

1. Analoge Signale

1.1 Definitionen zum Signal

1.1.1 Definition „kontinuierliche Größe“

Eine kontinuierliche Größe kann in einem festlegbaren Bereich (kontinuierlich) jeden beliebigen Zwischenwert annehmen.

Bemerkung: Die meisten messbaren, physikalischen Größen sind wertkontinuierlich und zeitkontinuierlich, also analoge Größen. Mögliche Werte liegen in einem angebbaren Bereich. In der Praxis sind beliebig große (unendlich große) oder beliebig kleine (unendlich kleine) Werte nicht möglich.

Beispiele für wertkontinuierliche Größen sind:

Potentiometer-Einstellung, Druck, Geschwindigkeit, Kraft, Spannung, Temperatur.

1.1.2 Definition „diskrete Größe“

Eine diskrete Größe kann in einem festgelegten Bereich nur endlich viele Zwischenwerte annehmen. Man nennt die Größe auch quantisiert.

1.1.3 Definition „Signal“

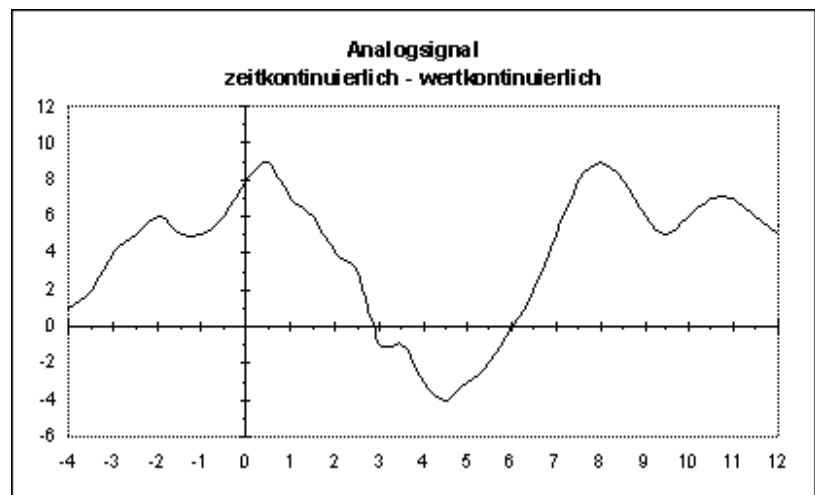
Eine physikalische Größe, in deren Wert und zeitlichem Verlauf Informationen verschlüsselt sind, nennt man ein Signal.

Bemerkung: Am häufigsten kommen in der Technik elektrische Signale vor. Information lässt sich z.B. aber auch durch akustische Signale, optische Signale oder Funksignale übertragen.

Ein Signal hat zu jedem Zeitpunkt einen Wert, der der zu übertragenden Information entspricht. Dies ist der (aktuelle) Signalwert oder Momentanwert.

1.1.4 Definition „Analog-Signal“

Ein wert- und zeitkontinuierliches Signal ist ein Analog-Signal.



Definition „transientes Signal“

Transiente Signale (transient = vorübergehend) besitzen Signalwerte, die nur für kurze Zeit von Null verschieden sind. Beispiele sind:

Spike (Ausreisser in positive oder negative Richtung)

Glitch (zwei aufeinander folgende Ausreisser verschiedener Richtung)

1.1.5 Definition „Digital-Signal“

Ein wert- und zeitdiskretes Signal ist ein Digital-Signal.

Bemerkung: Es gibt auch Mischformen dieser Signaltypen.

1.2 Unterscheidung analoger Signale

1.2.1 Informationstragende Größe:

Der Signalwert, also die Größe, die sich mit der Information verändert, kann in einem elektrischen Signal in unterschiedlichen Größen stecken z.B.:

Spannung	Strom	Ladung
Momentanwert	Amplitude	Effektivwert
Frequenz	Phase	Tastgrad

1.2.2 Elektrisches Spannungssignal

In der Messtechnik trifft man am häufigsten auf Signale, bei denen sich eine elektrische Spannung in Abhängigkeit von der Zeit verändert. Daher werden im folgenden die zum elektrischen Spannungssignal gehörenden Begriffe verwendet. Sie lassen sich entsprechend auf andere Signale übertragen.

