

1. Zeit- & Frequenzmessung

1.1 Allgemeines:

- **Analoge Frequenzmesser** sind entweder elektromechanische, elektrische oder elektronische Messgeräte zur Bestimmung der Frequenz einer elektrischen periodischen Wechselspannung oder von periodischen Rechtecksignalen.

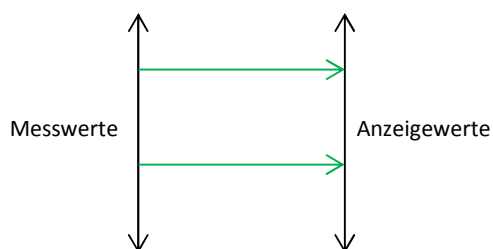
$$\begin{aligned} \text{Frequenz} &= \frac{\text{Ereignisse}}{\text{Zeit}} \\ &= \frac{\text{Schwingungen}}{\text{Zeit}} \\ &= \frac{\text{Impulse}}{\text{Zeit}} \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \text{Frequenz} &= \frac{\text{Ereignisse}}{\text{Zeit}} \\ &= \frac{\text{Schwingungen}}{\text{Zeit}} \\ &= \frac{\text{Impulse}}{\text{Zeit}} \end{aligned}} \right\} \left[\frac{1}{\text{sec}} = \text{Hz} \right]$$

- **Digitale Frequenzmesser** sind meist elektronische Messgeräte, welche die Frequenz aus der Periodendauer periodischer Signale ableiten bzw. berechnen.

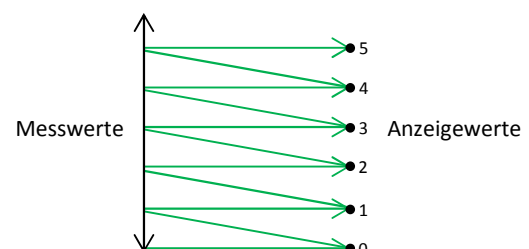
$$T[\text{sec}] \rightarrow f = \frac{1}{T} \left[\frac{1}{\text{sec}} = \text{Hz} \right]$$

- **Digitale Zeitintervallmesser** sind meist elektronische Messgeräte, welche das Zeitintervall zwischen 2 Ereignissen messen und daraus die Frequenz, Anstiegs- & Abfallzeit, Impulsdauer, Tastverhältnis usw. bestimmen.

Messmethode:



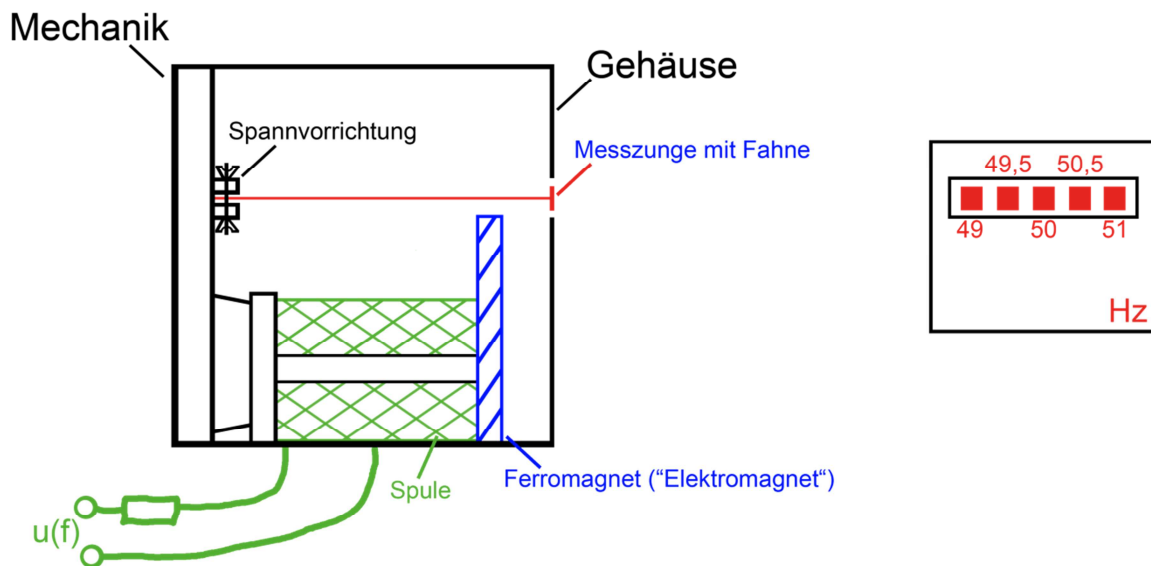
analog
↓
wertkontinuierlich
(+ zeitkontinuierlich)



digital
↓
wertdiskret
(+ zeitdiskret)

1.2 Analoge Frequenzmesser

1.2.1. Vibrationsmesser

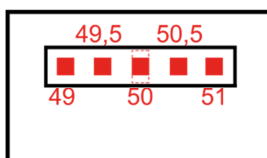


Eine Anzahl von Stahlzungen (Messzunge + Fahne) ist einseitig in einer Spannvorrichtung festgeklemmt, wobei die Fahne in einer Gehäuseöffnung sichtbar ist und der Anzeige dient. Durch die Spule des Elektromagneten fließt ein periodischer, sinusförmiger Wechselstrom mit der Frequenz f . Das Magnetfeld schließt sich zum Teil über die Messzunge, durch das Wechselfeld werden die Zungen abgestoßen bzw. angezogen, was zu einer Durchbiegung der Stahlzunge führt (Zunge = Biegeschwinger). Jede Messzunge wird auf eine eigene Eigenschwingungszahl abgestimmt (7 ... 1500Hz, unter 7 Hz wird die Zunge zu lang und würde auch mechanische Erschütterungen anzeigen, oberhalb von 1500Hz wird die Schwingungsweite zu klein – nicht ablesbar)

$$f_{el} \rightarrow 2 * f_{el} = f_{magnetisch} = f_{Resonanz-mechanisch}$$

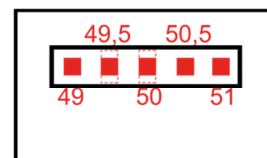
$$f = 50\text{Hz} \rightarrow f_{magnetisch} = f_{Resonanz-mechanisch} = 100\text{Hz}$$

$$f = 50\text{Hz}$$



50Hz-Zunge schwingt mit maximaler Schwingweite, alle anderen bewegen sich (fast) nicht.

$$f = 49,75\text{Hz}$$



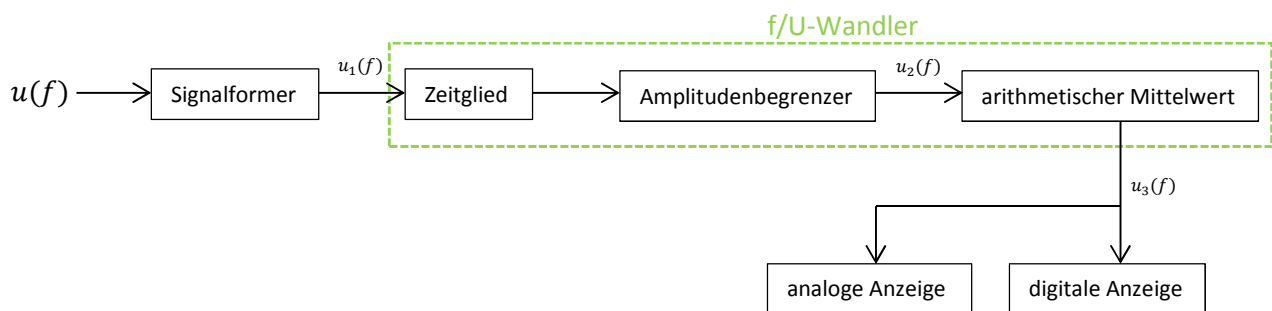
49,5Hz-Zunge und 50Hz-Zunge schwingen mit gleicher Schwingweite, alle anderen (fast) gar nicht.

