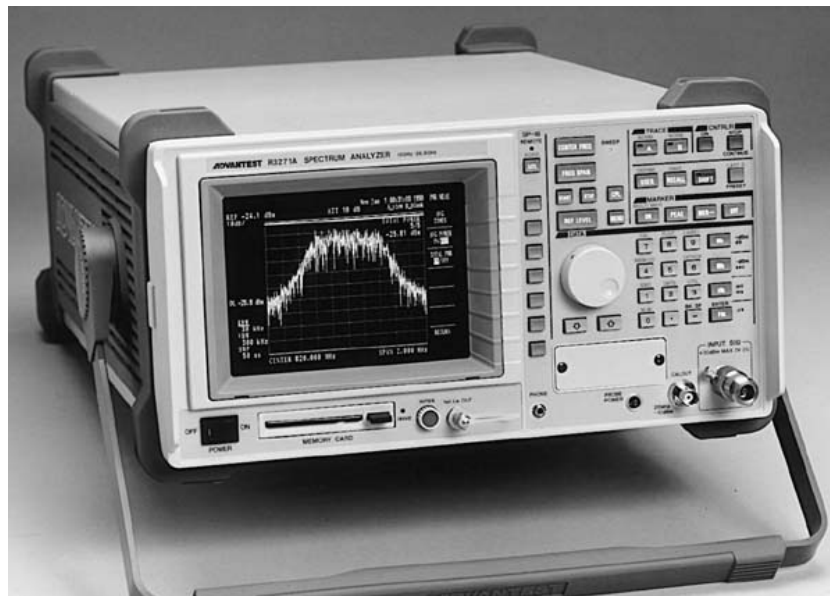


# Aufbau und Bedienung elektrischer Spektrum-Analysatoren

Beilage zum Fachpraktikum



## **Einleitung**

Elektrische Spektrum-Analysatoren ermöglichen die Untersuchung elektrischer Signale im Frequenzbereich. Es lassen sich die in einem Signal vertretenen harmonischen Schwingungen ausfindig machen und deren Amplituden messen. Wie manche andere Verfahren in der Signalverarbeitung ist auch die Messung elektrischer Spektren sowohl auf analoger wie auch auf digitaler Basis möglich. Die analogen Messgeräte basieren auf herkömmlicher analoger Filtertechnik, während die digitalen Geräte die Spektren numerisch über die diskrete Fouriertransformation (DFT) aus den Abtastwerten der Signale berechnen. Mit letzteren kann man zudem meistens eine Signalanalyse sowohl im Frequenz- als auch im Zeitbereich durchführen.

Im folgenden wird ein Überblick über die Funktionsweise und die wichtigsten Bedienungselemente beider Gerätevarianten gegeben. Für eine detailliertere Behandlung der Thematik wird auf die grosse Auswahl an weiterführender Literatur verwiesen (zum Beispiel [1, 2, 3]).

## **Analoge Spektrum-Analysatoren**

### **Aufbau**

Analoge Spektrum-Analysatoren arbeiten wiederum nach verschiedenartigen Prinzipien. So findet man beispielsweise Geräte mit einer Bank paralleler Filter, welche den untersuchten Frequenzbereich lückenlos abdecken. Im folgenden wird hingegen nur auf die gebräuchlicheren, sequentiell arbeitenden Geräte eingegangen, welche zu jedem Zeitpunkt nur die Amplitude bei einer Frequenz messen und daher mit einer viel kleineren Anzahl von Filtern auskommen.

Ähnlich wie bei einem Rundfunkempfänger transformiert eine Mischstufe den Signalanteil bei der momentan gemessenen Frequenz auf eine feste Zwischenfrequenz (ZF), bei der die Filterung stattfindet [4]. Die Lokaloszillatorfrequenz der Mischstufe wird dabei so über die Zeit variiert, dass der gesamte untersuchte Frequenzbereich abgefahren wird. Hierzu kann ein spannungsgesteuerter Oszillator mit einer vorgeschalteten Sägezahnspannungsquelle verwendet werden. Das gefilterte Signal wird verstärkt und erfährt eine Amplitudenmessung. Für die Anzeige verwenden viele Geräte schliesslich eine Elektronenstrahlröhre (Braunsche Röhre). Zur Steuerung der Auslenkung des Strahls in X- und Y-Richtung dienen dabei der Ausgang des Sägezahngenerators respektive das Amplitudensignal. Der Strahl baut das Bild also von links nach rechts auf, wobei die Bildwiederholrate der Frequenz des Sägezahngenerators