1.2.3 Signalcodierung

Werden die Werte einer physikalische Größe durch ein Signal übertragen, muss dieser Wert mit dem Signalwert in einer festen Beziehung stehen. Diese Festlegung (z.B. -50°C bis 150°C entsprechen -10V bis $+10\text{V}$) nennt man Signalcodierung oder Bereichsanpassung. Legt man die Zuordnung durch die Messwerte eines Sensors oder die Steuersignale eines Aktors fest, nennt man den Vorgang Kalibrierung.

In vielen Fällen kann dieser Zusammenhang durch eine Lineare Funktion (als Gerade darstellbar) vorgenommen werden. Andere Funktionen sind z.B. Polynome, Logarithmus oder stückweise lineare Funktionen.

1.2.4 Deterministische und stochastische Signale

Hängt ein Signalwert vorhersehbar von einem anderen Wert ab (z.B. physikalische Größe, vorhergehender Wert), ist das Signal deterministisch. Typisch hierfür sind Sensorsignale oder Signale die von einem Funktionsgenerator erzeugt werden.

Ändert sich ein Signalwert nur zufällig, nennt man das Signal stochastisch. Hierzu zählen das elektrische Rauschen durch die Temperaturbewegung der Elektronen, Rauschsignale aus speziellen Generatoren und auch Signale mit unbekannter Codierung.

1.2.5 Signalformen

Bei technischen Anwendungen hat man es häufig mit deterministischen Signalen zu tun, deren grafische Darstellung mathematisch-geometrische Formen erkennen lassen. Sie lassen sich durch Funktionsgeneratoren erzeugen und tragen Namen wie Sinus, Rechteck, Dreieck, Sägezahn usw. Periodische Signale wiederholen ihr Muster ständig, während nichtperiodische Signale ihre Form verändern (z.B. durch Modulation) oder nur für eine bestimmte Zeit einen von Null verschiedenen Wert aufweisen (z.B. Einzelpuls).

Bei den stochastischen Signalformen lassen sich verschiedene Formen des Rauschens unterscheiden (z.B. rotes und weißes Rauschen). Einige (oft Stör-) Signale haben Namen wie Glitch, Spike oder Prellsignal.

1.2.6 Kenngrößen des Signalwerts

Da sich der Momentanwert ständig ändert, muss der Signalwert durch spezielle Mittelwerte (z.B. Effektivwert, Offset) oder durch Extremwerte (z.B. Amplitude) oder durch Formfaktoren (z.B. Crestfaktor) beschrieben werden.

1.2.7 Kenngrößen des zeitlichen Verlaufs

Der zeitliche Verlauf wird bei periodischen Signalen vor allem durch Periodendauer T bzw. Frequenz f beschrieben. Nichtperiodische Signale erfordern spezielle Größen wie Pulsdauer, Halbwertsbreite oder Kenngrößen aus der Statistik.

1.2.8 Kenngrößen des Frequenzgehalts

Jedes Signal lässt sich in Anteile unterschiedlicher Frequenzen zerlegen. Die Darstellung der Frequenzanteile nennt man das Amplitudenspektrum (Amplitude als Funktion der Frequenz).

1.3 Periodische Signalformen

Im weiteren werden hier nur deterministische Signale betrachtet. Typische Formen, die im Labor z.B. durch Funktionsgeneratoren erzeugt werden, sind:

Sinus

Cosinus (ergibt sich durch eine zeitliche Verschiebung des Sinus)