Anwendung / Kennwerte:

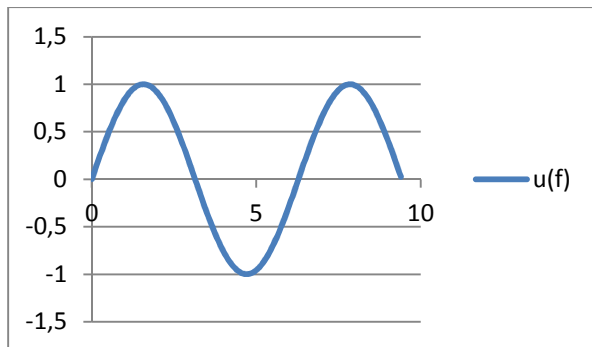
- Frequenzmessgerät mit Vibrationsmesswert, Zungenfrequenzmesser
- Abstimmungstoleranz ca. 1‰ der Mittelfrequenz
- Einsatzfrequenzbereich: 7...1500Hz
typische Messbereichsangabe: 49 - 50 - 51
 360 - 400 - 440
 (min)(Mitte)(max)
- Eingangsspannung: Nennspannung 60V...600V
- Toleranz der Eingangsspannung: $\pm 10\%$

1.2.2. f/U-Wandler

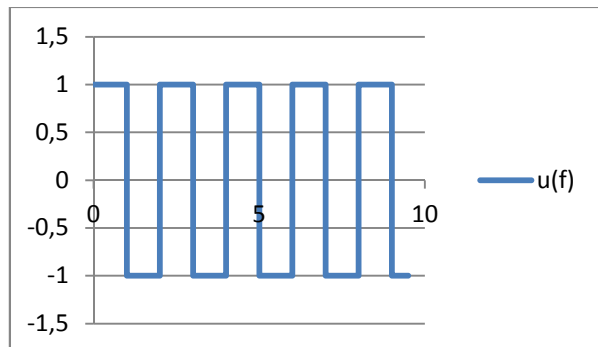
Bei dieser Messmethodik wandelt man eine periodische Wechselgröße mit einer Frequenz f in eine analoge Gleichspannung $u_3(f)$ um. Die Anzeige selbst kann mit einem analogen Voltmeter aber auch digital erfolgen.



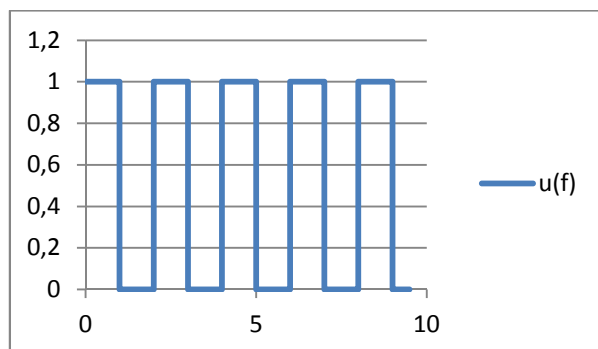
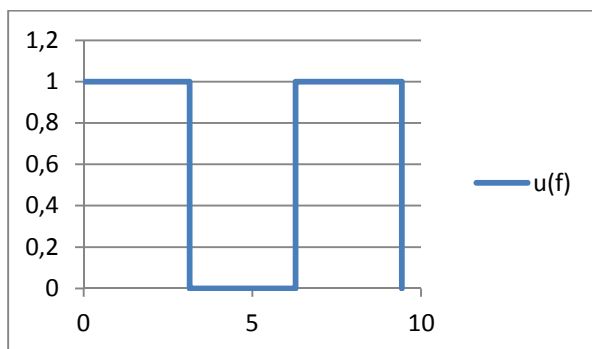
$u(f)$ kleines f



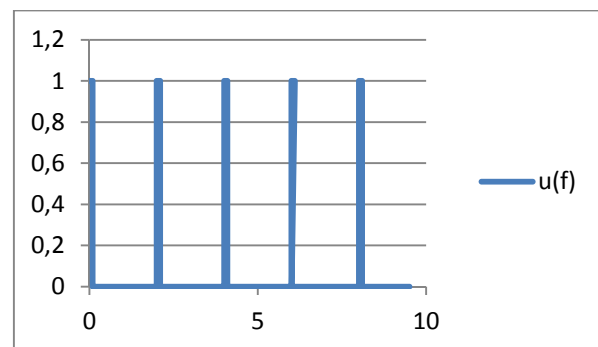
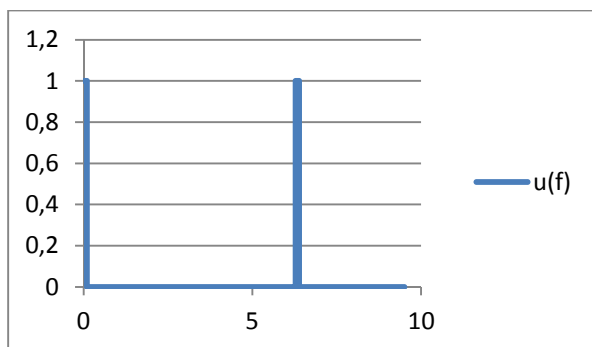
großes f



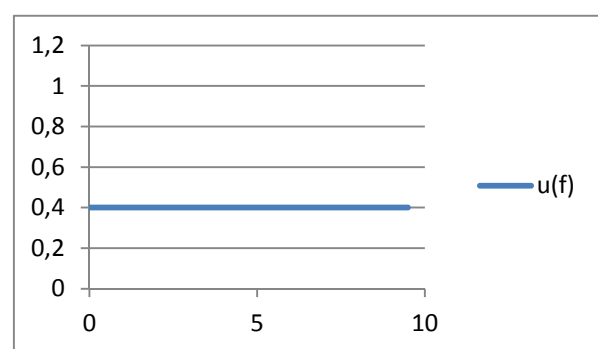
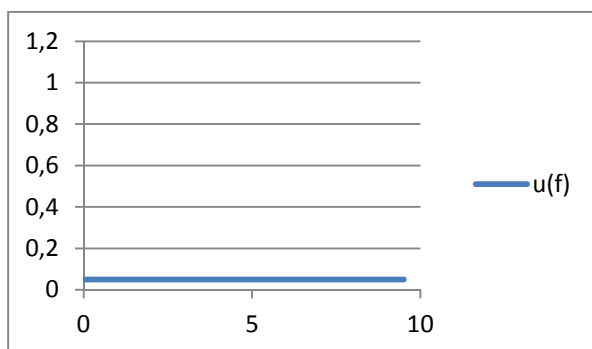
→ Signalumformer → $u_1(f)$



→ Zeitglied + Amplitudenbegrenzer → $u_2(f)$



→ arithmetischer Mittelwert → $u_3(f)$



Das periodische Eingangssignal $u(f)$ wird in ein frequenzgleiches, periodisches Rechtecksignal $u_1(f)$ mittels Signalformer umgewandelt, welches bei steigender Flanke einen Impuls konstanter Spannung mit der festen Länge t abgibt. Die nachgeschaltete Amplitudenbegrenzung verhindert eine Rückwirkung des Mittelwertbildners auf das Zeitglied. Die Bildung des arithmetischen Mittelwertes ergibt eine analoge Gleichspannung $u_3(f)$, welche zur Anzeige dient.