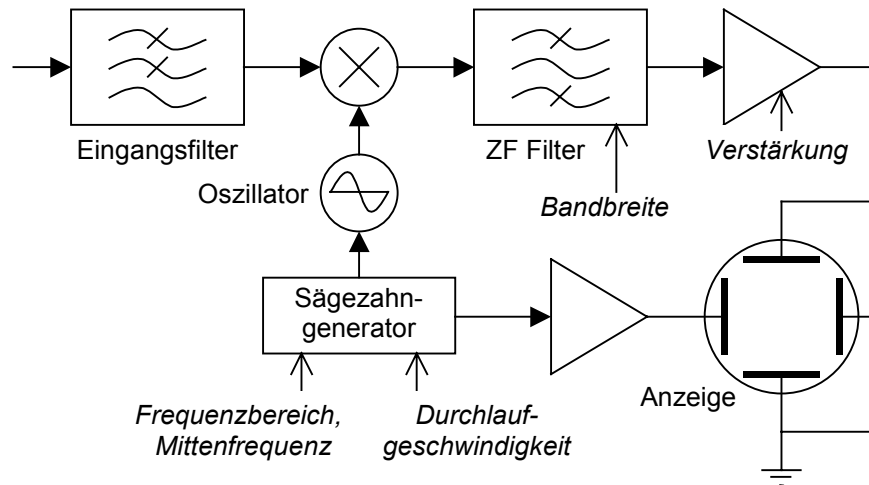


Abbildung 1: Vereinfachtes Blockschaltbild eines analogen Spektrum-Analysators.

entspricht. In der Abbildung 1 ist ein vereinfachtes Blockschaltbild eines solchen Spektrum-Analysators dargestellt.

### Interne Frequenzen und ZF-Filter

Die Mischung des Signals auf eine ZF macht eine Spiegelfrequenzunterdrückung notwendig. In Rundfunkempfängern wird diese durch eine Vorselektion mittels eines einstellbaren Bandfilters bewerkstelligt, dessen Mittenfrequenz der Frequenz des empfangenen Signals entspricht [4]. Für Spektrum-Analysatoren ist dieser Ansatz nicht geeignet, weil ein solches Filter über den gesamten messbaren Spektralbereich, also von Frequenzen nahe dem Nullpunkt bis zu sehr hohen Frequenzen durchstimmbare sein müsste. Als ZF wählt man deshalb normalerweise eine Frequenz oberhalb des Arbeitsbereichs des Geräts, da nun ein Tiefpass am Eingang für die Spiegelfrequenzunterdrückung ausreicht. Als Beispiel wäre ein Spektrum-Analysator mit einem Arbeitsbereich von einigen kHz bis 500 MHz vorstellbar, dessen ZF bei 700 MHz liegt. Der Lokaloszillator müsste dann den Bereich 700-1200 MHz abdecken und der Spiegelbereich wäre zwischen 1400 und 1900 MHz und könnte am Eingang relativ einfach unterdrückt werden.

Typischerweise werden in Spektrum-Analysatoren ZF-Filter mit einem Gauss'schen Amplitudengang eingesetzt. Da das ZF-Filter die Frequenzauflösung der Spektralmessung bestimmt und Filter mit entsprechend schmalen Durchlassbereichen auf der hohen ZF sehr komplex sind, wird normalerweise ein zweistufiges Konzept mit einer zweiten tieferliegenden ZF verfolgt, wobei die Auflösung dann vom Filter auf dieser

zweiten ZF abhängt. Bei der Wahl der Filterbandbreite muss weiterhin in Betracht gezogen werden, dass infolge der durchlaufenden Mischung sich der Signalanteil jeder Frequenz nur sehr kurzzeitig im Durchlassbereich des Filters befindet. Es sei beispielsweise angenommen, ein Bereich von 20 MHz soll innerhalb von zwei Sekunden durchfahren und mit einem Filter mit einer 3 dB-Bandbreite von 10 kHz aufgelöst werden. Jeder Frequenzanteil wäre nur während 1 ms innerhalb des Durchlassbereichs und das Filter müsste sich in dieser kurzen Zeit einschwingen können. Es ist also klar, dass bei gegebener Durchlaufzeit der Auflösung Grenzen gesetzt sind. Folglich muss für jede Messung ein akzeptabler Kompromiss zwischen der Bildrepetitionsrate und der Frequenzauflösung gefunden werden.