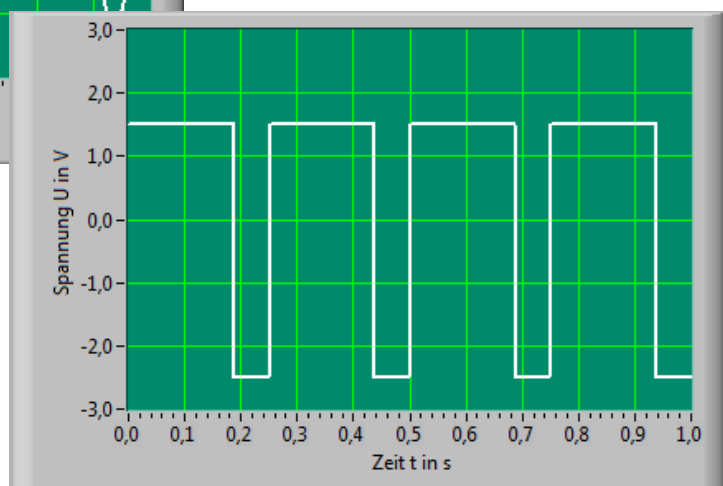
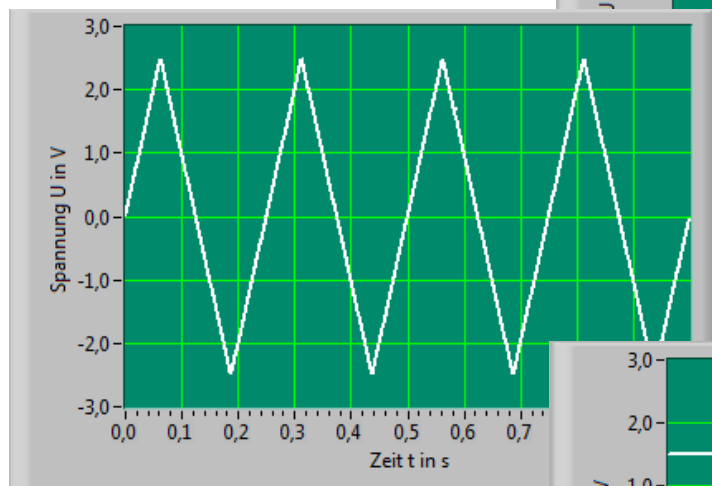
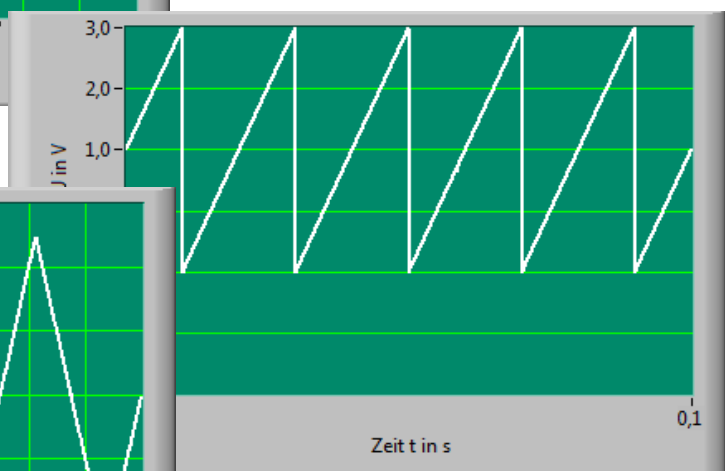
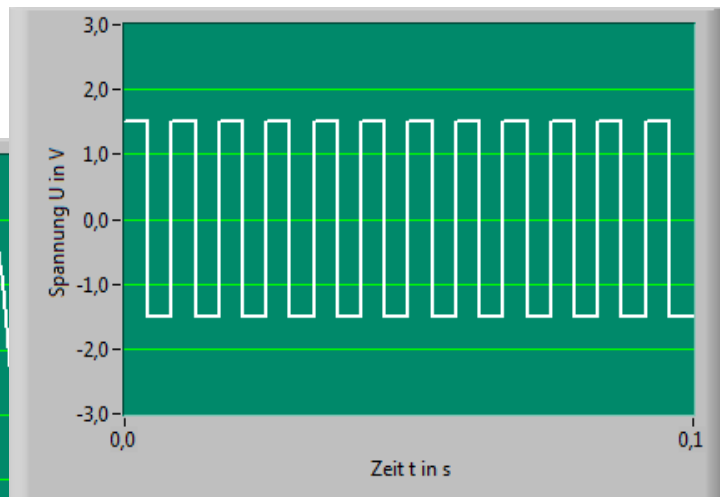
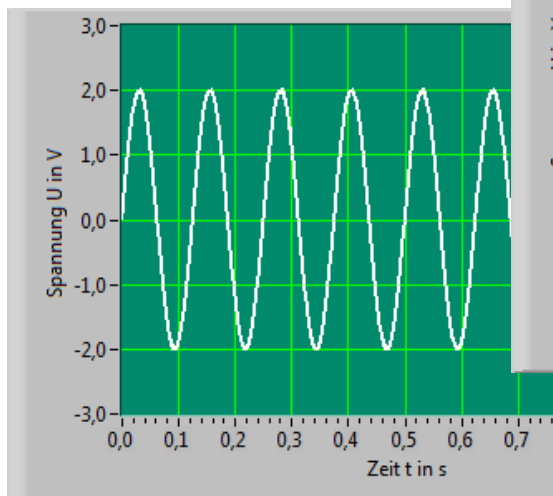
Rechteck

