

8 Messung von Zeit und Frequenz

8.1 Einführung

Die Zeit ist eine der sieben Basisgrößen des Internationalen Einheitensystems SI (DIN 1301). In technischen Formeln wird sie mit dem Kennzeichen t dargestellt (französisch: temps, englisch: time). Alle abgeleiteten SI-Einheiten werden auf die Basiseinheiten zurückgeführt.

In der Astronomie und der Raumfahrt spielt die Zeit eine wesentliche Rolle. So war die Physik bestrebt, immer genauere Meßmethoden und Definitionen zu entwickeln. Gegenwärtig liegt die erreichbare Genauigkeit der Zeitbestimmung resp. Frequenzerzeugung mit kommerziellen Geräten bei $5 \cdot 10^{-12}$ [1], in den speziellen Zeit- und Frequenzlaboratorien bei $5 \cdot 10^{-15}$ [2].

Weltweit ist heutzutage eine einheitliche Zeitbasis von $1 \mu\text{s}$ realisierbar.

Angespornt durch diesen hohen Stand der Technik in der Zeitbestimmung wurden in den letzten Jahren andere Basisgrößen (Länge, Strom) und abgeleitete SI-Einheiten (Spannung, Widerstand etc.) auf die Zeit zurückgeführt. Man diskutiert heute sogar die Masse auf die Zeit zurück zu führen.

In der industriellen Meßtechnik sind die geforderten Genauigkeiten an die Zeit respektive an die Zeitmessung vielfach wesentlich geringer ($5 \cdot 10^{-6}$ bis $5 \cdot 10^{-8}$). Mit dem fortschreitenden Trend zur digitalen Meßwerterfassung (Computer) nutzt man vielfach indirekt den hohen Stand der Zeitmessung aus, so z.B. bei der Digitalisierung von Signalen mit hochauflösenden A/D-Wandlern, bei Präzisionsvoltmetern etc., indem dazu Zeitbasen von hoher Genauigkeit verwendet werden. In der modernen Nachrichtentechnik fordert man für die Taktversorgung Genauigkeiten von 10^{-9} bis 10^{-11} , um die hohen Datenraten mit möglichst wenig Fehlern bewältigen zu können.

8.2 Zeiteinheit / Definition

Die Basiseinheit der Zeit im Internationalen Einheitensystem ist die Sekunde (s). Bis 1956 war die Sekunde definiert als $1/86'400$ des mittleren Sonnentages. Bereits 1930 stellte man Unregelmäßigkeiten in der Erdrotation fest. So wurde 1956 eine neue Definition angenommen, die auf der Ephemeridenzeit basiert. Dabei wurde die Sekunde als $1/31'556'925,9747$ des tropischen Jahres definiert. Die Bestimmung der Ephemeridensekunde wurde sehr schwierig. So benötigte man eine Beobachtungszeit von mehreren Jahren, um eine Genauigkeit von 10^{-9} zu erreichen. Die fortschreitende Entwicklung auf dem Gebiet der Atomuhren hat 1967 zu einer neuen Definition der Sekunde geführt [3], [4]. „Die Sekunde entspricht der Zeitdauer von $9'192'631'770$ Perioden der Strahlung des Cäsiumatoms 133, die es beim Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes abgibt“.

Seit 1955 berechnet das BIPM (Bureau International des Poids et Mesures, in Paris) inoffiziell und seit 1971 mit offiziellem Mandat, auf der Grundlage der weltweit vorhandenen Atomnormale (ca. 100 Frequenznormale) eine Atomzeitskala TAI (Temps Atomique International) [4].

Die TAI ist eine künstliche Zeitskala, die nicht genau mit der astronomischen Zeit übereinstimmt. Um diese Abweichung zu korrigieren, wurde eine zusätzliche Zeitskala UTC (Coordinated Universal Time) erzeugt, die durch zusätzliche Schaltsekunden, am Ende eventuell zusätzlich noch Mitte Jahr, angepaßt wird. Diese Zeitskala wird über die Normalfrequenzsender weltweit verteilt und kann mit einer Unsicherheit bis gegen $1 \mu\text{s}$ empfangen werden [5].

Als Basiseinheiten der Zeit werden verwendet:

Sekunde s

Minute min = 60 s

Stunde h = 60 min = 3600 s

Tag d = 24 h = 1440 min = 86400 s

Jahr a = 365 d = 8'760 h = 525'600 min = 31'536'000 s

(Das Jahr ist im Einheitengesetz nicht festgelegt, wird aber im Geschäftsleben und in der Technik, z. B. Energiewirtschaft, üblicherweise mit 365 Tagen angesetzt.)

8.3 Frequenzgeneratoren und Uhren

Oszillatoren, die als Taktgeneratoren verwendet werden, sollen eine streng periodische Folge von Schwingungen, respektive Impulsen erzeugen und von Umgebungseinflüssen kaum beeinflussbar sein. Ihr Aufbau besteht im wesentlichen aus einer Steuerung, einem schwingungsbestimmenden Element und einem Impulsformer (vergl. Bild 2.3-1).

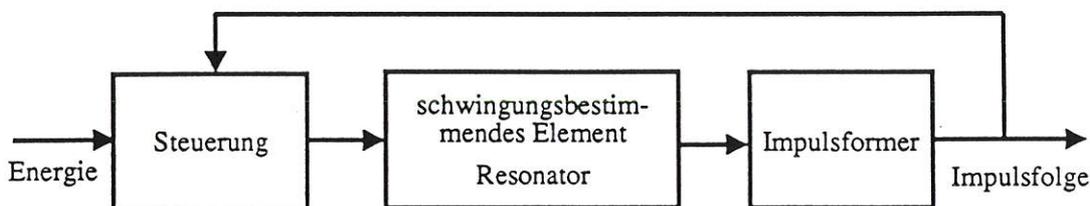


Bild 2.3-1: Blockschaltbild eines Oszillators

Bei mechanischen Oszillatoren ist die Unruhe oder das Pendel das schwingungsbestimmende Element, die Feder die Energiequelle und die Hemmung mit dem Getriebe die Steuerung und Impulsformung.

Bei elektronischen Oszillatoren übernimmt ein RC-, LC-Glied oder ein Quarz die Funktion des schwingungsbestimmenden Elementes (meist Resonator genannt), eine elektronische Schaltung die Steuerung und Impulsformung, und eine Batterie resp. Netzspeisung die Energiequelle.

Atomare Oszillatoren unterscheiden sich von den gewöhnlichen elektronischen nur dadurch, daß das schwingungsbestimmende Element spezielle Eigenschaften von Atomen resp. Molekülen (z. B. Absorption von Licht, Eigenschwingungen beim Übergang von einem Zustand in einen anderen etc.) ausnützt.

Bei Frequenznormalen, wie derartige Taktgeneratoren oft genannt werden, unterscheidet man zwischen primären und sekundären Frequenznormalen. Beide zeichnen sich durch eine hohe Frequenzkonstanz aus.

Ein *primäres Frequenznormal* zeichnet sich dadurch aus, daß der Absolutwert der Frequenz auf Grund physikalischer Zusammenhänge berechnet werden kann und keiner besonderen Einstellung bedarf.

Ein *sekundäres Frequenznormal* weist eine Frequenz innerhalb eines sehr schmalen Fensters auf, der genaue Wert muß aber immer in Bezug auf ein Primärnormal eingestellt werden.

Uhren (mechanische und elektronische) bestehen aus den folgenden Grundelementen (vergl. Bild 2.3-2):

- Frequenzgenerator, Oszillator, Frequenznormal
- Tor, Steuerelement für den Start und den Stop
- Zähler
- Codierung / Anzeige / Datenausgabe

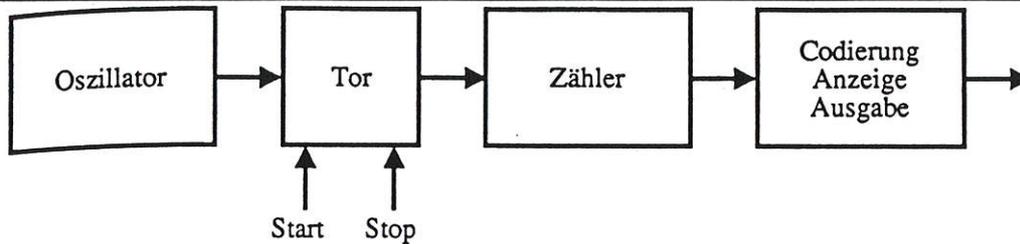


Bild 2.3–2: Blockschaltbild einer Uhr

Oszillatoren und Uhren werden im wesentlichen durch die folgenden vier Größen bestimmt:

- Der *Gang*, resp. die *Frequenzablage* ist die zeitlich konstante Abweichung der Oszillatorfrequenz von ihrem Sollwert.
- Die *Gangänderung*, resp. die *Frequenzstabilität* ist die zeitliche Änderung der Oszillatorfrequenz, sie wird durch Umgebungseinflüsse (Lage, Vibration, Druck, Temperatur, Magnetfelder etc.) beeinflusst. Bei elektronischen Oszillatoren wird zudem unterschieden zwischen:
 - *Kurzzeitstabilität*, diese erfaßt Frequenzschwankungen innerhalb 1 s bis ca. 100 s.
 - *Langzeitstabilität*, oft auch als Alterung bezeichnet, sind Frequenzänderungen innerhalb größeren Zeiträumen (Tage, Monate etc.).
- Der *Stand* einer Uhr gibt die Abweichung ihrer Zeitanzeige vom Sollwert z. B. der Normalzeit (UTC) zu einem bestimmten Zeitpunkt an.