Analoge Anzeige: Drehspulmesswerk

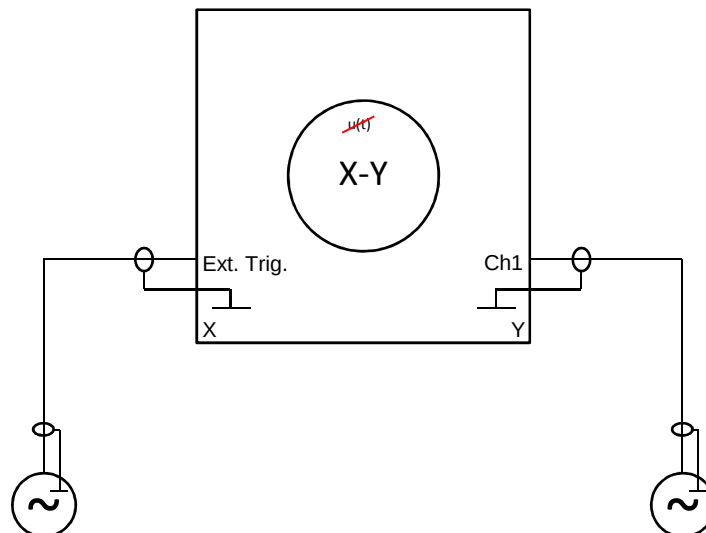
Digitale Anzeige: A/D-Wandler + Mikrocontroller + Display

$$f_{max} = \frac{1}{t_{min}} = \frac{1}{2 * t}$$

IC: Zeigerfrequenzmessgerät, Multimeter, Frequenz-Messmodule in Automatisierungstechnik

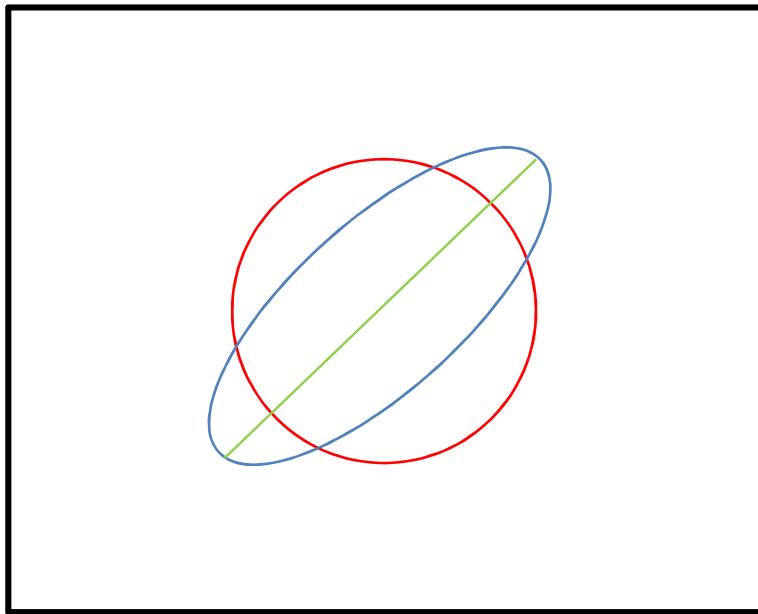
Einsatzbereich: >0Hz ... 500kHz

1.2.3 Oszilloskop im X-Y-Betrieb



Verwendet wird ein handelsübliches Oszilloskop, welches im sogenannten X-Y-Betrieb eingesetzt wird. Beim X-Y-Betrieb wird für die X-Achse nicht die Zeitachse verwendet, sondern ein Eingangssignal.

Anzeige/Messung: („Lissajou-Figuren“)



$$f_1 = f_2$$

$$\varphi = 0$$

$$\varphi = 90^\circ$$

$$\varphi = 45^\circ$$

$$f_1 = n \cdot f_2$$

$$n = 1 \dots 10 (15)$$

↑
bekannt

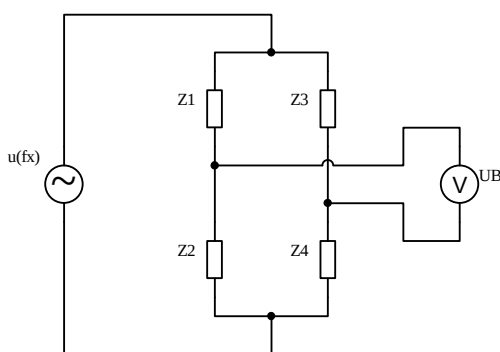
↑
?

Kennwerte:

Der Messbereich hängt vom Eingangsfrequenzbereich des verwendeten Oszilloskops ab, sinnvolle Messung nur für sinusförmige Wechselgrößen.

Anwendung: vergleich 2er Frequenzen (f_1 bekannt, f_2 unbekannt), Abgleich einer unbekannten Frequenz auf eine Bekannte (Fertigung, Abgleich von Oszillatoren)

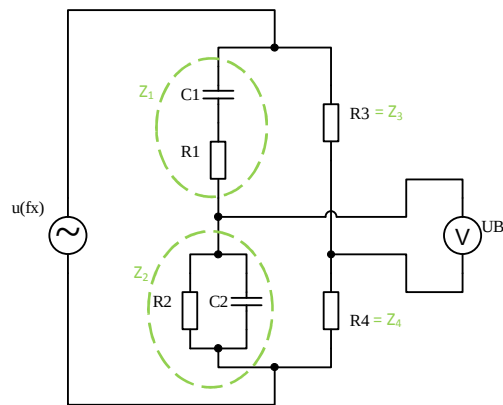
1.2.4 Wechselstrommessbrücke



$$U_B = 0V, \text{ wenn } \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4}$$

$u(fx)$... sinusförmiges Messsignal mit der unbekannten Frequenz f_x

Bsp: fx-Messung: „Wien-Robinson-Messbrücke“



$$U_B = 0V, \text{ wenn } \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4}$$

$$Z_1 = R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} = \frac{jR_1\omega C_1 + 1}{j\omega C_1}$$

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4}$$

$$Z_2 = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + j\omega C_2}$$

$$Z_3 = R_3$$

$$Z_4 = R_4$$

$$\frac{(j\omega C_1 R_1 + 1) * (1 + j\omega C_2 R_2)}{j\omega R_2 C_1} = \frac{R_3}{R_4}$$

$$(j\omega C_1 R_1 + 1 + j\omega C_2 R_2 + j^2 \omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2) * R_4 = R_3 * j\omega R_2 C_1$$

$$\text{a=c: } 1 - \omega^2 * R_1 R_2 C_1 C_2 = \frac{R_3}{R_4}$$

$$\text{b=d: } R_4 * (\omega C_1 R_1 + \omega C_2 R_2) = \omega R_2 R_3 C_1$$

$$\omega = \pm \sqrt{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

$$R_3 = 2 * R_4$$

„vereinfachte Abgleichbedingung“:

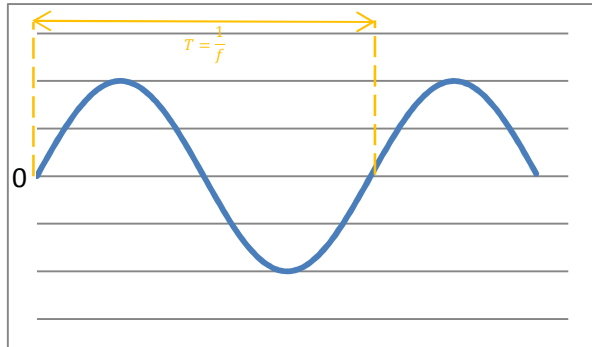
$$\left. \begin{array}{l} R = R_1 = R_2 \\ C = C_1 = C_2 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \omega = 2\pi f_x = \frac{1}{\sqrt{R^2 C^2}} = \frac{1}{RC} \\ f_x = \frac{1}{2\pi RC} \end{array}$$

Kennwerte:

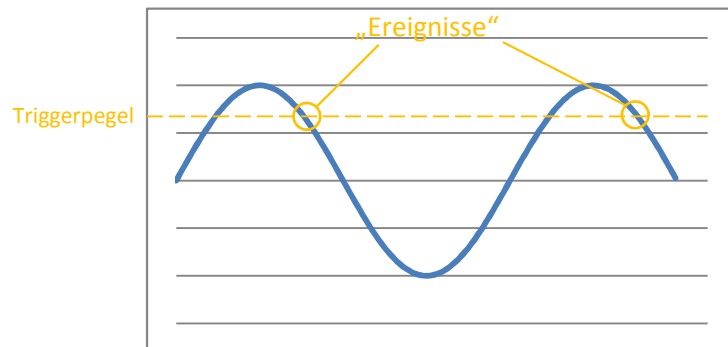
- Vorteil: einfacher Spannungsabgleich
- Einsatzfrequenzbereich: <1Hz ... 500MHz (abhängig von Bauteilwerten)
- Nachteil: Toleranzen der Bauteile gehen in Messergebnis ein, nur für sinusförmige Wechselgrößen geeignet, Güte der Kondensatoren geht in Messergebnisse ein

1.3 Digitale Frequenzmesser

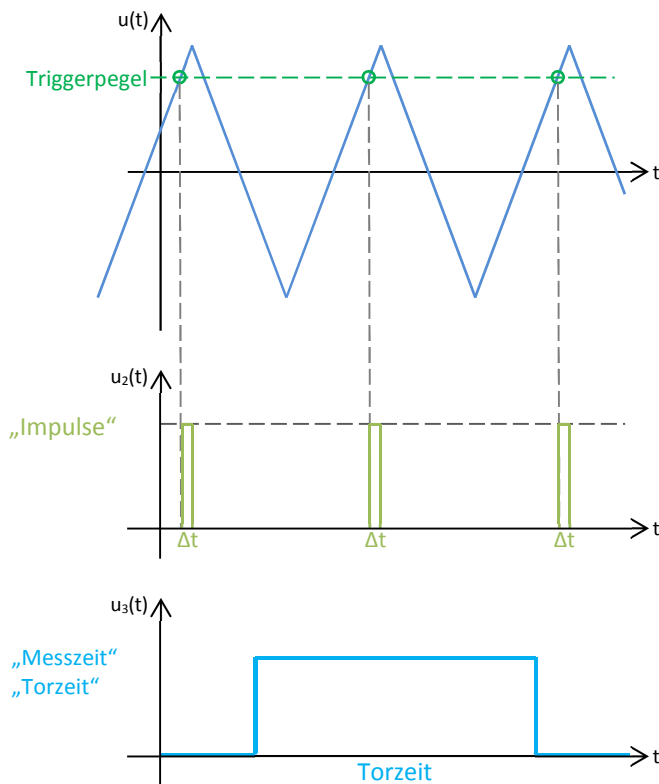
1.3.1 Grundprinzip



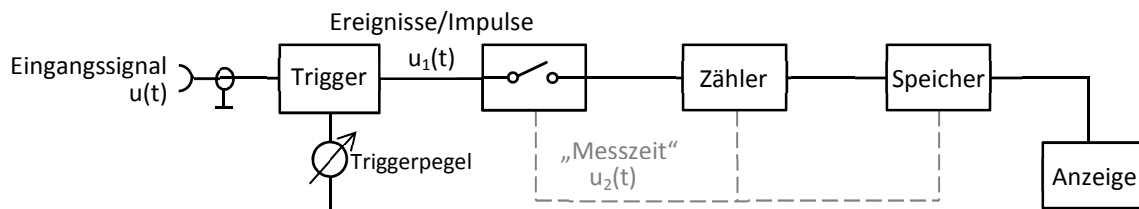
Bei der Frequenzmessung wird die Frequenz eines periodischen Wechselsignals, ohne Berücksichtigung der Amplitude oder Phase bestimmt. Gemessen wird die Anzahl der Wiederholungen eines Ereignisses (eines bestimmten Amplitudenwerts, der den Triggerpegel in positiver Richtung durchlaufen wird).



1.3.2 Einfaches Blocksaltbild eines digitalen f-Messers



$$f[\text{Hz}] = \frac{\text{Anzahl Impulse [1]}}{\text{Torzeit [s]}}$$

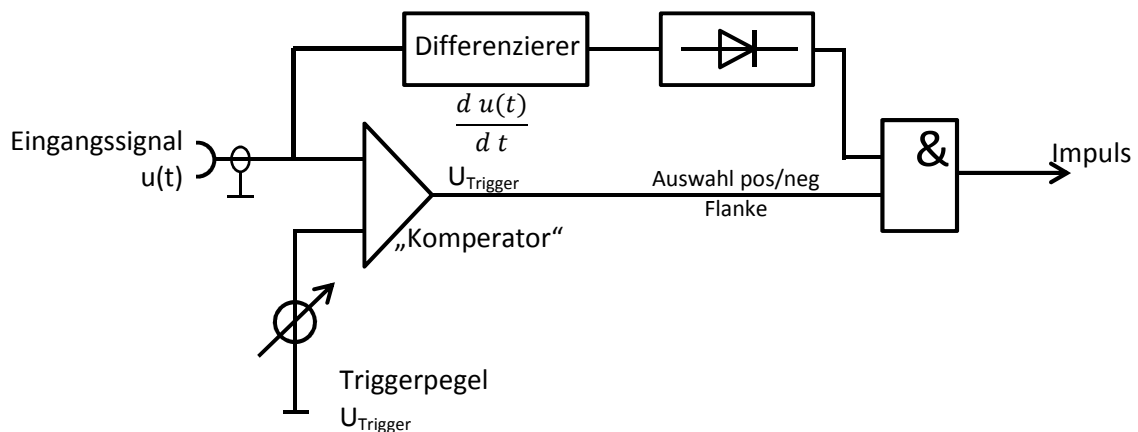


Der Trigger hat die Aufgabe einen eindeutigen Amplitudenwert aus dem periodischen Eingangssignal zu suchen und diese Ereignisse als kurze Impulse auszugeben. Für die Dauer der Torzeit werden diese Impulse mit einem Zähler gezählt und „anschließend“ als Zahl der Ereignisse N_x gespeichert. Die berechnete Frequenz $f_x = \frac{\text{Anzahl der Impulse}}{\text{Torzeit}}$ wird zur Anzeige gebracht.

1.3.3 Trigger

Der Trigger hat die Aufgabe, einen eindeutigen Amplitudenwert aus dem periodischen Eingangssignal zu suchen, welcher über einen Triggerpegel bzw. steigende/fallende Flanke ausgewählt wird. Am Ausgang der Triggerschaltung wird pro Ereignis ein Normimpuls (konstanter Pegel, konstante Länge) ausgegeben. Hinweise:

- Triggerpegel und steigende/fallende Flanke wird vom Bediener ausgewählt
- Triggerung ist prinzipiell bei jedem Signal möglich
- Triggerung bei 0V führt bei verrauschten Signalen zu Fehlmessungen
- Triggerpegel muss bei jeder Periode des Eingangssignals erreicht werden.