Pulsfolge

Dreieck

Sägezahn

Trapez



Aufgabe 2:

Bestimmen Sie in den Darstellungen jeweils die Signalform, die Periodendauer, die Frequenz, die Amplitude, den Offset und gegebenenfalls den Tastgrad.

1.4 Kenngrößen des Signalwertes

Momentanwert: zu einem festen Zeitpunkt gehörender Wert der Spannung

Amplitude: maximaler Wert der Spannung (nur sinnvoll bei Offset = 0)

Spitzenwert (Scheitelwert): maximaler Wert

Spitze-Spitze-Wert: Differenz zwischen Maximal- und Minimalwert der Spannung

Offset: Verschiebung der Symmetrieachse eines spannungssymmetrischen Signals

$$U_{\text{off}} = \frac{U_{\text{min}} + U_{\text{max}}}{2}$$

Gleichwert: arithmetischer Mittelwert (einer großen Anzahl von Momentanwerten)

$$U_{\text{gw}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i$$

Gleichrichtwert: arithmetischer Betrags-Mittelwert (einer großen Anzahl von Momentanwerten)

$$U_{\text{grw}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |u_i|$$

Effektivwert: arithmetischer Mittelwert der Quadrate (einer großen Anzahl von Momentanwerten)

$$U_{\text{grw}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i^2}$$

Er entspricht dem Wert einer Gleichspannung, die an einem ohmschen Widerstand die gleiche Leistung erzeugt. Die Umrechnungsfaktoren für wichtige Kurvenformen (ohne Offset) sind:

Rechteck (50%)

$$U_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{1}} U_{\text{max}}$$

Sinus

$$U_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{\text{max}}$$

Dreieck und Sägezahn

$$U_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{\text{max}}$$

Crestfaktor (Scheitelfaktor): Faktor zur Beschreibung des Verhältnisses zwischen Spitzenwert und Effektivwert. Viele Messgeräte arbeiten nur zuverlässig bei Signalen unterhalb eines gegebenen Crest-Faktors.

$$c_{\text{crest}} = \frac{U_s}{U_{\text{eff}}}$$

[crest: Kamm, Bergkamm, Hahnenkamm, Wellenkamm]

Aufgabe 1:

- Berechnen Sie den Effektivwert eines Rechtecksignals mit einer Amplitude von 10V bei einem Tastgrad von 40%.
- Berechnen Sie den Effektivwert eines Rechtecksignals mit einer Amplitude von 10V bei einem Offset von 5V.
- Berechnen Sie den Crestfaktor eines Sinussignals mit einer Amplitude von 10V.
- Berechnen Sie den Crestfaktor eines Dreiecksignals mit einer Amplitude von 10V.
- Berechnen Sie den Crestfaktor eines Rechtecksignals (Amplitude 10V; Offset 5V).

1.5 Kenngrößen des zeitlichen Verlaufs

Periodendauer T (auch Schwingungsdauer): bei periodischen Signalen die Zeit für einen vollständigen Durchgang bis zum Wiederholen der Signalwerte (nicht die Zeit zwischen Nulldurchgängen)

Frequenz f: Anzahl der Schwingungen (Perioden) pro Sekunde mit der Maßeinheit $[f]=1s^{-1}=1\text{Hz}$. Da bei der mathematischen Beschreibung (im Bogenmaß) häufig der Faktor 2π vorkommt, wird oft die Frequenz $\omega=2\pi*f$ verwendet. ω hat immer die Maßeinheit $[\omega]=1s^{-1}$. Es kann daher leicht zu Verwechslungen kommen.