Die Tab. 2.3–1 zeigt eine Zusammenstellung der charakteristischen Größen, wie Resonatortyp, Kurz- und Langzeitstabilität und die hauptsächlichsten Umgebungseinflüsse von verschiedenen Oszillatoren und Uhren [1], [2], [5], [6], [7], [9], [11].

Aus dieser großen, angebotenen Vielfalt an Oszillatoren kann derjenige, welcher einer bestimmten Anwendungen am besten entspricht, ausgewählt werden. Dazu müssen zuerst, der Anwendung entsprechend, die verschiedenen Parameter wie Kurz- und Langzeitstabilität, Umgebungsbedingungen etc. sorgfältig ermittelt werden.

Alle diese elektronischen Frequenznormale arbeiten standardmäßig auf bevorzugten, diskreten Frequenzen, z. B. 32 kHz, 1 MHz, 5 MHz resp. 10 MHz.

Für spezielle Anwendungen können je nach Bedarf Oszillatoren mit anderen Ausgangsfrequenzen hergestellt werden.

2.4 Erzeugung beliebiger Frequenzen

In der Praxis werden meistens andere als die in Kap. 2.3 dargestellten Normalfrequenzen benötigt. Die Verwendung von Synthesegeneratoren ermöglicht eine Frequenzumsetzung auf beliebige Frequenzen. Dabei bleibt im allgemeinen die Stabilität und die Genauigkeit erhalten [3], [9], [10]. Es werden zwei grundsätzlich verschiedene Methoden unterschieden, die direkte Synthese und die indirekte Synthese. Beide Methoden haben eines gemeinsam, ihr Ausgangssignal ist immer eine Kombination von zwei oder mehreren intern erzeugten Signalen.

Die *direkte Synthese* basiert auf der Frequenzvervielfachung, der Frequenzteilung und der Mischung, das Grundprinzip ist in Bild 2.4–1 dargestellt.

Durch die Kombination verschiedener solcher Grundelemente und erneute Mischung läßt sich jede gewünschte Frequenz (variabel oder fest) erzeugen. Da bei der Mischung die Summen – und die Differenzfrequenzen entstehen, müssen immer Filter nachgeschaltet werden. Je feiner die Abstufung, die Einstellgenauigkeit sein soll, um so größer wird der apparative Aufwand. Der Vorteil der direkten Synthese liegt vor allem darin, daß sie es erlaubt, sehr schnell zwischen verschiedenen Frequenzen umzuschalten.

Die direkte Synthese wird meistens angewendet, wenn es sich um ein einfach zu realisierendes Frequenzumsetzverhältnis handelt oder wenn eine kleine Umschaltzeit maßgebend ist.

Art des Normales	Frequenznormal resp. Uhr	Art des Resonators	Kurzzeitstabilität $\Delta f/f$ ¹⁾ (Temp.Bereich Spannungsbe- reich etc.)	Langzeitstabilität $\Delta f/f$ ¹⁾	Umgebungsein- flüsse
Sekundär- normal	mech. Oszillator mech. Uhr	Unruhe, Pendel		$1 \cdot 10^{-5}$ /Tag	Beschleunigung Schock Temp.änderung
	Quarzoszillator	Quarzresonator unkompensiert	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$ /Jahr	Beschleunigung Schock Vibration Temp.änderung
		Quarzresonator Temp.kompensiert	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$ /Jahr	
		Quarzresonator ofenstabilisiert	$1 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-10}$ /Tag $1 \cdot 10^{-8}$ /Jahr	
		Quarzresonator Hochpräzision ofenstabilisiert	$5 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-11}$ /Tag $5 \cdot 10^{-9}$ /Jahr	
Rubidium Atomfrequenz- normal	Rubidiumzelle	$5 \cdot 10^{-12}$ $5 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-11}$ /Monat	starkes magneti- sches Feld Temp.änderung atmosphärischer Druck	
Primär- normal	Caesium- Atomfrequenz- Normal kommerziell	Caesium- Strahlrohr	$1 \cdot 10^{-11}$ $5 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-12}$ auf Lebensdauer (5 bis 10 Jahre)	starkes magneti- sches Feld grosse Temperatur- änderungen
	Caesium- Atomfrequenz- Normal Labormodelle	Caesium- Strahlrohr	$1 \cdot 10^{-13}$ $1 \cdot 10^{-14}$	$2,5 \cdot 10^{-14}$ auf Lebensdauer	
	Wasserstoff Maser	Resonator mit Wasserstoffzelle	$2 \cdot 10^{-12}$ $1 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-13}$	starkes magneti- sches Feld Temperaturände- rungen

¹⁾ Die Kurz- resp. Langzeitstabilität ist als statistische Größe zu verstehen und stellt einen Richtwert dar.

Tabelle 2.3-1: Zusammenstellung der Eigenschaften verschiedener Oszillatoren

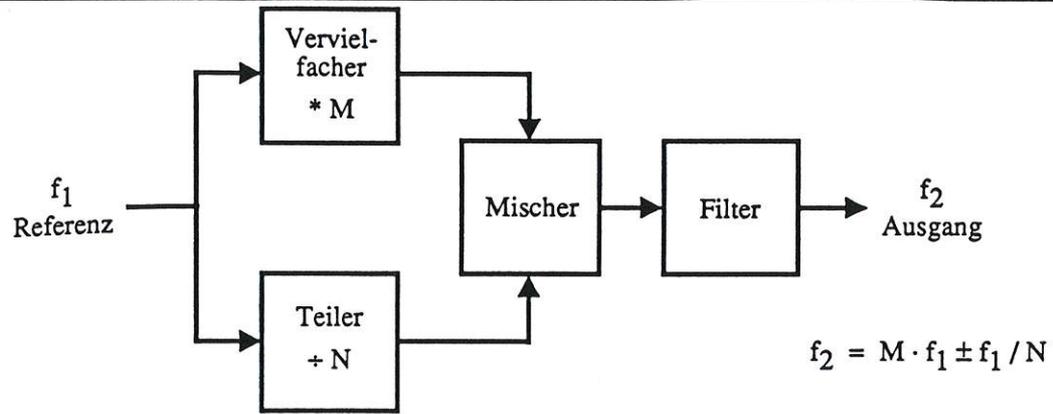


Bild 2.4-1: Grundprinzip der direkten Frequenzsynthese

Die indirekte Synthese baut auf Phasenregelschleifen (PLL, Phase Locked Loops) auf, ihr Grundprinzip zeigt Bild 2.4-2.

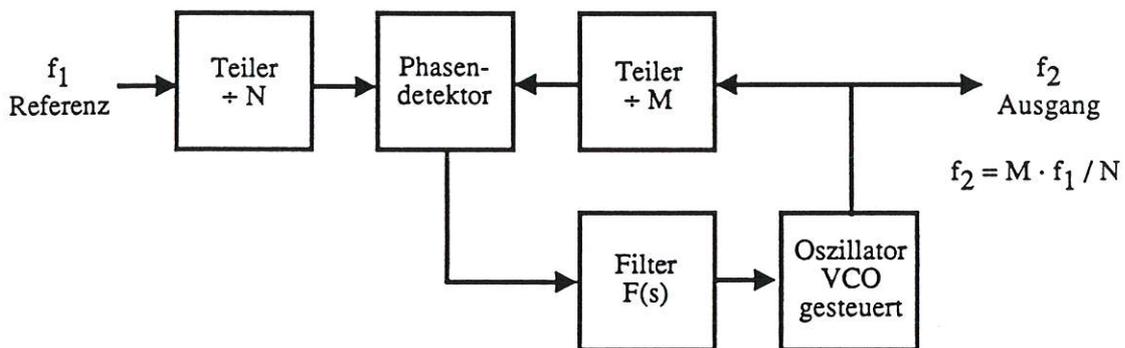


Bild 2.4-2: Grundprinzip der indirekten Frequenzsynthese mit Hilfe von Phasenregelschleifen

Für die Erzeugung von beliebigen Frequenzen werden verschiedene Grundelemente, die oft dekadentmäßig angeordnet sind, kombiniert. Solche Phasenregelkreise werden bis zu hohen Frequenzen als integrierte Schaltung angeboten und erlauben auf einfache Art und Weise eine Frequenz umzusetzen. Durch die Phasenregelschleife wird die Frequenzgenauigkeit gewährleistet, da ein rationales Verhältnis zwischen Ein- und Ausgangsfrequenz besteht. Der Vorteil der indirekten Synthese liegt in ihrer Einfachheit, sie ist aber langsamer als die direkte Synthese, da zuerst jeder beteiligte Regelkreis einschwingen muß. Die Anwendung der indirekten Synthese ist sehr weit verbreitet, sei es für ein festes Frequenzverhältnis oder in Geräten, die jede beliebige Ausgangsfrequenz erzeugen sollen.