### **Bedienungselemente analoger Spektrum-Analysatoren**

Alle gebräuchlichen analogen Messgeräte verfügen neben weiteren Bedienungselementen über die folgenden Einstellungsmöglichkeiten:

- Frequenzbereich pro Rastereinheit (*Frequency Span/Div.*): Auswahl des abgefahrenen Spektralbereichs in Hertz pro Rastereinheit.
- Mittenfrequenz (*Center Frequency*): Wahl der Mittenfrequenz bei Bandpass-Signalen.
- Durchlaufgeschwindigkeit (*Sweep Time/Div.*): Einstellung der Bildrepetitionsrate bzw. der Durchlaufgeschwindigkeit in Sekunden pro Rastereinheit.
- Bandbreite (*Bandwidth* resp. *Resolution*): Einstellung der Filterbandbreite in Hertz.
- Verstärkung (*Reference Level* resp. *Input Sensitivity*): Skalierung in Y-Richtung, wobei meist auch zwischen einer linearen und einer logarithmischen Skalierung gewählt werden kann.

Wird die Antwortzeit des Filters durch Wahl einer zu hohen Durchlaufgeschwindigkeit bzw. Auflösung unterschritten, so zeigen dies die meisten Geräte durch eine Warnanzeige an (*Adjust* resp. *Uncal.*).

## Digitale Spektrum-Analysatoren

### Aufbau

Im Gegensatz zu den analogen Spektrum-Analysatoren tasten die digitalen Geräte das Signal im Zeitbereich ab und gelangen auf numerischem Weg über die DFT zum Spektrum. Durch die Abtastung des Signals entstehen bekanntlich im Idealfall unendlich viele Seitenbänder im Frequenzbereich im Abstand der Abtastfrequenz  $f_s$ . Die eindeutige Trennung des Originalspektrums von den Seitenbändern ist nur möglich, wenn die Abtastfrequenz  $f_s$  mindestens doppelt so hoch wie die grösste vorkommende Nutzfrequenz ist (Abtasttheorem). Da in der Praxis meist nicht bekannt ist, ob bei einem Signal tatsächlich keine Frequenzen oberhalb der halben Abtastfrequenz vorhanden sind, durchläuft das zu analysierende Signal wie im Blockschaltbild in der Abbildung 2 ersichtlich zuerst eine Tiefpassfilterung (*Anti-Aliasing-Filterung*). Die Digitalisierung erfolgt danach mittels einer Abtast- und Halteschaltung (*Sample/Hold-Schaltung*) und eines Analog/Digital-Wandlers. Auf dem zwischengespeicherten Datensatz wird dann die DFT durchgeführt, wobei in der Regel als Algorithmus die Fast-Fourier-Transformation (FFT) zur Anwendung kommt. Für die Darstellung der Spektren schliesslich verwenden viele moderne Geräte Flüssigkristallanzeigen, da sich diese durch eine flache Bauweise und einen geringen Energieverbrauch auszeichnen.

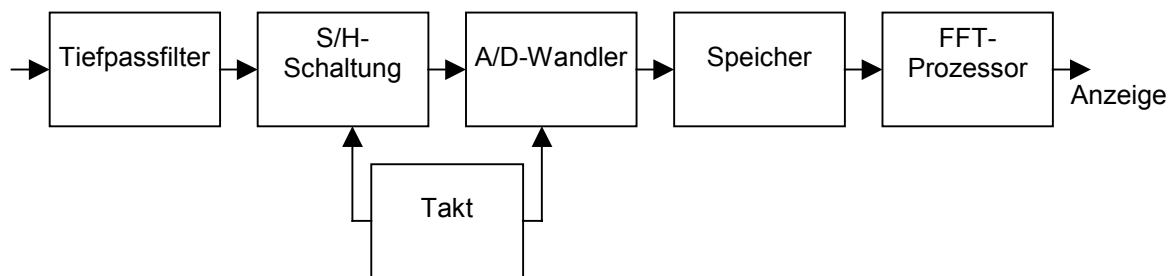


Abbildung 2: Vereinfachtes Blockschaltbild eines digitalen Spektrum-Analysators.