Phase ϕ : Sie vergleicht die Verschiebung einer Schwingung gegenüber einer anderen Schwingung gleicher Frequenz oder gegenüber einem Zeit-Nullpunkt. Die Phase wird normalerweise im Bogenmaß (also in Vielfachen von π) angegeben. Alternativ kann auch die Verschiebung in der Zeit Δt angegeben werden.

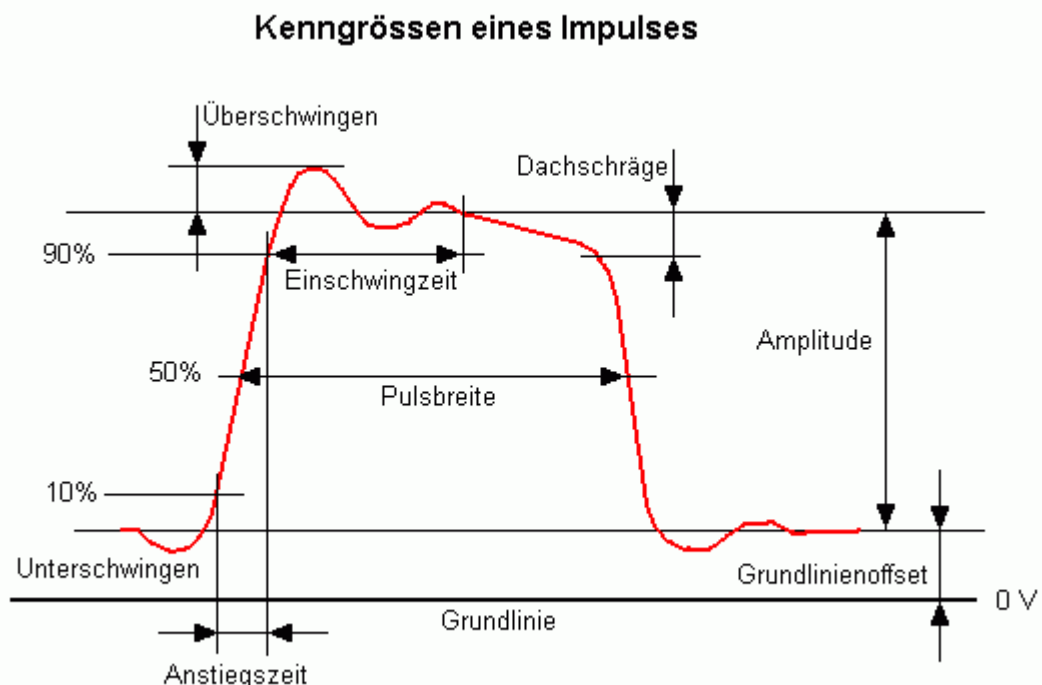
$$u(t)=u_0\sin(2\pi*f*t-\phi)=u_0\sin(2\pi*f*(t-\Delta t)) \quad \text{mit} \quad \phi=2\pi*f*\Delta t$$

Tastgrad τ : Bei Rechtecksignalen gibt er den Anteil der Zeit für den High-Pegel an.

$$\tau = \frac{t_{high}}{T}$$

Beim Sägezahn-Signal ist τ das Verhältnis von Anstiegsdauer zur Periodendauer.

Puls-Kenngrößen: Ein Rechteck-Puls wird bei der Erzeugung oder beim Durchgang häufig in typischer Weise verformt. Kenngrößen dazu sind:



Aufgabe 3:

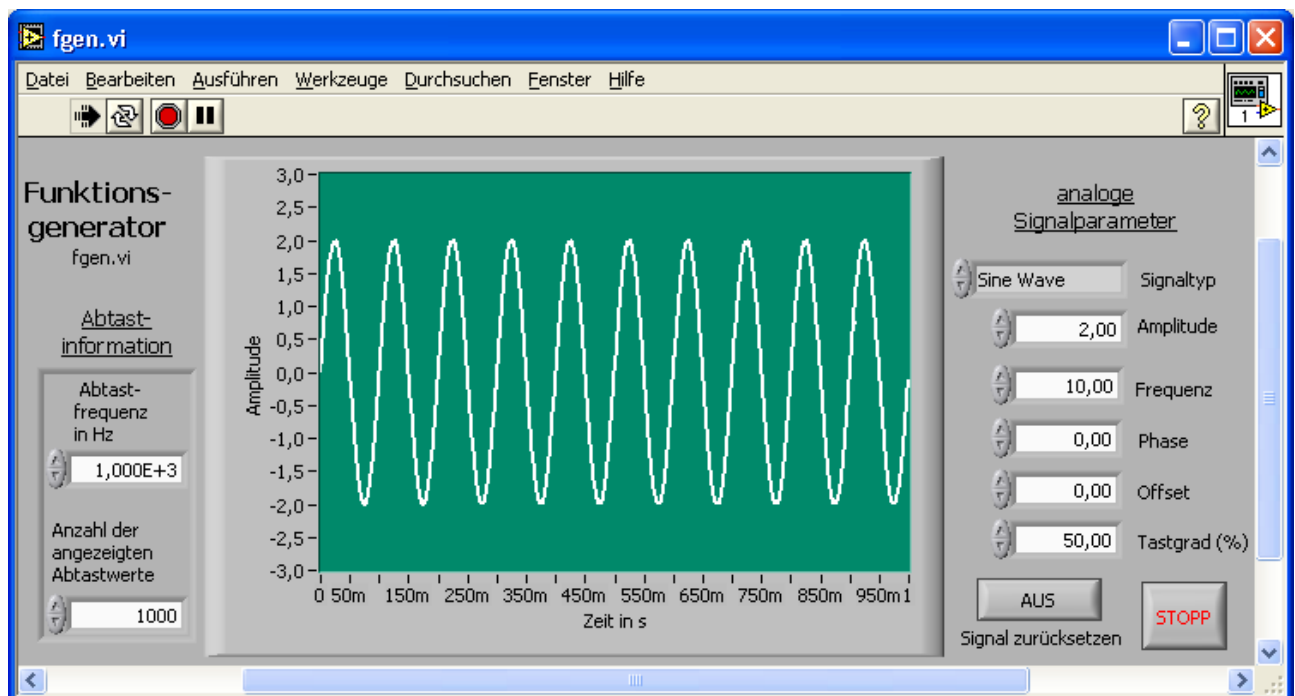
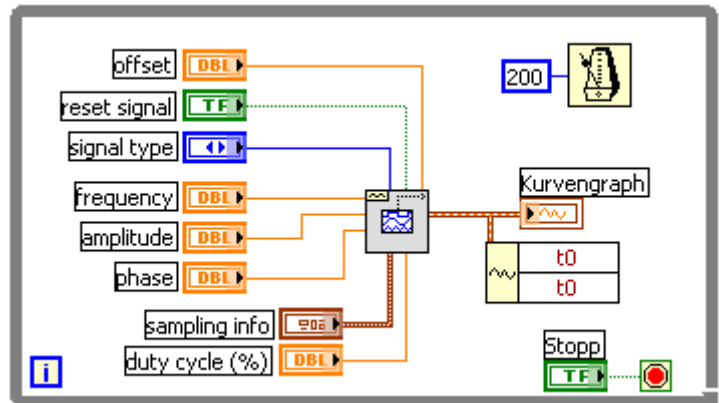
Die dargestellte Pulsform ist aus einem symmetrischen Rechtecksignal entstanden, hat eine Sprunghöhe von $U_{SS}=10\text{V}$ und eine Frequenz von $f=1000\text{Hz}$.

Bestimmen Sie näherungsweise die zum verformten Signal gehörenden Kenngrößen

1.6 Funktionsgenerator mit LabVIEW

In LabVIEW steht ein Modul zur Verfügung, mit dem sich ein Funktionsgenerator simulieren lässt, bzw. mit dem das Signal über ein angeschlossenes Hardware-Modul mit Analog-Ausgang ausgegeben werden kann (in diesem Programm nicht realisiert).

Das Signal ist hier nicht wirklich analog, da es digital (Punkt für Punkt) erzeugt wird. Bei hoher Abtastrate im Vergleich zur Signalfrequenz verhält es sich aber wie ein Analogsignal. Die Abtastinformation spielt für diese „Analogsignale“ keine Rolle.