8.5 Frequenzmessung und Zeitmessung

Für die Frequenz- und Zeitmessung werden heute weitgehend elektronische Zähler verwendet. Damit ist es möglich, die hohe Genauigkeit der Frequenznormale auszunutzen. Durch geeignete elektronische Schaltungen ist der Meßbereich des digitalen Frequenzzählers sehr erweitert worden. Auf dem Markt sind heute Meßgeräte erhältlich, die Frequenzen bis 110 GHz annähernd mit der Genauigkeit der verwendeten Referenznormale bestimmen können (d. h. 10^{-8} bis 10^{-9}) [8], [11], [12].

Die meisten der angebotenen Geräte sind kombiniert für Frequenz- und Zeitmessung, da dadurch ein großer Teil der elektronischen Schaltung gemeinsam verwendet werden kann.

Ein elektronischer Frequenzzähler umfaßt die in Bild 2.5-1 dargestellten wesentlichen Grundbausteine [3], [9], [13].

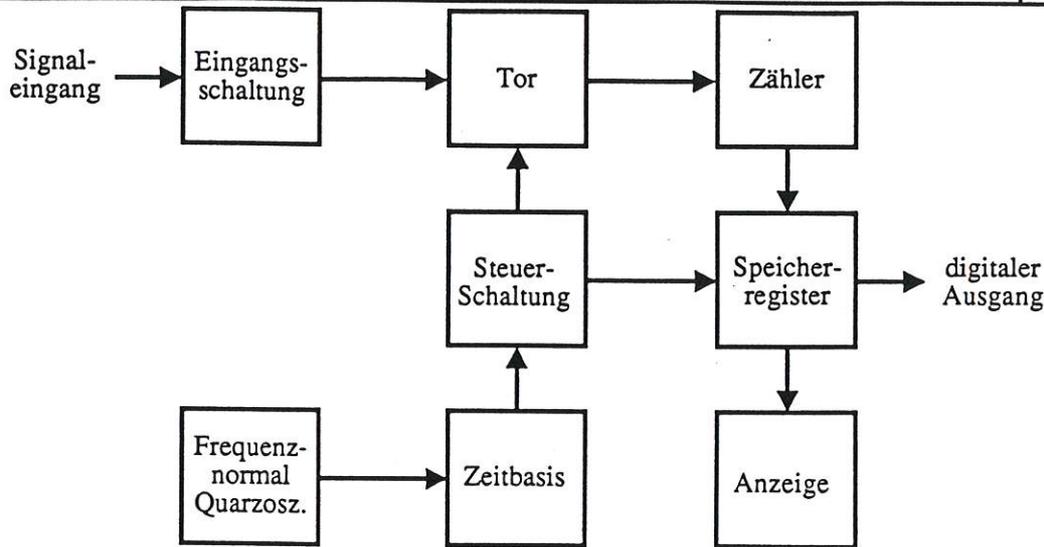


Bild 2.5–1: Blockschaltbild eines digitalen Frequenzzählers

Die *Eingangsschaltung* dient der Signalaufbereitung, sie wandelt ein meist analoges Signal (Sinus, Impuls etc.) in ein digitales, für die Zählerschaltung kompatibles Signal. Sie ist verantwortlich, daß bei einem analogen Signal immer beim gleichen Pegel (meist einstellbar) geschaltet wird und daß bei einem verrauschten Signal keine Mehrfachtriggerung auftritt.

Die Hauptaufgabe der *Torschaltung* ist es, den Zählvorgang zu starten und zu stoppen. Sie wird von einer *Steuerschaltung* kontrolliert und bestimmt die Meßzeit.

Der *digitale Zähler* besteht aus einem Dezimalzähler und ermittelt die während einer vorgegebenen Zeit eintreffenden Impulse. Daraus wird die Frequenz errechnet und über einen *Zwischenspeicher* an die *Anzeigeeinheit* und die *digitalen Ausgabe* weiter gegeben. Der Aufbau des Zählers bestimmt, wie viele Dezimalstellen maximal erfaßt werden können und trägt seinen Teil zur Meßgenauigkeit bei.

Die *Zeitbasis* kontrolliert alle Zeitabläufe im Frequenzzähler; sie bestimmt die Meßzeit (z. B. 1 ms, 1 s, 100 s etc.). Ihre Genauigkeit hängt ausschließlich davon ab, was für ein Frequenznormal verwendet wird. Für die meisten Frequenzzähler werden verschiedene Quarzoszillatoren mit unterschiedlichen Ausführungen und Genauigkeiten (z. B. temperaturkompensierte oder ofenstabilisierte Quarzoszillatoren siehe C.2.3) angeboten. So kann die Ausführung der Anwendung entsprechend optimal ausgewählt werden.

Die Zeitbasis mit dem zugehörigen Frequenznormal bestimmt die Genauigkeit eines Frequenzzählers. Aus diesem Grund bieten die meisten Frequenzzähler zusätzlich einen Eingang für eine externe Referenzfrequenz (5, 10 MHz) an, so daß je nach Bedarf der interne Quarzoszillator durch einen externen höherer Güte ersetzt werden kann.

Die *Steuerschaltung* übernimmt die Kontrolle über alle Abläufe im Frequenzzähler. Sie wird heutzutage meistens mit einem Mikroprozessor realisiert und ermöglicht dadurch noch viele nützliche Zusatzfunktionen (z. B. Mittelwertbildung, Frequenzoffset, Verhältnis etc.).

Die *direkte Frequenzmessung von tiefen Frequenzen* (unterhalb 1 MHz; 10 MHz) wird problematisch, da lange Meßzeiten notwendig werden um eine genügende Genauigkeit zu erreichen. Deshalb verwendet man in diesem Bereich vorteilhafter die *Periodenmessung* und rechnet dann die entsprechende Frequenz aus. Moderne Frequenzzähler schalten je nach Meßbereich automatisch auf die Periodenmessung mit nachfolgender Umrechnung, meist als Reziprokmessung bezeichnet, um oder sind sogar in der Lage, im gesamten Arbeitsbereich eine Reziprokmessung auszuführen. Diese Methode erlaubt bei minimaler Meßzeit eine maximale Meßgenauigkeit zu erreichen. So sind Frequenzzähler erhältlich, die bei 1 s Meßzeit über den gesamten Arbeitsbereich bis 1500 MHz eine relative Auflösung von $2 \cdot 10^{-9}$ ermöglichen [8], [11], [13].

Für die *relative Zeitmessung und Zeitintervallmessung* wird die Grundsaltung um einen zweiten Eingang erweitert Bild 2.5–2.

