

# SS08 SV1

Oswald Berthold

08 March 2009

## Contents

<b>1</b>	<b>Vorbereitung</b>	<b>1</b>
1.1	Signalverarbeitung allgemein	1
1.1.1	Eigenschaften signalverarbeitender Systeme	2
1.2	Abtasttheorem	3
1.3	SV-Kette	3
1.3.1	Sensoren	4
1.3.2	Bandbegrenzungsfiler	5
1.3.3	Abtaster	6
1.3.4	ADU	6
1.3.5	Rechner	10
1.3.6	DAU	11
1.3.7	Abtaster	12
1.3.8	Rekonstruktionsfilter	13
1.3.9	Aktor	13
1.4	Verfahren der Signalverarbeitung	14
1.4.1	Ziele und Anwendungen	14
1.5	Signalfilterung	14
1.5.1	Signalfilterung im Frequenzbereich	14
1.5.2	Signalfilterung im Zeitbereich	15
1.6	Kompression	16
1.7	Sonstiges	16
1.7.1	Fourier Basics	16
1.7.2	Elektronik	17
<b>2</b>	<b>Fragen</b>	<b>17</b>
2.1	Selbstnotierte	17
2.2	Hübner / Schweigert	18
2.3	Lohmann	19
<b>3</b>	<b>Projekte</b>	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>Quellen</b>	<b>19</b>

# 1 Vorbereitung

## 1.1 Signalverarbeitung allgemein

### Was ist ein Signal?

Ein Signal ist i.A. ein Raum-Zeit-Objekt, es ist eine zeitlich oder örtlich veränderliche Grösse, deren Parameter Information enthalten können.

Beispiele für Signale: Sprache, Laute (Tiere), elektromagnetische Aktivität (Radio, Funk, Radioastronomie, Geophysik, Optik, Laser),

Signale werden von Prozessen erzeugt.

### Definitionen

- materielle Realisierung von Information
- Funktion, die Information über den Zustand eines physikalischen Systems enthält

-

### Physikalische Träger

- Strom, Spannung
- elektromagnetische Wellen
- Schallwellen
- Leuchtdichte

### Darstellung

Darstellung im Originalbereich oder als zusammengesetzt aus gewichteten Basisfunktionen.

Signal lässt sich auch als Summe oder Integral von Impuls- und Spalt-Funktionen darstellen.

$f(x, y, z, t)$  allgemein, hier  $f(t)$ .

### Systematisierung von Signalen

- elektrisch - nicht-elektrisch
- kontinuierlich - nicht-kontinuierlich
- periodische - aperiodisch
- harmonisch - nicht-harmonisch
- Energie und Leistungssignale
- stationäre - instationäre
- Nutz - Stör-Signale

- stochastisch - nichtstochastische (determinierte) Signale

## Was ist Signalverarbeitung?

Signalverarbeitung beschäftigt sich mit Signalen und SV-Systemen. Entwicklung und Umsetzung von Methoden und Verfahren zur Gewinnung, Verarbeitung und Auswertung von Informationen.

## Aufgaben der Signalverarbeitung

1. Gewinnung von Informationen über den signalerzeugenden Prozess
2. Signalverbesserung
3. Signalkompression

### 1.1.1 Eigenschaften signalverarbeitender Systeme

Ein System verknüpft ein Eingangssignal mit einem Ausgangssignal.

Abbildungsvorschrift F kontinuierlich:  $g(t) = F\{f(t)\}$

Abbildungsvorschrift F diskret:  $\vec{g} = F\{\vec{f}\}$

Systemantwort kann zur Beschreibung des System herangezogen werden.

- Linearität

$$F\{a \cdot f(t) + b \cdot g(t)\} = a \cdot F\{f(t)\} + b \cdot F\{g(t)\}$$

- Zeitinvarianz:

$$g_{n-n_0} = F\{f_{n-n_0}\}$$

Damit LTI-System. Impulsantwort, erzeugt keine neuen Frequenzen. Antwortet auf harmonisches Eingangssignal mit harmonischem Ausgangssignal derselben Frequenz und geänderter Amplitude und Phase.