1.7 Funktionsgenerator und Oszilloskop

Das Laborgerät zur Erzeugung elektrischer Signale ist der Funktionsgenerator. Gegenüber der Signalerzeugung mit dem Computer gibt es nur noch wenige Vorteile für ein Einzelgerät (analoge Signalerzeugung, Gerätegröße, zeitliche Stabilität, Temperaturstabilität, Ausgangsleistung).

Zur Messung und Überwachung von elektrischen Signalen wird das Oszilloskop verwendet. Seine Vorteile liegen in der schnellen Erfassung, Verarbeitung und Speicherung der Signale und vor allem bei der Obergrenze der erfassbaren Signalfrequenz. Auch hier ist das große Einzelgerät auf dem Rückzug aus dem Labor.

Aufgabe 4:

Erzeugen Sie typische Signalformen mit dem Funktionsgenerator und geben Sie die zugehörigen Signalparameter an. Stellen Sie die Signale auf dem Oszilloskop in einer geeigneten Einstellung an, zeichnen Sie das Bild ab und geben Sie die zugehörigen Oszilloskop-Einstellungen an.

2. Ausblick

Zum Thema Analogsignale bieten sich zur Erweiterung die folgenden technisch bedeutsamen Themenbereiche an:

2.1 Nichtperiodische Signalformen

Einige Formen werden im Labor für Testverfahren benötigt. Mit einem Arbitrary-Generator lassen sich beliebige Signalformen am Computer konstruieren, ins Gerät übertragen und auf Abruf einmalig oder mehrfach oder periodisch ausgeben. Einige gebräuchliche Labor-Formen sind:

a) **Rampe**

b) **Sprung / Stufe**

c) **Puls**

d) **Haversine** (halber Sinus)

e) **Sweep** (meist Sinus, Frequenzänderung linear oder logarithmisch)

f) **Multisinus**: Überlagerung von Sinusschwingungen, deren Frequenz je einem Analyseband entspricht und deren Amplituden so gewählt sind, dass das System in jedem Band mit der gleichen Leistung angeregt wird. Über die Phasenlage kann der Crestfaktor in weiten Grenzen variiert werden.

g) **Burst**: Schwingungspaket meist als Sinus-Signal konstanter Frequenz, Hüllkurve Rechteck, Startphase 0°

h) **Chirp**: Schwingungspaket mit frequenzmoduliertem Sinus, Spektrum im Zentrum flach, an den Rändern unregelmässig
Beispiel: linearer Cirp: $s(t) = \sin[2\pi * (f_0 + (f_1 - f_0) * t/T) * t]$

2.2 Rauschen

In der Mess- und Signaltechnik versteht man unter Rauschen alle jene Anteile am Signal, die keine brauchbare Information enthalten. Es sind daher durchweg unerwünschte Anteile. Andererseits lassen sich aus der Amplitudenverteilung, dem Frequenzspektrum, dem zeitlichen Verlauf und der Abhängigkeit von äusseren Einflüssen auf die Rauschquelle neue Informationen gewinnen. Rauschen kann viele Ursachen haben. Typische Rauschquellen sind:

- Thermisches Rauschen, Johnson Noise, Nyquist-Rauschen
- Schrotrauschen, Shot Noise
- Flicker-Rauschen, Funkel-rauschen, $1/f$ -Noise
- Quantisierungsrauschen
- Netzbrummen
- Popcorn-Rauschen, Burst Noise
- Bandrauschen

Begriffe aus der Optik findet man bei der Charakterisierung von Rauschsignalen zu Testzwecken, wie:

- weißes Rauschen (gleiche Amplitude in jedem Frequenzintervall)
- rosa Rauschen (Amplitude nimmt linear mit der Frequenz ab, $1/f$ -Rauschen)
- rotes Rauschen (Amplitude nimmt quadratisch mit der Frequenz ab, $1/f^2$ -Rauschen)

Beim gaußverteilten Rauschen lassen sich die Amplituden durch eine Glockenkurve beschreiben.