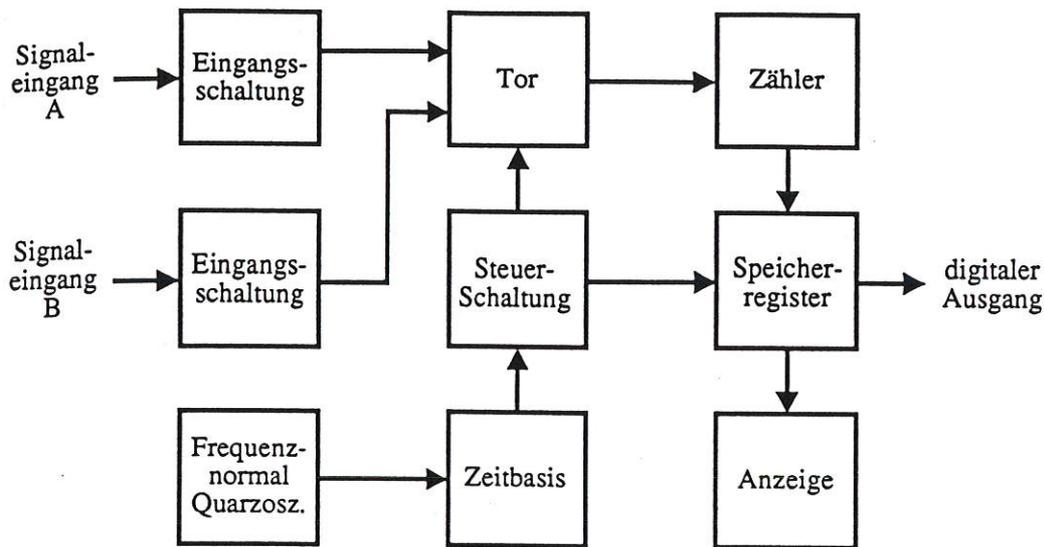


Bild 2.5–2: Blocksaltbild eines digitalen Universalzählers für Zeitintervallmessung

Diese Erweiterung erlaubt relative Zeitmessungen zwischen den Eingängen A und B durchzuführen und Zeitintervalle, Impulsbreiten etc. mit hoher Genauigkeit zu bestimmen.

Aus der Kombination von Frequenz- und Zeitmessung sind die *Universalzähler* entstanden, die eine Vielzahl von Funktionen ermöglichen, so z. B. die Messung von:

- Frequenz
- Frequenzverhältnis
- Frequenzdifferenz
- Periodendauer
- Drehzahl
- Impulsbreite
- Zeitintervall
- Phase A zu Phase B
- etc.

Für einige der genannten Größen werden zusätzlich noch Mittelwertfunktionen angeboten, die die Meßgenauigkeit wesentlich erhöhen können.

8.6 Probleme bei der Frequenz- und Zeitmessung

Bei der Frequenz- und Zeitmessung treten verschiedene, mögliche Fehlerquellen auf, die eine Messung störend beeinflussen können. Zum einen liegt ihre Ursache im *Meßgerät*, sind also *systembedingt*, zum andern kann aber auch das zu *messende Signal* durch ungünstige Eigenschaften eine Messung beeinträchtigen. Ist man sich dieser Fehlerquellen bewußt, so kann ihr Einfluß durch geeignete Maßnahmen wesentlich eingeschränkt werden [3], [9], [13].

Systembedingte Fehler sind bei der Frequenz- und Zeitmessung vor allem in der Eingangsschaltung und in der Zeitbasis zu suchen.

- Die *Eingangsschaltung* wandelt ein meist analoges, oft verrauschtes Signal in ein digitales Signal um. Von ihr wird eine hohe Amplitudenstabilität und eine Unempfindlichkeit auf überlagertes

Rauschen erwartet. Der dadurch entstehende Fehler wird meist als *Triggerfehler* bezeichnet. Der Benutzer kann diesen Einfluß reduzieren, indem er dem Universalzähler ein möglichst unverraushtes Signal mit ausreichender Amplitude anbietet und die *Triggerschwelle* möglichst in die Signalmitte legt.

- Bei der *Zeitbasis* beeinträchtigen die Kurz- und Langzeitstabilität und die absolute Einstellgenauigkeit des verwendeten Frequenznormales die Messung wesentlich. Der Benutzer kann durch die Auswahl eines geeigneten Frequenznormales (meist als Option angeboten) und durch die Benutzung von größeren Meßzeiten die Genauigkeit beeinflussen. Es ist aber zu beachten, daß jeder Quarzoszillator altert, d.h. seine Frequenz ändert, und damit bei sehr langen Meßzeiten (z. B. durch Mittelwertbildung) die Genauigkeit wiederum beeinträchtigt werden kann. Die natürliche Alterung bringt es mit sich, daß die *Frequenz des Taktoszillators periodisch überprüft und nachgestellt* werden muß.

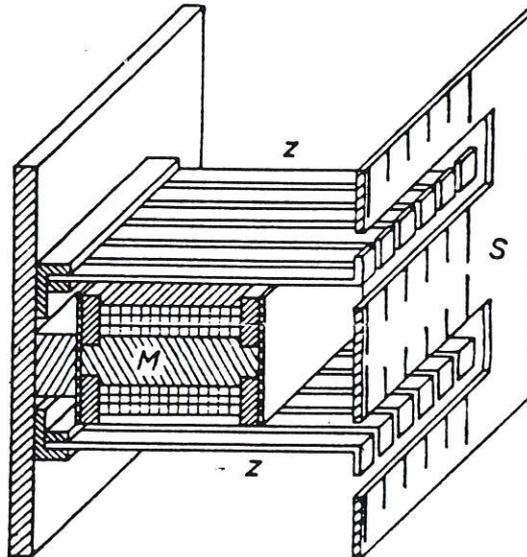
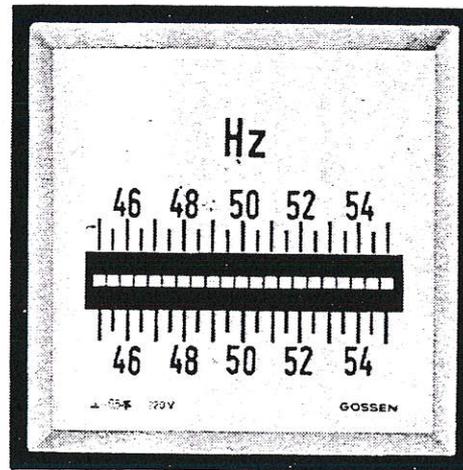
Das zu *messende Signal* beinhaltet selber einige nicht zu unterschätzende Fehlerquellen. So beeinträchtigen z. B. das Amplitudenrauschen, die Kurz- und Langzeitstabilität des betroffenen Oszillators und Störungen auf dem Signal eine Messung beträchtlich. Diesbezüglich gilt es geeignete Signalerfassungssysteme und Signalwandler (mit genügender Amplitude, kleinem Rauschen etc.) zu verwenden und eine den Signaleigenschaften angepaßte Meßzeit zu wählen. Im allgemeinen läßt sich durch eine Mittelwertbildung bei der Frequenz- und Zeitmessung die Meßgenauigkeit wesentlich erhöhen. Es ist aber unbedingt zu beachten, daß am Schluß immer die *Unsicherheit der Zeitbasis* übrig bleibt. Sie läßt sich *durch keine Mittelwertbildung eliminieren!*

0 FREQUENZMESSUNG / MÖGLICHKEITEN

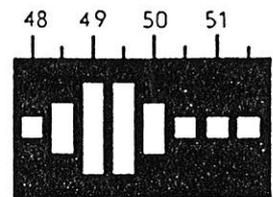
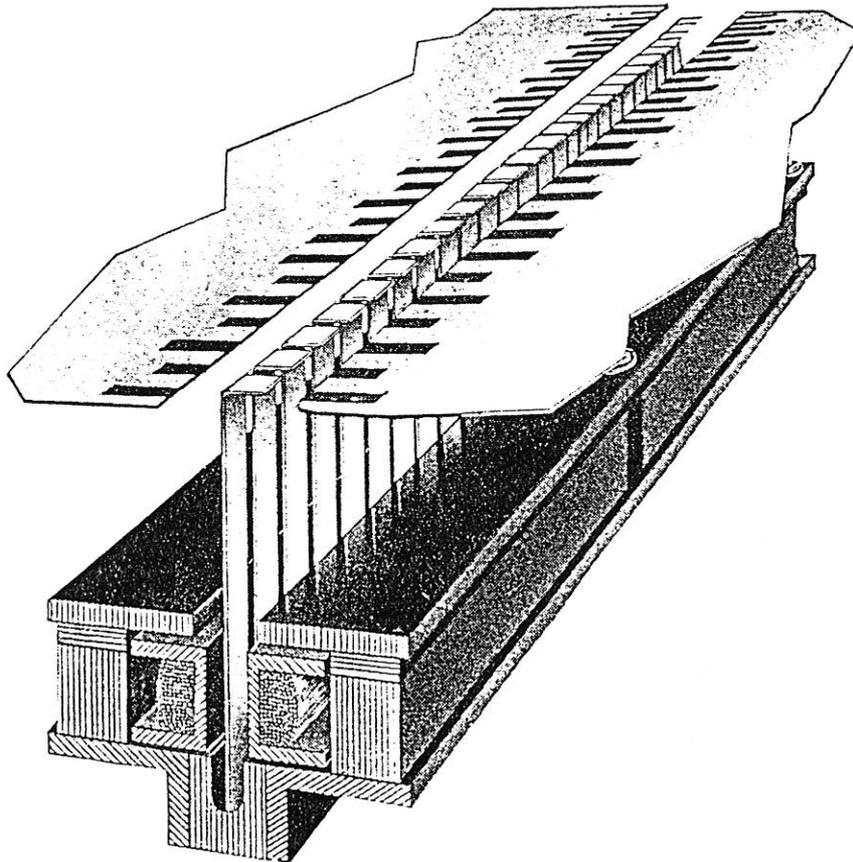
- ZUNGENFREQUENZMESSER
- LIEN - ROBINSON - MESSBÄNDE
- OSZILLOSKOP
- DIGITALE FREQUENZMESSUNG