### Fensterfunktionen

Aus der Folge der Abtastwerte werden Blöcke zu je  $N$  Elementen gebildet und auf jedem Block eine  $N$ -Punkt DFT durchgeführt. Die resultierenden diskreten Spektren werden fortlaufend aufgearbeitet und angezeigt. Jede DFT beruht also auf einem endlichen Signalabschnitt der Dauer  $N/f_s$ , einem sogenannten Fenster des Signals. Das Ergebnis der  $N$ -Punkt DFT entspricht dabei dem Spektrum des durch das Fenster zeitlich begrenzten

Signals an den Stellen  $(k/N) \cdot f_s$ , wobei  $k$  ganzzahlig zwischen  $-N/2$  und  $N/2$  ist. Die Begrenzung des Signals kann als eine Multiplikation mit einer Rechteckfunktion angesehen werden. Dem wiederum entspricht im Frequenzbereich eine Faltung des eigentlichen Signalspektrums mit einer sinc-Funktion. Es findet im Frequenzbereich also eine Verbreiterung des tatsächlichen Signalspektrums statt, welche im Englischen auch als *leakage* bezeichnet wird. Bei der Analyse periodischer Signale tritt dieser Effekt nur auf, wenn die Fensterlänge ungleich einem ganzzahligen Vielfachen der Signalperiode ist. Dies ist jedoch der Normalfall, und die Ergebnisse der DFT und der Fourierreihenentwicklung des periodischen Signals unterscheiden sich bisweilen erheblich.

Bei reinen Sinussignalen äussert sich dieser Effekt im Frequenzgang durch das Auftreten mehrerer Nebenkeulen beiderseits der Hauptkeule. Die Ausprägung dieser Nebenkeulen hängt von der Fensterfunktion ab. Es müssen daher anstelle des Rechteckfensters auch andere Fensterfunktionen zur Anwendung kommen, die eine stärkere Unterdrückung der spektralen Nebenkeulen gewährleisten. Vom zeitlichen Verlauf her gesehen sind das Funktionen, bei denen die Diskontinuitäten in den Randbereichen vermieden werden. Das Hanning-Fenster beispielsweise wird durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$f(t) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \cos \left( 2\pi \frac{t}{T_F} \right) \right] \quad \text{für } 0 \leq t < T_F.$$

Es zeigt sich, dass sich das Hanning-Fenster durch viel kleinere Nebenkeulen auszeichnet. Nachteilig ist hier jedoch eine etwas grössere Verbreiterung der Hauptkeule und eine damit zusammenhängende Einbusse in der Amplitudengenauigkeit.

### **Bedienungselemente digitaler Spektrum-Analysatoren**

Bei den digitalen Messgeräten mit DFT-Funktion lassen sich die folgenden Einstellungen vornehmen:

- Frequenzbereich pro Rastereinheit (*Frequency Span/Div.*): Wahl des berechneten Spektralbereichs in Hertz pro Rastereinheit. Von dieser Einstellung hängt die Abtastfrequenz ab.
- Amplitude (*Volts/Div.*): Skalierung in Y-Richtung, wobei meist auch zwischen einer linearen und einer logarithmischen Skalierung gewählt werden kann.
- Fensterfunktion (*Window*): Wahl der Fensterfunktion aus Rechteck, Hanning und anderen.

## **Literatur**

- [1] A. D. Helfrick, "Electrical Spectrum and Network Analyzers - A Practical Approach". Academic Press, San Diego 1991.
- [2] W. Pfeiffer, "Digitale Messtechnik - Grundlagen, Geräte, Bussysteme". Springer Verlag, Heidelberg 1998.
- [3] P. Profos, T. Pfeifer, "Grundlagen der Messtechnik". 5. Auflage, R. Oldenbourg Verlag, München 1997.
- [4] P. Leuthold, "Kommunikationstechnik". Vorlesungsmanuskript, Abt. IIIB, 5. Sem., ETH Zürich 1998.