2.3 Überlagerung von Sinussignalen (Synthese)

Bei der Überlagerung zweier Signale werden diese Punkt für Punkt addiert. So kann es an bestimmten Stellen zur Verstärkung, an anderen zur Verringerung oder Auslöschung kommen. Unterscheiden sich die beiden Frequenzen nur geringfügig, beobachtet man Schwebungen mit der Differenzfrequenz.

Beim sog. Hart-Protokoll wird einem sich langsam ändernden Messsignal ein Signal höherer Frequenz überlagert, mit dem sich Daten zwischen Messgerät und Leitstation ohne zusätzliche Kabel austauschen lassen.

Addiert man mehrere Schwingungen mit den Vielfachen einer Grundfrequenz (Oberschwingungen), ist das Ergebnis wieder periodisch mit der Grundfrequenz, aber einer anderen Kurvenform. Durch Addition unendlich vieler Oberschwingungen geeigneter Amplitude läßt sich jede beliebige periodische Kurvenform erzeugen. Das Verfahren ist erweiterbar auf nichtperiodische Kurvenformen (Fourier-Synthese).

2.4 Zerlegung periodischer Signale (Analyse)

Die Umkehrung der Fourier-Synthese ist die Fourier-Analyse. Es ist ein rechenaufwändiges Verfahren, mit dem jedes beliebige Signal in seine harmonischen Anteile (Sinus-Funktionen) zerlegt werden kann. Diese Analyse ist Bestandteil vieler messtechnischer Verfahren (IR-Spektroskopie, NMR-Spektroskopie) und mit dem FFT-Algorithmus (Fast Fourier Transformation) sehr schnell ausführbar.

Auch die Zerlegung in andere Funktionen ist gebräuchlich. In der Bildverarbeitung findet die Walsh-Hadamard-Transformation mit kontinuierlichen Rechteckfunktionen Anwendung und mit den Wavelet-Transformationen (mit transienten Basissignalen) lassen sich Muster in Bildern, Musik (MP3) oder Messdaten beschreiben.

2.5 Modulation

Die mathematische Multiplikation einer Größe eines Trägersignals mit dem jeweiligen Funktionswert eines zweiten Signals mit vergleichsweise geringer Frequenz ergibt eine Modulation.

Bei der Amplitudenmodulation wird die Amplitude des Trägers multipliziert (z.B. MW-Rundfunk).

Bei der Frequenzmodulation wird die Frequenz des Trägers multipliziert (z.B. UKW-Rundfunk).

Entsprechend findet man die Phasenmodulation und bei Rechtecksignalen die Pulsdauer- oder die Tastgradmodulation in technischen Anwendungen.

2.6 Filterung

Technische Übertragungssysteme verändern die Frequenzanteile (Spektrum) eines Signals. Es wirkt wie ein Filter. Die Analyse dieser Spektrumsänderungen liefert wesentliche Informationen über das Verhalten des Systems.

Umgekehrt lassen sich Systeme (Filter) konstruieren, die ganz bestimmte Übertragungseigenschaften besitzen. So lassen sich hohe und tiefe Frequenzanteile voneinander trennen (Hoch- und Tiefpass) oder bestimmte Frequenzanteile auswählen (Bandpass) oder unterdrücken (Bandsperr-, Notch-Filter).

2.7 Signalstatistik

Rechenverfahren aus der Statistik ermöglichen besonders bei verrauschten Signalen die Bestimmung von sonst unzugänglichen Eigenschaften. Mit der Häufigkeitsbestimmung von Signalwerten lässt sich die Kurvenform zuordnen, die Autokorrelationsfunktion findet Periodizitäten und mit der Kreuzkorrelation lassen sich Muster in einem Signal finden.

2.8 Einheitssignale

Bei der Prozessautomatisierung werden standardisierte Signale verwendet, um mit einem Typ von Signalgeber bzw. Messgerät mit allen Aktoren und Sensoren Informationen austauschen zu können. In der Anlage, zur Überbrückung größerer Distanzen wird ein analoges Stromsignal (4mA bis 20mA) verwendet. Im Laborbereich wird eher mit dem Spannungssignal (0V bis 10V) gearbeitet, da hierzu die analoge Signaltechnik (Verstärker, Addierer, Filter usw.) einfacher zu realisieren ist. Analoge Signale werden bei der Automatisierung aber zunehmend durch digitale Signale ersetzt.