8.7 Frequenzmesser

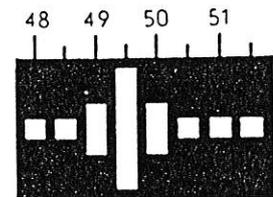
Vor den Polen eines Elektromagnets M sind zwei Reihen von Stahlzungen Z angeordnet. Weiter rechts stehende Zungen haben eine etwas höhere Eigenschwingungszahl als die benachbarten linken Zungen. Werden die Windungen von M von Wechselstrom durchflossen, so kommt jene Stahlzunge in Schwingung, deren Eigenschwingungszahl der Frequenz des Wechselstromes entspricht. Das umgebogene freie Zungenende erscheint dadurch an der Skalenplatte S als kurzes Band.



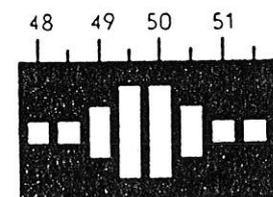
Vibrations-Meßwerk nach Hartmann-Kempf



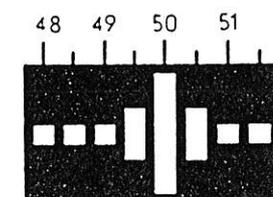
49,25



49,50



49,75



50,00

Das Vibrations-Meßwerk dient zur Frequenzbestimmung des Wechselstromes. Eine Anzahl Stahlzungen ist auf bestimmte Eigenschwingungszahlen abgestimmt und in einer Reihe im Kraftfeld einer langgestreckten Spule angeordnet. Fließt Wechselstrom durch die Wicklung, so wird durch das Wechselfeld diejenige Zunge in Schwingung versetzt, deren Eigenschwingungszahl gleich der Polwechselzahl, das heißt der doppelten Frequenz des Wechselstromes ist.

Die Zungen-Abstimmung wird so gewählt, daß außer der in Vollresonanz stehenden Zunge noch die benachbarten Zungen mit kleinerem Ausschlag mitschwingen. So entsteht ein kennzeichnendes Schwingungsbild, das auch Zwischenwerte zu schätzen gestattet.

In Verbindung mit einem kleinen Wechselstrom-Induktor werden die Meßwerte zur Drehzahl-Fernmessung benutzt.

An Stelle der elektromagnetischen Erregung kann eine mechanische Erregung durch Erschütterungen treten. Durch Anhalten eines Zungenkammes (ohne Spule) an eine Maschine kann z. B. die Drehzahl einer umlaufenden Welle durch Mitschwingen bestimmter Zungen angezeigt werden (Vibrations-Drehzahlmesser).

Zeigerfrequenzmesser

Allgemeines

Die Zeigerfrequenzmesser sind direktanzeigende Frequenzmesser mit Drehspul-Meßwerk. Sie arbeiten nach dem Prinzip der Kondensatorumladung. Zur Anzeige kommt hier nur ein kleiner Bereich um den gewählten Frequenzhauptwert. Der nicht interessierende Frequenzbereich wird elektrisch unterdrückt.

Genauigkeit

Klassen 0,2; 0,5; 1 oder 1,5 je nach Frequenz-Meßbereich

Skalenverlauf

praktisch linear

Gebrauchslage

Wir liefern für senkrechte Gebrauchslage, wenn bei Ihrer Bestellung im 3. Block der Bestell-Nummer nichts anderes angegeben ist (Seite E 11/8).

Nennspannung

je nach Meßbereich und Typ zwischen 100 und 380 V

Spannungseinfluß

bei Spannungsschwankungen bis zu $\pm 20\%$ ist der zusätzliche Anzeigefehler kleiner als der halbe Klassenfehler.

Eigenverbrauch

abhängig von der Nennspannung ca. 1,1 VA bei 100 V
 ca. 2,2 VA bei 220 V
 ca. 3,5 VA bei 380 V

bei Kreisskalen-Meßgeräten ca. 5 VA

Oberwelleneinfluß

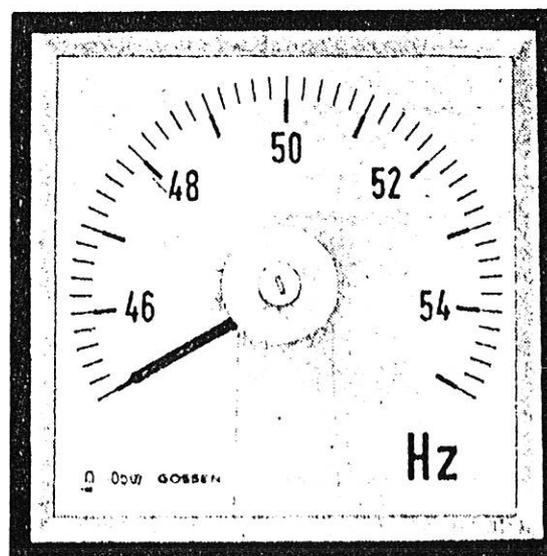
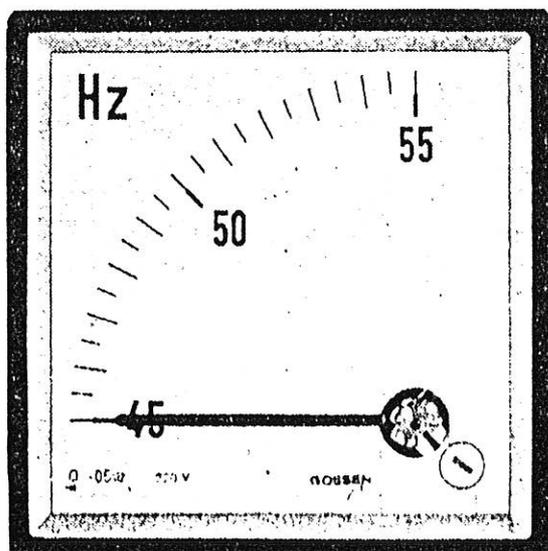
Bis zu einem Klirrfaktor von 30 % (ohne zusätzliche Nulldurchgänge) bleibt der zusätzliche Fehler innerhalb der Klassengenauigkeit.

Temperatureinfluß

Der zusätzliche Temperaturfehler pro 10 K ist innerhalb des Temperaturbereiches von $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ kleiner als die halbe Klassengenauigkeit.

Einbau

Bei einigen Zeigerfrequenzmessern, die besonders gekennzeichnet sind, muß der Einbau in ferromagnetisches Material bei der Fertigung berücksichtigt werden. Deshalb bitten wir, bei der Bestellung die Dicke des ferromagnetischen Materials anzugeben.



8.8 MESSBRÜCKE NACH WIEN-ROBINSON

SIEHE S. 233

Wien-Brücke (Wien bridge). Die W. ist eine Wechselstrommeßbrücke mit vier Brückenzweigen. Die beiden parallel zur Speisespannungsquelle liegenden Brückenelemente sind reine Wirkwiderstände, die beiden anderen Zweige werden aus einer Kombination von Widerständen und Kondensatoren (oder Spulen) gebildet. Das Brückengleichgewicht ist abhängig von der Frequenz und den Werten der Bauteile. Die W. kann zur Kapazitäts- oder Induktivitätsmessung benutzt werden: 1. Wien-Kapazitäts-Meßbrücke (Bild a). Ist C_x der gesuchte Kapazitätswert, gilt für den Nullabgleich:

$$C_x = C_4 \left(\frac{R_2}{R_1} - \frac{R_4}{R_3} \right) \text{ und } C_3 C_4 = \frac{1}{\omega^2 \cdot R_3 \cdot R_4}.$$

Häufige Anwendungsfälle sind Leitwert- und Kapazitätsmessungen bei Frequenzen um 1500 Hz. Ein Sonderfall der W. ist die Wien-Robinson-Brücke. 2. Wien-Induktivitätsmeßbrücke (Bild b). Im wesentlichen werden die Kondensatoren durch Spulen ersetzt. Für den Abgleich gilt:

$$L_x = L_4 \left[\frac{R_1 (R_L + R_3)}{R_2 \cdot R_3 - R_1 \cdot R_4} \right] \text{ und}$$

$$\omega^2 \cdot L_x \cdot L_4 = R_4 (R_L + R_3) - R_L \cdot R_3 \frac{R_2}{R_1}.$$