Die Eingangsspannung des Messsignals $u(t)$ wird mit Hilfe eines Komparators mit dem eingestellten Triggerpegel verglichen. Der Ausgang des Komparators gibt eine Spannung ab, wenn $u(t) = U_{\text{Trigger}}$. Weiters wird vom Eingangssignal mit einem „Differenzierer“ das Vorzeichen des Anstieges bestimmt und anschließend der positive oder negative Anstieg ausgewählt. Legt man beide Teilergebnisse an die Eingänge eines &-Gatters, so erhält man nur dann einen Ausgangsimpuls, wenn beide Signale logisch 1 sind. Ergänzend können am Eingang der Triggerschaltung noch zusätzliche Schaltungsteile vorgesehen werden:

- Tiefpassfilter: Rauschunterdrückung („high frequency reject“)
 - Nachteil: reduzieren Eingangsfrequenzbereich/hohe Frequenzen nicht gezählt werden.
- Koppelkondensator: ergibt einen Hochpass („low frequency reject“)
 - $U(f_x) = \text{Mischgröße} = AC + DC \rightarrow U(f_x) = \text{Wechselgröße} = AC$
 - Niedrige Frequenzen können nicht gezählt werden

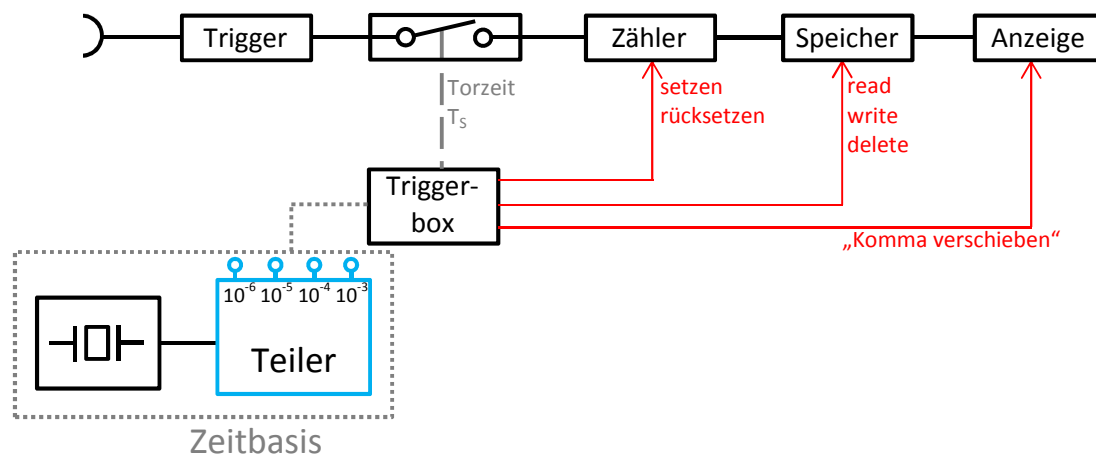
1.3.4 Zeitbasis

Die Zeitbasis eines digitalen Frequenzzählers stellt die Messzeit / Torzeit zur Verfügung.

Einfache/Billige bzw. ältere Geräte verwenden als Zeitbasis die Netzfrequenz. Heute werden einerseits einstellbare Zeitbasen verwendet, meist Quarzzeitbasis, weil diese nicht nur kostengünstiger sondern auch genauer sind. Für Messbereichserweiterungen werden diese Referenzfrequenzen in 10^n -Schritten geteilt (n von -6 bis 1)

XOQuarzoszillator
TCXOTemperaturkompensierter XO
OCXOOvencontrolled XO

1.3.5 Erweitertes Blockschaltbild eines digitalen f-Messer



Das erweiterte Blockschaltbild zeigt den Einsatz einer erweiterbaren Zeitbasis. Durch den 10^n -Teiler wird einerseits die Torzeit eingestellt (1sec entspricht Messung in Hz) und andererseits der Dezimalpunkt entsprechend verschoben. Weitere Ausgänge sind setzen & Rücksetzen des Zählers bzw. lesen, schreiben & löschen des Speichers. Eine verbesserte Genauigkeit ergibt sich durch die Genauigkeit der Messzeit – Abhängig von der Genauigkeit des Quarzoszillators.

1.3.6 Messfehler

Generell dürfen Frequenz-Messer nicht für „unbekannte“ Signale verwendet werden -> Kontrolle mit Oszilloskop.

Arten von Messfehlern:

- Zeitbasisfehler
- Zählfehler
- Triggerfehler

1.3.6.1 Zeitbasisfehler

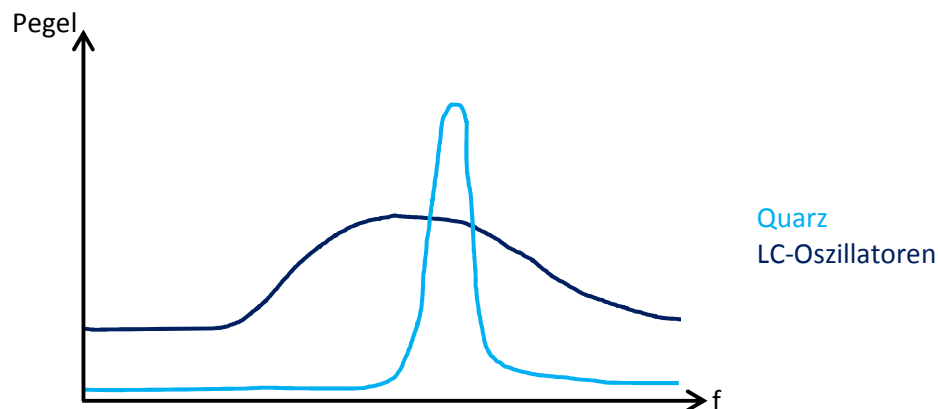
Fehlerquelle ist allein die Zeitbasis, nicht stabile Referenzfrequenz ergibt unterschiedliche Referenzzeiten/Torzeiten.

Zusätzliche Änderungen:

- Frequenzänderung durch Temperaturänderung
- Frequenzänderung durch Alterung
- Frequenzänderung durch Betriebsspannungsänderung

Für Zeitbasis geeignet:

- 50 Hz
- LC-Oszillatoren
- Quarzoszillatoren
- Temperaturkompensierte Quarzoszillatoren
- Quarzoferen
- Rubidium-Normal: Als externe Zeitbasis
- Atom-Normal



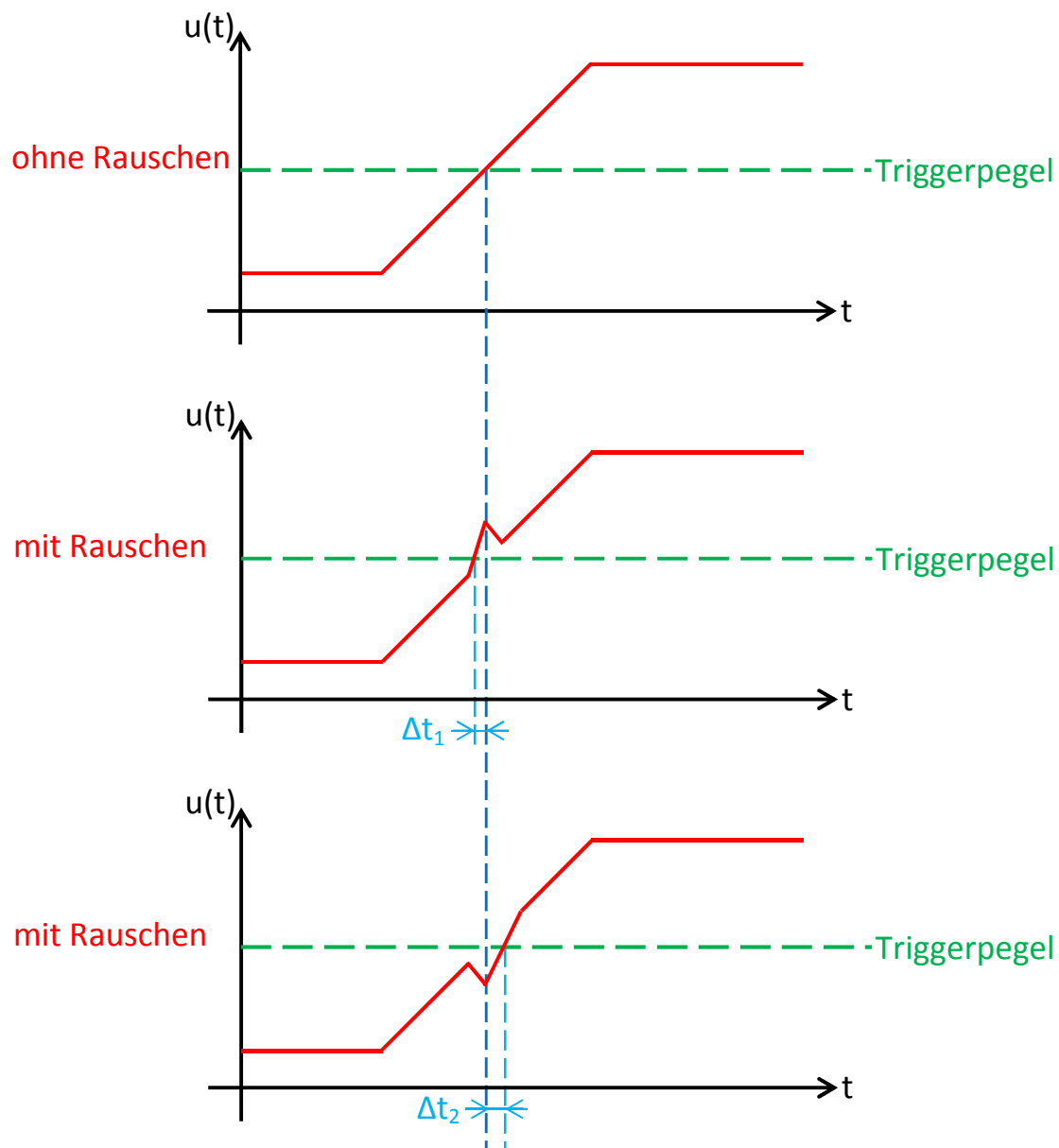
Quarzoszillator:

	CXO, XO	TCXO	OCXO
Über Temperatur:	± 5ppm (0-50°C)	±1ppm bei 25°C ±0,28ppm (0-50°C)	±100ppb ±10ppb (-20 bis +70°C)
Über Spannungsvers.:	Nicht spezifiziert	±0ppm	±2ppb
Alterung (1. Jahr):	±2ppm	±0,8ppm	±5ppb
Alterung (15 Jahre):	±2ppm	±4,5ppm	±4,6ppb

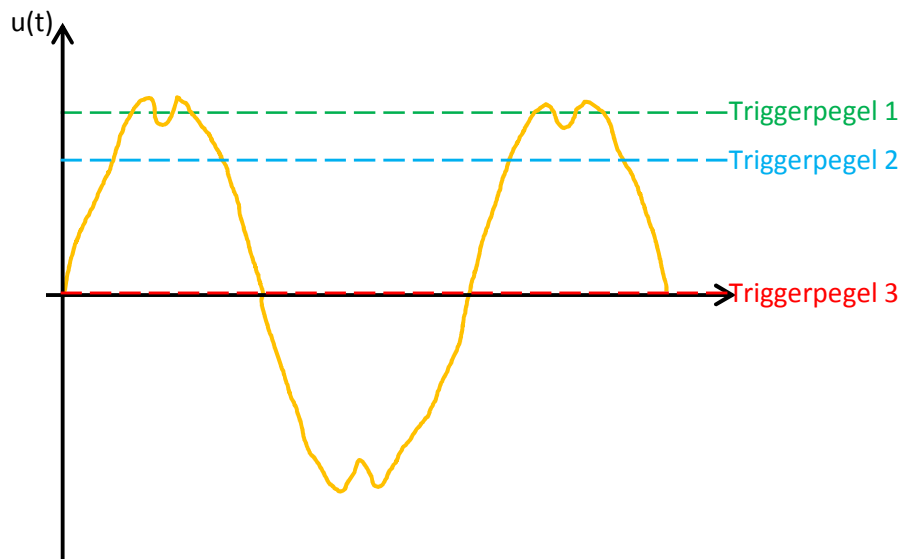
1.3.6.2 Triggerfehler

Die Fehlerquelle ist eine ungenaue/nicht korrekte Festlegung der Triggerzeitpunkte und damit der Periodizität bei der Frequenzmessung.

- ungenauer Triggerzeitpunkt durch hohes Eigenrauschen
- Amplitude des Eingangssignals zu klein
- ungeeignete Eingangssignale (z.B. kurze gepulste Signale, Frequenzmodulierte Signale)
- verrauschtes Eingangssignal (ungenauer Triggerzeitpunkt, Mehrfachereignisse)
- flache Anstiege des Eingangssignals
- ungünstig/falsch gewählter Triggerpegel



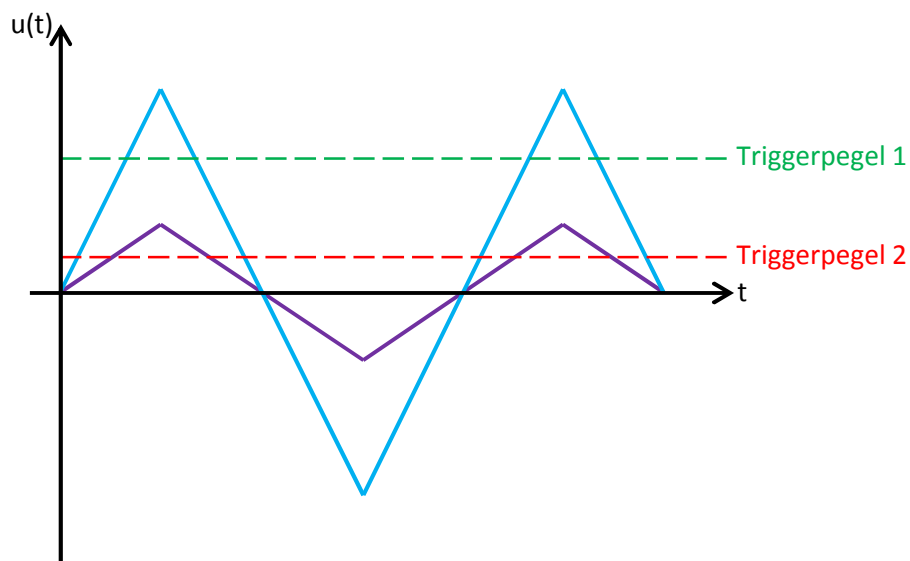
Durch verrauschte Eingangssignale kann der Triggerzeitpunkt zu Früh aber auch zu spät liegen.



1.: Triggerpegel falsch: Die Ereignisse zeigen nicht die periodizität des Messsignals

2.: Triggerpegel ok / im Falle eines Sinus nicht die größte Signalsteilheit

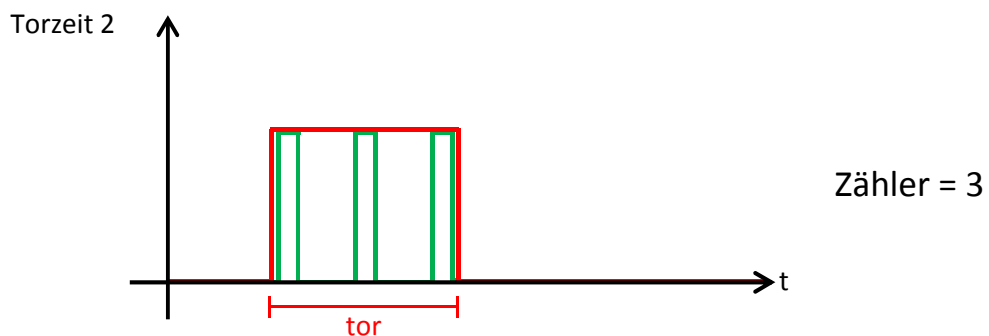
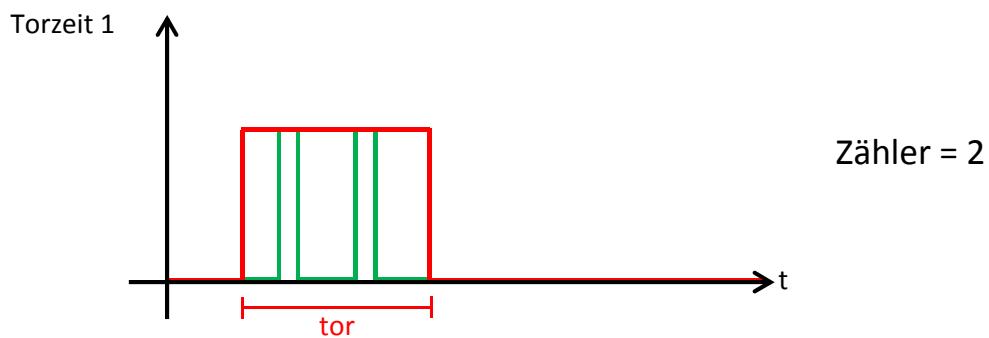
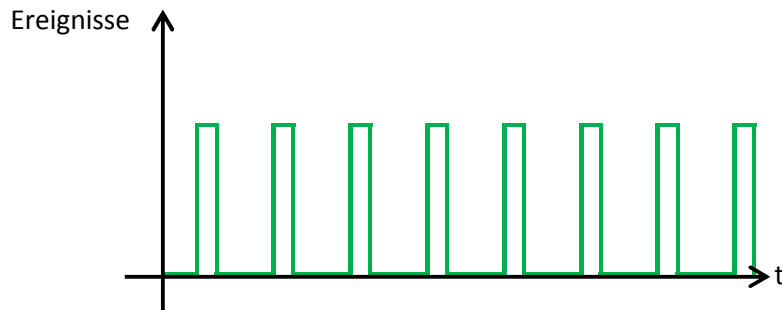
3.: Triggerpegel gut gewählt