Fouriertransformierte der Impulsantwort ist die Frequenzantwort:  $H(\omega) = FT\{h(t)\}$

- Stabilität: endliche Impulsantwort: FIR-System, sonst IIR-System. FIR immer stabil.
- Kausalität: System ist kausal, wenn aktueller Wert nur von Werten aus der Vergangenheit abhängt.

LTI-System wird durch Kennlinie charakterisiert. Diese ist unabhängig von Amplitude und Zeit, kann jedoch frequenzabhängig sein. Bei höheren Frequenzen wird die Kennlinie eines System aufgrund seiner Trägheit zu einer Ellipse.

## 1.2 Abtasttheorem

Frequenzbandbegrenztes Signal. Abtastfrequenz muss mindestens das Doppelte der höchsten im Signal enthaltenen Frequenz betragen.

$$T_A < \frac{1}{2f_g}$$

Rekonstruktionsgleichung

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(nT_A) \operatorname{sinc} \left[ \frac{\pi}{T_A} (t - nT_A) \right]$$

Nyquistfrequenz:  $f_N = \frac{f_A}{2}$  bzw.  $\omega_N = \frac{\omega_A}{2}$

siehe phänomenologische Erklärung.

## 1.3 SV-Kette

1. Sensor: Eingang analog nichtelektrisch, Ausgang analog elektrisch
2. analoges Bandbegrenzungsfiler: Eingang analog elektrisch, Ausgang analog bandbegrenzt
3. Abtaster: Eingang analog bandbegrenzt, digital Takt, Ausgang, wertekontinuierlich zeitdiskret
4. ADU: Eingang wertekont. zeitdiskret, digital Takt, Ausgang werte- und zeit-diskret / binär (Quantisierer, Kodierer)
5. Rechner/Verarbeitung: Eingang digital, Takt, Ausgang digital
6. DAU: Eingang werte- und zeit-diskret, Takt, Ausgang werte-kontinuierlich zeitdiskret
7. Abtaster: Eingang wertekont. zeitdiskret, Takt, Ausgang analog
8. Rekonstruktionsfilter: Eingang analog, Ausgang analog
9. Aktor: Eingang analog elektrisch, Ausgang analog nicht-elektrisch

### 1.3.1 Sensoren

Beispiele: Mikrophon, Kamera, Photoelemente (IR, TL, UV), Piezo, Generator, Drucksensor, Feuchtesensor, Thermometer, Magnetfeldsensoren (Hall, Fluxgate (Förster-Sonde), ...), Radiosensoren, Radar, Radioaktivität, Gassensor, Winkelgeber,

Kategorisierung

- genutzte Technologie
- physikalische Eingangsgröße:

- elektrische Ausgangsgrösse: resistiv, kapazitiv, induktiv, ...

Beschreibung

- Übertragungsfunktion:  $x_a = f(x_e)$
- Sensorkennlinie: statische und dynamische Sensorkennlinien
  - wenn linear, gilt annähernd

$$x_a = x_{a_0} + \Delta x_a / \Delta x_e (x_e - x_{e_0})$$

- Messung
- Messbereich
- Empfindlichkeit: Quotient

$$S = dx_a / dx_e \approx \Delta x_a / \Delta x_e$$

- Auflösungsvermögen: kleinste registrierte Messgrößenänderung
- Abbildungsfehler: systematisch oder zufällig (Rauschen, Drift, Temperatur, Alterung)
- Messfehler absolut
- Messfehler relativ
- Kalibrierung