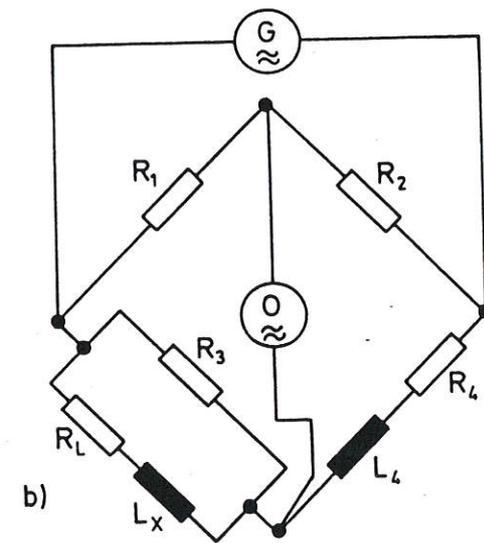
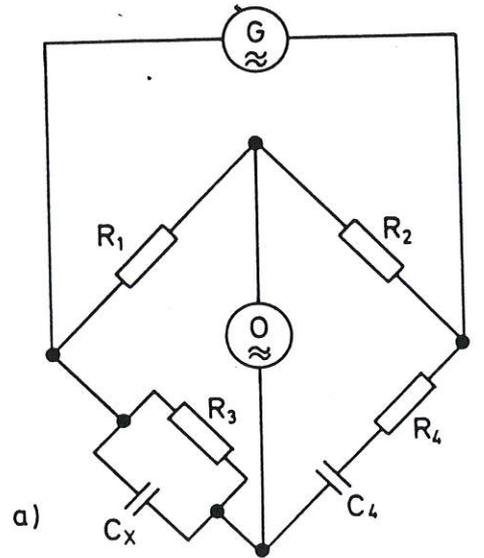
In vielen Fällen wird wegen der komplizierten Abgleichbedingungen die Induktivitäts-W. mit der Maxwell-Brücke zur Maxwell-Wien-Brücke zusammengefaßt. [12]. Fl

Wien-Robinson-Brücke (Wien-Robinson bridge) (→ Bild Wien-Brücke a). Die W. entspricht dem Aufbau der Wien-Brücke in der Ausführung als Kapazitätsbrücke. Bezüglich der Werte der eingesetzten Bauelemente gelten jedoch die Zusatzbedingungen:

$$R_1 = 2R_2; R_3 = R_4 = R \text{ und } C_x = C_3 = C_4.$$

1. Bei eingehaltenen Bedingungen kann die W. z.B. als Frequenzmeßbrücke im Frequenzbereich bis etwa 100 kHz verwendet werden. Für die Resonanzfrequenz

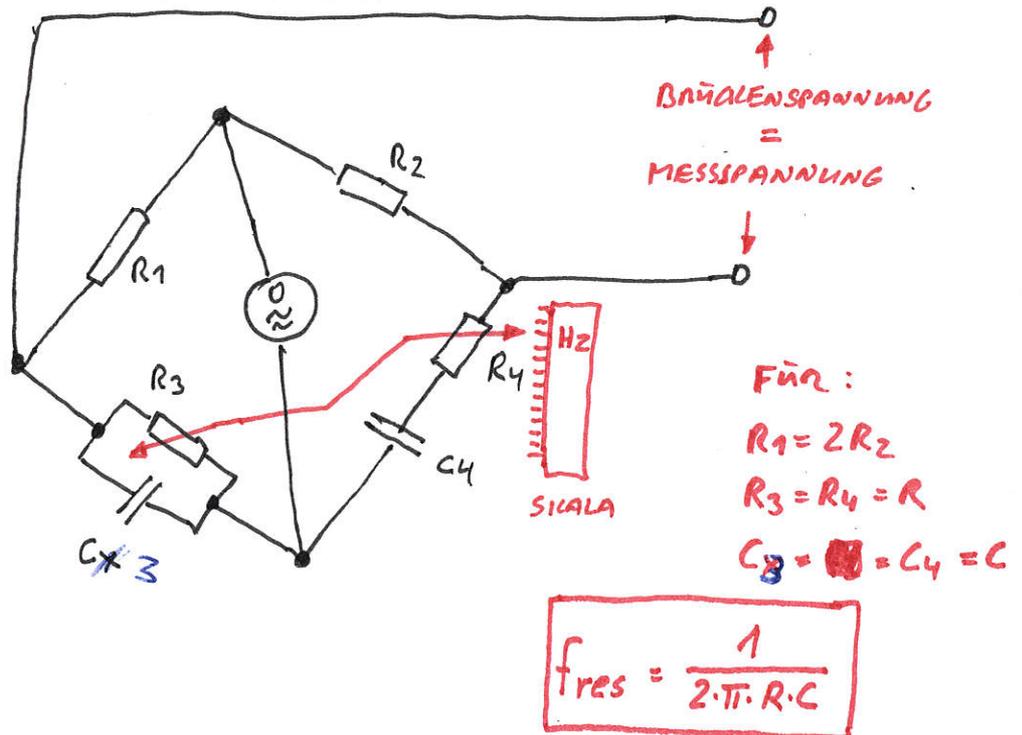
$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C}$$



Wien-Brücke

verschwindet die Spannung im Meßdiagonalzweig und am Anzeiginstrument erhält man eine Nullanzeige. Setzt man für R_3 und R_4 in ihren Werten veränderbare Widerstände ein (\rightarrow Wien-Brücke, Bild a) und verkoppelt sie mechanisch, so daß bei Betätigung des einen sich der andere gleichermaßen verändert (z.B. in der Ausführung als Tandempotentiometer), läßt sich ein größerer Frequenzbereich überstreichen und ausmessen. Brückenspeispannung ist die Meßspannung, deren Frequenz bestimmt werden soll. Die Skala des veränderbaren Widerstandes wird bei dieser Anwendung in Werten der Frequenz kalibriert. Einen vollkommenen Abgleich auf Null erreicht man dann, wenn die Meßspannung rein sinusförmigen Verlauf ohne Oberschwingungen besitzt. 2. Bei überschwingungshaltiger Meßspannung läßt sich die W. als Klirrfaktormeßbrücke verwenden. Dazu erfolgt ein Abgleich auf die Grundschwingung; in der Meßdiagonalen liegt ein Effektivwertmesser. Bezieht man den Wert in der Meßdiagonalen auf den gesamten Effektivwert der überschwingungshaltigen Meßspannung, erhält man sofort deren Klirrfaktor. Die Skala des Effektivwertmessers ist in Prozentwerten des Klirrfaktors kalibriert. 3. Durch eine geringfügige Änderung ΔR des Widerstandswertes von R_2 – so daß z.B. gilt: $R_1 \neq 2 R_2$ – und einem nachgeschalteten Verstärker, erhält man aus der W. den Wien-Robinson-Oszillator. [12], [13]. F1

EIN ABGLEICH AUF NULL NUR MÖGLICH, WENN DIE MEßSPANNUNG EINE REINE SINUSSPANNUNG OHNE OBERWELLEN IST.



RC-Generator (Wien-Robinson-Generator/Wiengenerator)

Bei einem RC-Generator sind Widerstände (R) und Kapazitäten (C) frequenzbestimmend. Die Wirkungsweise eines RC-Generators beruht auf der Tatsache, daß er nur dann schwingt, wenn die Phasenbedingung $\varphi = 0$ zwischen Eingangs- und Rückkopplungssignal eingehalten wird.