Bei kleinen Amplituden einerseits Ungenauigkeit im Triggerzeitpunkt durch den schleifenden Schnitt, andererseits wirkt sich ein verrauschter Triggerpegel bei schleifenden Schnitten stärker aus. Der Umkehrschluss ist ebenfalls zulässig: Triggerpegel nicht verrauscht, Eingangssignal verrauscht

1.3.6.3 Zählfehler

Fehlerquelle ist ein falsches Zählergebnis während der Torzeit, da das Eingangssignal und die Messzeit nicht synchronisiert sind.



Bei gleicher Torzeit ergibt sich bei Torzeit 1 ein Zählerstand von 2 und bei der gleich großen Torzeit 2 ein Zählerstand von 3 $\rightarrow \pm 1$ Fehler

$$\text{relativer Fehler: } F_R = \frac{\pm 1}{\text{"Zählerstand"}} = \frac{\pm 1}{N}$$

$$N = T * f_x$$

Torzeit Eingangsfrequenz

$$F_R = \frac{\pm 1}{N} = \frac{\pm 1}{T * f_x}$$

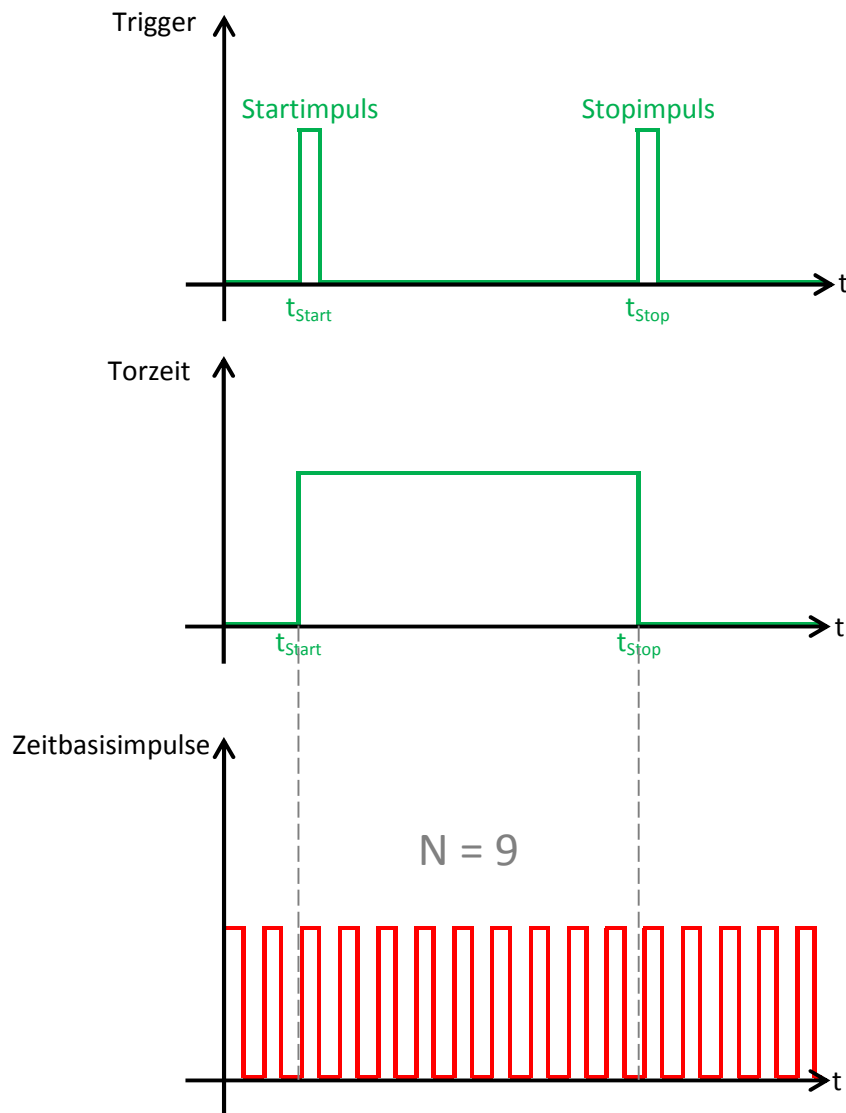
Je größer die Messzeit und je höher die Anzahl der in dieser Zeit gemessenen Ereignisse, umso kleiner wird der ± 1 Fehler.

1.4 Digitale Zeitintervallmesser

1.4.1 Grundlagen

Frequenzmesser: Ein Zeitbasissignal bildet die Torzeit und die Impulse eines Eingangssignals werden gezählt.

Zeitintervallmessung: Das Eingangssignal bildet die Torzeit und die Zeitbasisimpulse werden gezählt.



Torzeit: $T_x = t_{stop} - t_{start} = N * T_{Signal} = \frac{N}{f_{Signal}}$

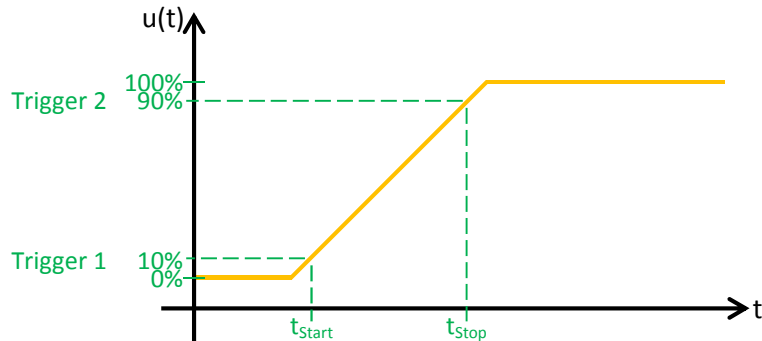
$$T_x \gg T_{Signal}$$

1.4.2 Anwendungen

- Anstiegs- und Abfallzeit:

Trigger1: t_{Start} 10% von U_{pp}

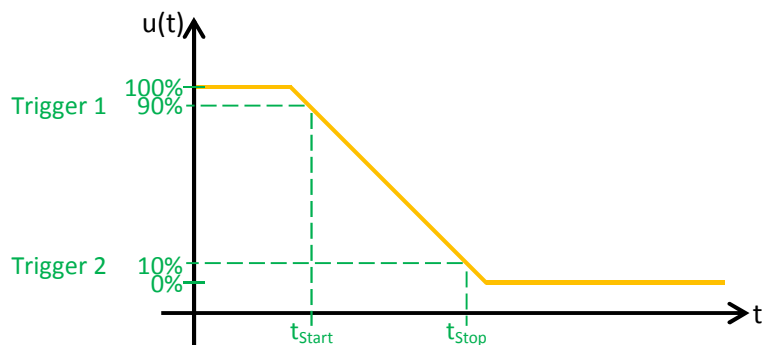
Trigger2: t_{Stop} 90% von U_{pp}



$$\text{risetime} = t_{\text{Stop}} - t_{\text{Start}}$$

Trigger1: t_{Start} 90% von U_{pp}

Trigger2: t_{Stop} 10% von U_{pp}



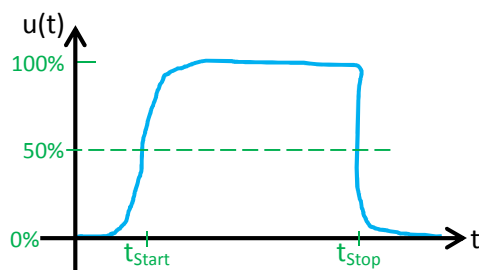
$$\text{falltime} = t_{\text{Stop}} - t_{\text{Start}}$$

- Impulsdauer:

pos

Trigger1: t_{Start} ...50% von U_{pp} + pos. Flanke

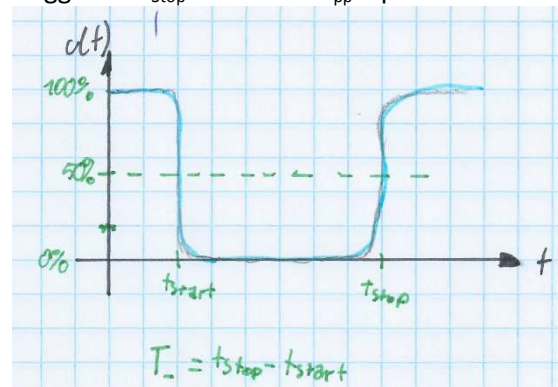
Trigger2: t_{Stop} ...50% von U_{pp} + neg. Flanke



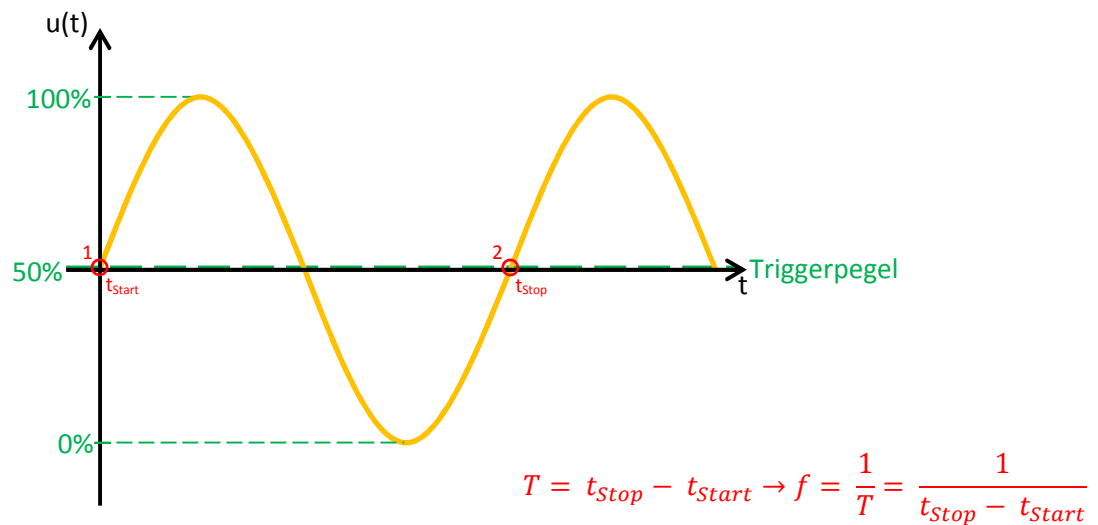
neg

Trigger1: t_{Start} ...50% von U_{pp} + neg. Flanke

Trigger2: t_{Stop} ...50% von U_{pp} + pos. Flanke



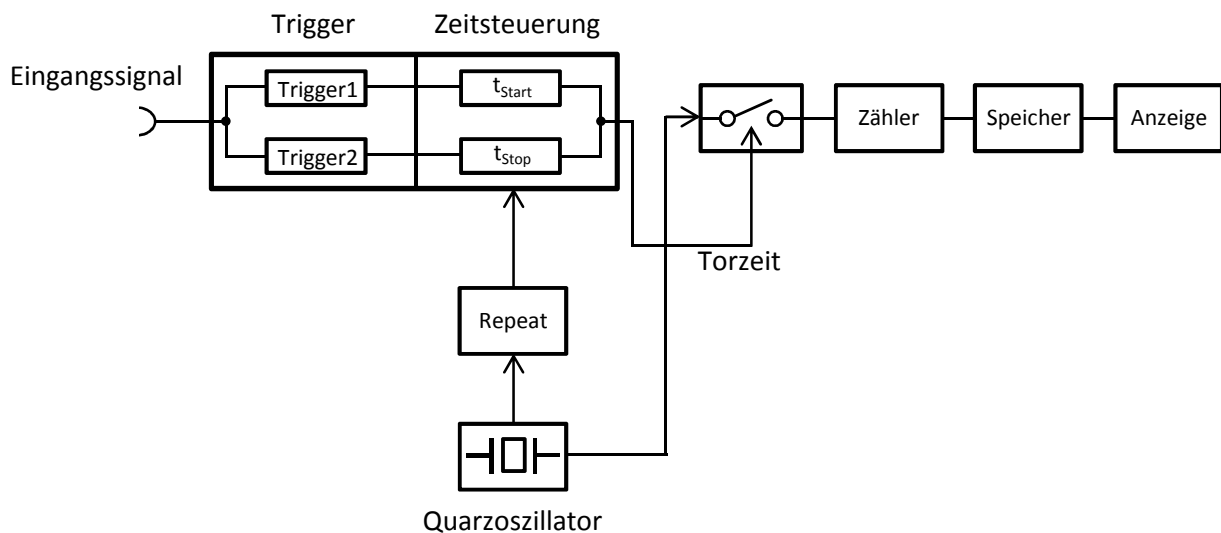
- Periodendauer:



Trigger1: 50% * U_{pp} , steigende Flanke (alternativ: fallend)

Trigger2: 50% * U_{pp} , steigende Flanke (alternativ: fallend)

1.4.3 Blockschaltbild eines digitalen Zeitintervallmessers



Das Eingangssignal wird an eine Triggerschaltung angeschlossen, Trigger 1 und Trigger 2 werden je nach Kennwert des Signals zugeordnet, wobei Trigger 1 einen Startimpuls und Trigger 2 einen Stopimpuls generiert. Zwischen den beiden Impulsen liegt die Torzeit. Um einen Abstand zwischen 2 Einzelmessungen zu ermöglichen, wird mit der Schaltung „Repeat“ zumindest $T_{min} (> \frac{1}{2} Torzeit)$ verzögert. Mehrere Einzelmessungen hintereinander werden meistens gemittelt.

1.4.4 Messfehler

- Es treten die gleichen Fehler auf wie bei der Frequenzmessung (nachlesen unter 1.3.6)
- Auch bei der Zeitintervallmessung gilt: Keine unbekannten Signale messen → mit Oszilloskop kontrollieren
- Arten der Messfehler: Zeitbasisfehler, Triggerfehler, Zählfehler (Gleicher Einfluss wie bei Frequenzmesser)

1.5 Universalzähler

Universalzähler ist ein Messgerät welches in der Grundversion geeignet ist für:

1. Digitale Frequenzmessung
2. Digitale Zeitintervallmessung
3. Erweiterungen auf Basis obiger Messergebnisse, z.B. Tastverhältnis, Ereigniszähler, Drehzahlmesser, ...