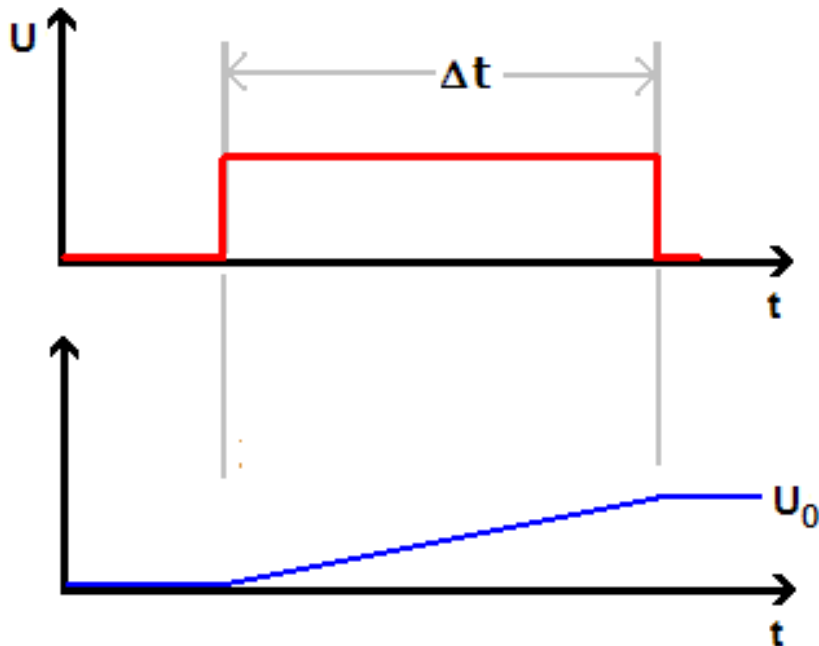
2: TDCs – Time to Digital Converter

- Verschiedene Realisierungsmöglichkeiten:
 - Counter wird mit Signal gated, zählt Taktpulse, machbare Auflösung ~ 1 ns



2: TDCs – Time to Digital Converter

- Verschiedene Realisierungsmöglichkeiten
 - TAC -> ADC
 - zuerst Zeitsignal in Analogsignal umwandeln
 - Kondensator mit Spannung laden
 - für bessere Genauigkeit: Integratorschaltung (Wie bei QDC)
 - dann analoges Signal mit ADC messen



- Erreichbare Auflösung: ps
- leicht skalierbar durch Wahl von Widerstand und Kondensator

Teil 3

Hardwarefilter: Trigger

3: Hardwarefilter - Trigger

- Warum Triggern und nicht alles Aufzeichnen?
 - Bei uns:
 - 9 x 2 x 12 Bit (Photodioden), 2 Bit (Veto), 16 Bit Tagger
 - Mindestens mit 1 MSPS abtasten
 - 4 Tage Laufzeit
 - Ergibt ca 74 TB Daten!
 - Speicherung Problematisch, Auswertung unnötig aufwändig
 - größtes Problem: hauptsächlich nutzlose Information
 - (bei 1 Ereignis/s passiert die meiste Zeit gar nichts)
 - Lösung: Elektronik entwickeln, die meldet, wenn Ereignis war, nur dann Datensatz speichern

3: Hardwarefilter - Trigger

- Unser Trigger:
 - $(\text{Block1} \wedge \sim\text{Veto1}) \wedge (\text{Block2} \wedge \sim\text{Veto2}) \wedge \text{Tagger}$
- Ursprüngliche Version:
 - $(\text{Block1} \wedge \text{Block2}) \wedge (\sim\text{Veto1} \wedge \sim\text{Veto2}) \wedge \text{Tagger}$
- Sieht auf ersten Blick gleich aus, Unterschied entsteht durch Monoflop hinter Gatter
 - Gatedauer der einzelnen UND-Blöcke muss lang genug sein, damit Koinzidenz wirklich zustande kommt.
 - Verwendete Version ergibt kleinere Totzeiten

Teil 4

DAQ – Data Acquisition

4: DAQ

- Letzter Schritt: Speicherung der Daten auf PC
- Programmablauf:
 - Warten auf Trigger
 - Aufnahme Sperren
 - ADCs auslesen und in Datei speichern
 - ADCs reseten

Literatur

- Leo, William R.: Techniques for nuclear and particle physics experiments
- Schmidt, Hans Ulrich: Meßelektronik in der Kernphysik
- Horowitz, Paul: The art of electronics