Eine zur Erzeugung von Tonfrequenz-Wechselspannungen besonders gut geeignete Schaltungsart ist der Wien-Robinson-Generator. Sein Hauptmerkmal ist die Wien-Robinson-Brücke, eine Brückenschaltung aus Widerständen und Kapazitäten. Dabei liegt in einem Brückenarm (a—c) eine Reihenschaltung, in einem anderen (b—c) eine Parallelschaltung von C und R . Die Phasenbedingung $\varphi = 0$ wird beim Wien-Robinson-Generator durch zwei Schaltungskennzeichen bestimmt:

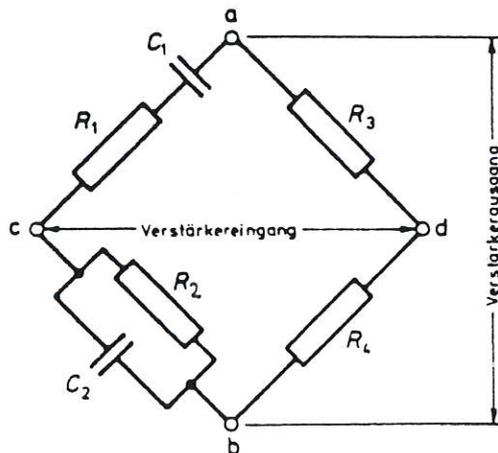


Abb. 4.96 — Wien-Robinson-Brücke

- Zwei hintereinandergeschaltete Transistorstufen in Emitter-schaltung, von denen jede eine Phasenverschiebung von 180° verursacht, ergeben zwischen Eingangs- und Ausgangswechselspannung eine Phasenverschiebung von $\varphi = 360^\circ \cong 0^\circ$.
- Im Brückenarm c—d tritt gegenüber der Wechselspannung im Arm a—b nur bei einer ganz bestimmten Frequenz keine Phasenverschiebung auf. Die Frequenz, bei der zwischen U_{a-b} und U_{c-d} keine Phasenverschiebung vorhanden ist, läßt sich anhand der Formel

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}} \quad \text{bestimmen.}$$

Diese Frequenz wird auch als Resonanzfrequenz bezeichnet; dabei sollen $R_1 = R_2$ und $C_1 = C_2$ sein.

Die Widerstände R_3 und R_4 dürfen übrigens nicht vollständig gleich sein, da sonst bei abgeglichenen Brücke die Spannung im Arm c—d Null und somit keine Rückkopplung wirksam wäre.

6 Frequenz- und Zeitmessung Frequency and time measurement

6.1 Digitale Frequenzmessung Digital frequency measurement

Das einfachste Verfahren zur digitalen Frequenzmessung ist das Abzählen der Schwingungen des Signals während einer bekannten Torzeit (Bild 1). Öffnet man das Tor z.B. für eine Sekunde und zählt während dieser Zeit alle Nulldurchgänge mit positiver Steigung, so entspricht der Zählerstand nach dieser Sekunde der Frequenz des Eingangssignals in Hz. Damit werden die wesentlichen Eigenschaften dieses Zählertyps verständlich:

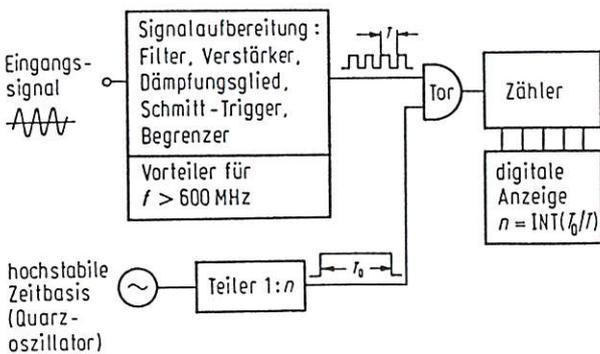


Bild 1. Direkte Frequenzmessung durch Zählen der gleichsinnigen Nulldurchgänge des Eingangssignals innerhalb einer bekannten Torzeit T_0

- Angezeigt wird der Mittelwert \bar{f} der Signalfrequenz innerhalb der Torzeit T_0 :

$$\bar{f} = T_0 / \int_0^{T_0} T(t) dt.$$

- Die Inkohärenz zwischen Zeitbasis und Signal bewirkt eine Meßunsicherheit von ± 1 in der letzten Stelle des Zählerstands.
- Mit steigender Meßgenauigkeit (mit steigender Anzahl der angezeigten Stellen) nimmt die Torzeit linear zu.
- Die Genauigkeit des Meßwerts hängt ab vom Absolutwert der Frequenz der Zeitbasis.

Da handelsübliche Quarzoszillatoren (in der Regel 10 MHz) eine Alterungsrate unter 10^{-8} /Monat erreichen, ist die Frequenz diejenige Meßgröße der Hochfrequenztechnik, die mit der größten absoluten Genauigkeit bestimmt werden kann.

Die Meßeingänge der Zähler nach dem direkten Abzählverfahren sind in der Regel breitbandig (z. B. 0 bis 10 MHz mit einer Eingangsimpedanz von $1 \text{ M}\Omega/35 \text{ pF}$ oder 0 bis 1,5 GHz mit 50Ω Eingangsimpedanz). Damit ist dem sinusförmigen Eingangssignal stets breitbandiges Rauschen überlagert. Um dadurch bedingte Fehlmessungen zu vermeiden, muß die Hysterese des Schmitt-Triggers im Zähler wesentlich größer sein als die doppelte Amplitude der mittleren Rauschspannung (Bild 2). Unvermeidliche Triggerfehler einzelner Flanken werden durch die

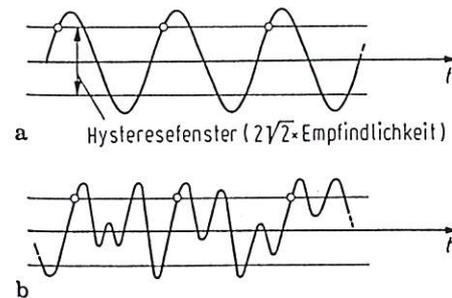


Bild 2. Zur Zählweise des Frequenzzählers. Jeder Punkt entspricht einer Erhöhung des Zählerstandes um 1. a) sinförmiges Eingangssignal; b) gestörtes Eingangssignal.

Vielzahl der gezählten Flanken herausgemittelt. Aus diesem Grund liegen die Eingangsempfindlichkeiten breitbandiger Zähler bei 25 bis 50 mV für 10 MHz/ $1 \text{ M}\Omega$ und 10 bis 25 mV für 1,5 GHz/ 50Ω . Sollen Signale mit kleinerer Amplitude gemessen werden, muß ein schmalbandiger Verstärker vorgeschaltet werden.

Reziproke Zähler. Nachteilig beim direkten Zählverfahren sind die sich ergebenden langen Torzeiten, wenn niedrige Frequenzen mit großer Auflösung gemessen werden sollen. Der Abgleich eines Oszillators wird zeitraubend, wenn die Torzeit eine Sekunde oder mehr beträgt und nach jeder Verstellung ein vollständiger Meßzyklus abgewartet werden muß. Dieser Nachteil entfällt bei Frequenzzählern, die die Periodendauer des Signals messen und die daraus berechnete momentane Frequenz anzeigen (reziproke Zähler). Zudem ist der Quantisierungsfehler bei diesem Verfahren konstant, was bei niedrigen Frequenzen (unterhalb der Frequenz der Zeitbasis), eine bedeutende Genauigkeitssteigerung bewirkt.

Die Ermittlung der Momentanfrequenz aus der Periodendauer ermöglicht die Messung von Frequenzprofilen, d. h. die Darstellung der momentanen Frequenz über der Zeit, z. B. das Einschwingen eines Oszillators beim Einschalten bzw. beim Pulsbetrieb oder die Frequenzlinearität eines Wobbelgenerators. Zur analogen Anzeige der Frequenzänderung wird bei solchen Messungen ein schneller Digital-Analog-Wandler benötigt. Häufig ist es ausreichend (z. B. für die langsame automatische Frequenznachregelung), nur wenige Stellen der Frequenzanzeige zu wandeln.

Überlagerungsverfahren. Die Obergrenze des direkten Zählverfahrens ist gegeben durch die höchste Schaltfrequenz der benutzten digitalen Schaltkreise. Signale mit höherer Frequenz werden in eine niedrigere Frequenz umgesetzt und dann gemessen. Beim Überlagerungsverfahren wird das Eingangssignal mit einem Überlagerungsozillator (L.O.) bekannter Frequenz herabgemischt, gefiltert und dann konventionell mit einem Zähler gemessen (Bild 3). Automatische Mikrowellenzähler nach diesem Prinzip erzeugen die Frequenz des Überlagerungsozillators durch Vervielfachung der Frequenz der Zeitbasis. Die Messung beginnt mit einem Suchvorgang: Die Frequenz des L.O. (z. B. 500 MHz)

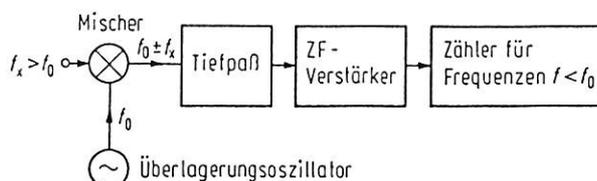


Bild 3. Frequenzzähler nach dem Überlagerungsverfahren

wird so lange vervielfacht, bis bei $n \cdot 500$ MHz ein Signal im ZF-Bereich detektiert wird. Dann rastet der L.O. in dieser Stellung ein und die Frequenz des ZF-Signals wird kontinuierlich gemessen, umgerechnet und angezeigt. Sind mehrere Spektrallinien am Eingang vorhanden (z. B. bei stark oberwellenhaltigen Signalen), kann es passieren, daß der Zähler in unerwünschten Frequenzbereichen einrastet. Zur Vermeidung dieses Problems und um die Meßzeit zu verkürzen, ist bei einigen Zählern der Frequenzbereich, in dem der Suchvorgang abläuft, voreinstellbar.