### 1.3.2 Bandbegrenzungsfilter

Beschreibung durch Übertragungsfunktion  $H(\omega) \leftrightarrow h(t)$

#### Übertragungsfunktion

Verhältnis zwischen Eingangs- und Ausgangssignal als lineare Differentialgleichung mit konstanten Koeffizienten:

$$\left[ A_n \frac{d^n}{dt^n} + \dots + A_1 \frac{d}{dt} + A_0 \right] g(t) = \left[ B_m \frac{d^m}{dt^m} + \dots + B_1 \frac{d}{dt} + B_0 \right] f(t)$$

Übergang in den Frequenzbereich, Differentiation wird zur Multiplikation mit  $j\omega$

$$H(\omega) = \frac{G(\omega)}{F(\omega)} = \frac{\sum_{i=0}^m B_i (j\omega)^i}{\sum_{i=0}^n A_i (j\omega)^i}$$

Frequenzabhängige Verstärkung

Realteil, Imaginärteil -> Betrags- und Winkelspektrum

#### Gestaltung der Übertragungsfunktion

Durchlassbereich:  $|\omega| < \omega_g$ ,  $\omega_g$  Grenzfrequenz

$$|H(\omega)|^2 > \frac{1}{1 + \varepsilon^2}$$

Sperrbereich:  $|\omega| > \omega_s$ , mit  $\omega_s$  Sperrfrequenz

$$|H(\omega)|^2 < \frac{1}{1 + \lambda^2}$$

Ideal  $\varepsilon = 0$  und  $\lambda \leftarrow \infty$

### Filtertypen: Butterworth

$$|H_{Bu}(\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^{2N}}$$

wobei  $N \in \mathbb{N}$  die Filterordnung ist. Nach Umstellung ist

$$N \geq \frac{\log\left(\frac{\lambda}{\varepsilon}\right)}{\log\left(\frac{\omega_s}{\omega_g}\right)}$$

Kompromiss zwischen Ordnung (Steilheit) und Aufwand

Scharfe Begrenzung der Bereiche, flacher Verlauf im Durchlass- und Sperrbereich.

### Filtertypen: Tschebyscheff

Geringe Welligkeit im Durchlass- und Sperrbereich. Übertragungsfunktion wird mit Tschebyscheff-Polynomen approximiert.

$$|H_{T1}(\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 T_N^2\left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)}$$

$$|H_{T2}(\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 \frac{T_N^2\left(\frac{\omega_s}{\omega_g}\right)}{T_N^2\left(\frac{\omega_s}{\omega}\right)}}$$

Nach Umstellung wie oben:

Hochpassentwurf,  $\left|\frac{\omega_s}{\omega_g}\right| \leq 1$

$$N \geq \frac{\arccos\left(\frac{\lambda}{\varepsilon}\right)}{\arccos\left(\frac{\omega_s}{\omega_g}\right)}$$

Tiefpassentwurf,  $\left|\frac{\omega_s}{\omega_g}\right| \geq 1$

$$N \geq \frac{\operatorname{arcosh}\left(\frac{\lambda}{\varepsilon}\right)}{\operatorname{arcosh}\left(\frac{\omega_s}{\omega_g}\right)}$$

### 1.3.3 Abtaster

Zur Messung der Spannung wird das kontinuierliche frequenzbandbegrenzte Signal abgetastet, d.h. mit einer Impulsfolge multiplikativ verknüpft (PAM) und dann einer Halteschaltung zugeführt (Kondensator und Operationsverstärker, Flip-Flop, Sample-and-Hold).

### 1.3.4 ADU

Umsetzung einer Spannungs- oder Stromamplitude in eine meist binär codierte Zahl.