Transfer-Oszillator-Verfahren. Während das Kernstück des oben beschriebenen Heterodyne-Converters das schaltbare Filter ist, mit dem die Oberwellen des festen L.O. ausgesucht werden, wird beim Transfer-Oszillator-Verfahren ein spannungsgesteuerter oberwellenreicher Oszillator (VCO) als L.O. eingesetzt, dessen Frequenz so lange kontinuierlich verändert wird, bis das Eingangssignal durch die Grundwelle bzw. eine Harmonische davon auf eine feste Zwischenfrequenz umgesetzt ist. Nach Abschluß dieses Suchlaufs rastet der VCO ein (phase lock) und die Grundwelle des VCO wird gemessen und entsprechend der Harmonischenzahl n und der festen ZF umgerechnet und angezeigt.

Harmonischenmischung. Ein drittes Verfahren ist der Harmonic-Heterodyne-Converter, bei dem die Frequenz des L.O. stufig verändert wird (Synthesizer), bis ein Signal im ZF-Bereich erscheint. Die Frequenz dieses Signals wird dann konventionell gemessen und entsprechend der Stellung des Synthesizers und der Harmonischenzahl n umgerechnet.

Typische Werte für Zähler nach dem oben beschriebenen Verfahren sind:

Frequenzbereich: 0 bis 110 GHz.

Eingangsempfindlichkeit: -20 bis -35 dBm.

Zulässige AM des Signals: 50% bis 95%, wo bei die Eingangsempfindlichkeit jedoch nicht unterschritten werden darf.

Zulässige FM des Signals: 1 bis 50 MHz.

Maximalpegel eines Störsignals: -2 bis -30 dBc (dBc bedeutet: auf den Pegel des Trägers bezogen).

Auflösung in der Anzeige: bis zu 10^{-11} .

Absolute Meßgenauigkeit: Je nach Art und Alter des Quarzes in der Zeitbasis bis zu 10^{-8} .

6.2 Digitale Zeitmessung

Digital time measurement

Zur Messung eines Zeitintervalls werden die Impulse eines stabilen Zeitbasis-Oszillators, die in den Bereich dieses Intervalls fallen, gezählt. Damit ergibt sich als Grundauflösung (Zähler-

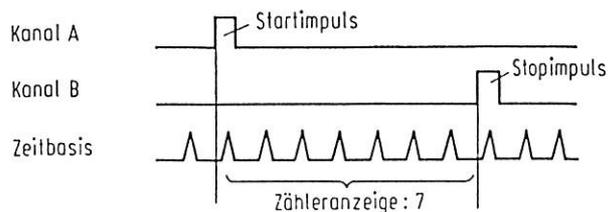


Bild 4. Zeitintervallmessung durch Zählen der Impulse eines Zeitbasisgenerators

stand = 1) 100 ns für eine 10-MHz-Zeitbasis und 10 ns für eine 100-MHz-Zeitbasis. Es kann einkanalig gemessen werden: z. B. vom ersten Überschreiten der Triggerschwelle in Kanal A bis zum darauffolgenden Unterschreiten der eingestellten Triggerschwelle durch das zu messende Signal (Periodendauer-Messung bei sin-Signalen) oder zweikanalig: das Zeitintervall von der ersten positiven Flanke an Kanal A bis zur nächsten positiven Flanke an Kanal B (Bild 4) (Messung der Phasenverschiebung bei sin-Signalen der gleichen Frequenz).

Meßfehler entstehen durch die digitale Zählweise (\pm Grundauflösung), durch die Ungenauigkeit der Zeitbasis, durch die Triggerschwelle (Rauschen oder Verzerrungen auf dem Signal) und durch Ungleichheit der Kanäle (Reflexionsfaktor oder Signallaufzeit unterschiedlich). Bei periodischen Signalen kann der Fehler aufgrund der digitalen Zählweise (± 1 bit) verringert werden durch Messung über n Zeitintervalle. Sofern n Messungen durchgeführt werden und ihr Mittelwert angezeigt wird, verbessert sich die Auflösung nur entsprechend $1/\sqrt{n}$, also z. B. auf 1 ps für 10 ns Grundauflösung und $n = 10^8$. Die Mittelwertbildung verringert außerdem Fehler durch Rauschen oder Jitter.

Bei Einzelmessungen kann die Grundauflösung verbessert werden auf z. B. 20 ps durch Messen der Zeitdifferenz zwischen dem letzten Impuls der Zeitbasis und dem Ende des Meßintervalls (Voraussetzung: synchroner Start der Zeitbasis mit dem Meßintervall): Analoges Verfahren durch Kondensatoraufladung; digitales Verfahren analog zum Nonius an einer Schublehre mit zwei in der Frequenz versetzten Zeitbasissignalen.

6.3 Analoge Frequenzmessung

Analog frequency measurement

Frequenzmessung mit dem Oszilloskop s. I 1.6.

Frequenz-Spannungs-Wandler. a) Wegen $I = j\omega C U$ ergibt ein Signal mit konstanter Spannung U einen Kondensatorstrom I , dessen Amplitude proportional zur Frequenz ansteigt. b) Wenn jeder (gleichsinnige) Nulldurchgang des Eingangssignals einen kurzen, stets gleichgeformten Impuls auslöst, ergibt sich eine Pulsfolge, deren Gleichspannungsanteil proportional zur Frequenz ansteigt.

Interferenzverfahren. Das Eingangssignal wird mit einem Signal bekannter Frequenz (z. B. Synthesizer) verglichen und der Vergleichsgenerator wird auf die gleiche Frequenz nachgestimmt; z. B. in der Form, daß beide Signale auf einen Mischer gegeben werden und am Mischerauszgang die Differenzfrequenz ausgewertet wird. Bei Frequenzgleichheit ist das Ausgangssignal des Mixers eine Gleichspannung (Kontrolle mit dem Oszilloskop; beat note) bzw. in der Nähe der Frequenzgleichheit ergibt sich ein niederfrequentes Signal (Pfeifton bei Kontrolle mit dem Kopfhörer).

Resonanzverfahren. Frequenzmessung durch Messen der Wellenlänge a) mit Leitungsresonatoren s. I 8.5; b) mit einer Schlitzmeßleitung s. I 4.6. Zur Umrechnung Wellenlänge λ in Frequenz $f = v_p / \lambda$ muß die Phasengeschwindigkeit v_p der benutzten Leitung bekannt sein.

Durch lose Kopplung des Eingangssignals an einen Resonator hoher Güte, dessen Resonanzfrequenz kontinuierlich (mechanisch oder elektrisch) verändert werden kann, läßt sich die Frequenz messen, wenn vorher der Einstellbereich des Resonators in Frequenzen geeicht wurde (Wellenmesser, wave-meter). Es werden Resonanzkreise mit diskreten Elementen, Leitungsresonatoren und Hohlraumresonatoren benutzt, meist in einer Schaltung entsprechend Bild I 8.10, lose angekoppelt an eine durchgehende Leitung (dip-meter, Absorptionsfrequenzmesser), s. I 8.5. Auf diese Art können auch Frequenzmarken bei Wobbelmessungen erzeugt werden.

Instantaneous Frequency Measurement (IFM). Nach einer Amplitudenbegrenzung wird das Signal in zwei Teilsignale zerlegt, von denen eines um eine bekannte, frequenzunabhängige Laufzeit τ verzögert wird (Bild 5). Mit einem Mischer, der als Phasendetektor betrieben wird (s. I 1.9) ergibt sich damit eine Ausgangsgleichspannung proportional zum Kosinus der Phasenverschiebung φ zwischen beiden Teilsignalen bzw. mit $\varphi = \omega_x \tau$ proportional zum Kosinus der Signalfrequenz f_x .

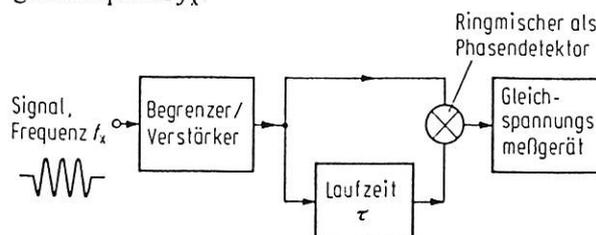


Bild 5. IFM-Empfänger (zur Frequenzmessung an Einzelimpulsen geeignet)