Quantisierung in gleichmässigen Stufen mit Quantisierungsvorschrift  $Q$ , dann gilt

$$f_{qu} = Q\{f_0(t)\}$$

Mit einem Binärcode von  $(B + 1)$  bit können  $2^{B+1}$  Stufen dargestellt werden.  $B + 1$  ist die Wortbreite.  $2f_m$  ist der Aussteuerbereich von z.B. 10 V, 5 V oder 1V. Bei grosser Anzahl von Quant.-Stufen wird die Kennlinie durch eine Ursprungsgerade genähert:

$$f_{qu} = a \cdot f_0 = \frac{2^{B+1}}{2f_m} \cdot f_0 = \frac{2^B}{f_m} \cdot f_0$$

Die Schrittweite ist

$$\Delta = \frac{2f_m}{2^{B+1}} = \frac{f_m}{2^B} = \frac{1}{a}$$

### Quantisierungsfehler

Grösse schwankt zwischen  $-\Delta/2$  und  $\Delta/2$ , modelliert als weisses Rauschen. Die Varianz (Rauschleistung) ist

$$\sigma_r^2 = \frac{2^{-2B} f_m^2}{12}$$

Der Rauschabstand (SNR) mit Masseinheit dB ist

$$\begin{aligned} \text{SNR} &= 10\text{dB} \cdot \log \frac{\sigma_f^2}{\sigma_r^2} \\ &= 10\text{dB} \cdot \log \frac{12 \cdot 2^{2B} \sigma_f^2}{f_m^2} \\ &= B \cdot 6.02\text{dB} + 10.8\text{dB} - 20\text{dB} \cdot \log \frac{f_m}{\sigma_f} \\ &\approx B \cdot 6\text{dB} - 1.25\text{dB} \end{aligned}$$

D.h. ca. 6 dB mehr Rauschabstand / bit Wortbreite

### Verfahren

Die Messung erfolgt über Vergleichsspannungen / Normalen. Dies kann parallel (direkt), hybrid oder seriell (indirekt) erfolgen.

- Flash Converter / parallel / rate-at-a-time
- Successive Approximation Converter / bit-at-a-time
- Dual-Slope Converter / seriell / digit-at-a-time

Parallel enormer Aufwand, 8 bit, 255 Komparatoren, Zählmethode billig (serielle Umsetzung) aber 255 Zeitschritte. Mischformen sind Stufenumsetzer und sukzessive Approximation / Wägeverfahren. Optimierung der Reihenfolge.

Reale ADUs erzeugen generell vier Fehlertypen

- Linearitätsfehler: ungleiche Stufen
- Begrenzungsfehler: Kennlinie zu steil
- Quantisierungsfehler: Stufen zu grob
- Offsetfehler: Kennlinie links/rechts verschoben

Im zweiten Schritt wird Vergleichsergebnis mit digitaler kombinatorischer Schaltung binär kodiert.

Details siehe Kell

### Grundlegendes Problem der Messtechnik

$$A(t_0) = Z(t_0) \cdot REF + R$$

$A(t_0)$  quantisierte Amplitude,  $Z(t_0)$  ganze Zahl,  $REF$  Referenzgrösse und  $R$  digitaler Restfehler.

Normierung auf Intervall  $[0, 1]$

$$z = \frac{Z}{(2^{n+1})}$$

Dann

$$ref = REF \cdot 2^{n+1}$$

$$A(t_0) = \frac{ref}{2^{n+1}} \sum_{i=0}^n 2^i d_i + R(n)$$

$$A(t_0) = ref \sum_{i=0}^n \frac{d_i}{2^{n-i+1}} + R(n)$$

Letztere ist die Grundgleichung für die A/D- und D/A-Umsetzung. Ihre grafische Darstellung unter Vernachlässigung von  $R$  ist die Kennlinie des Umsetzers.

### Fehler

Hier drei Fehlertypen



1. Zufällige Fehler
2. Quantisierungsfehler
3. Systematische Fehler

Eins und zwei werden vernachlässigt, siehe oben. Modellierung als weisses Rauschen.

Die systematischen Fehler teilen sich in lineare und nichtlineare Fehler.

Lineare Fehler sind Offsetfehler (wirkt additiv) und Endwertfehler (multiplikativ). Diese beiden können an beliebiger Stelle vor der Umsetzung ausgeglichen werden.

Nichtlineare Fehler sind entweder integrale Linearitätsfehler (s.o.) oder differentielle Linearitätsfehler (Monotoniefehler bzw. missing codes).

Siehe Bilder bei Kell, S.4

Beabsichtigte Nichtlinearitäten bei logarithmischem Umsetzer, Vergrößerung des Messbereichs.

## Direkte Verfahren

### Parallel-Umsetzer

Durchführen einer Vergleichsoperation, Anlegen einer Messlatte. Herleitung von Temperaturmessung. Grundprinzip bei direkter Wandlung: Spannungsteiler mit  $2^B$  Widerständen, an jedem Knoten ein Komparator, Vergleich mit der Eingangsgröße. Danach Kodierung in Binärzahl im Kodierer, Wandlung des  $k$  aus  $m$  Codes in Binärcode. Problem:  $m$  exakt gleiche Widerstände, insgesamt erheblicher Schaltungsaufwand, besonders bei hoher Auflösung. Kodiertabelle. Auch im Kodierer ist der Aufwand schnell sehr gross, Logikgatter mit sehr vielen Eingängen erforderlich.

Mit hoher Integration und Einsatz von SC-Technik sind diese Umsetzer praktikabel geworden. Sehr schnell, Umsetzung in einem Taktzyklus. Kommt bei sehr hohen Geschwindigkeitsanforderungen zum Einsatz.

Bietet auch die besten Möglichkeiten für eine gezielte nichtlineare A/D-Umsetzung.

### Bitweises serielles Verfahren / sukzessive Approximation

Vergleich mit Wägeverfahren / Waage.

Als Referenz kommt dabei ein D/A-Umsetzer zur Erzeugung der analogen Vergleichsspannungen zum Einsatz. Die "Waage" ist ein Komparator.

Entscheidend ist hier der Algorithmus nach dem die Gewichte auf die Waage gelegt werden:

1. Anlegen von  $U_e(t_0)$ ,  $U_{ref}$  und  $n$ .
2. Alle  $d_i := 0$ , mit  $i = 0, \dots, n$

3.  $i := n$
4.  $d_i := 1$
5.  $U(i) > U_e(t_0)$ ?
  - ja:  $d_i := 0$
  - nein: nix
6.  $i := i - 1$
7.  $i < 0$ ?
  - ja: Ausgabe aller  $d_i$
  - nein: zurück zu Schritt 4.

Mit jeder Taktperiode wird eine Bitstelle festgelegt. Steuerung erfolgt über SAR (successive approximation register).

Es ergeben sich Umsetzzeiten aus dem Produkt von  $n + 1$  (Anzahl der Bits) mit der Periodendauer  $T = 1/f_t$ . Sie liegen meist in der Größenordnung zwischen 1 und  $100\mu\text{s}$ .

Andere Variante ist Ersetzung des R2R-Netzwerkes im D/A-Teil durch ein entsprechendes Kapazitätsnetzwerk. Weitere Variante Kaskadenumsetzer.

### Indirekt / Seriell

Hier wieder: Umsetzung der informationstragenden Grösse Strom/Spannung in Zwischengrösse Zeit oder Frequenz. Dann Umsetzung und Kodierung in Dualzahl.

Zeitaufwand steigt exponentiell mit Bitbreite. Theoretisch keine differentiellen Linearitätsfehler. Praktisch oft doch, durch Rückwirkung hoher Frequenzen auf analoge Schaltungsteile.

Durch Integrieren lassen sich hochfrequente Rauschanteile gut unterdrücken.

### Sägezahnumsetzer

Integrator über Referenzspannung wird gestartet. Komparator (mit Eingangsspannung) setzt oder resettet Flip-Flop. Integration liefert Sägezahnsignal, Flip-Flop liefert Puls mit Länge, die der Dauer zum Erreichen der Eingangsspannung entspricht.

Nachteile:

- Auswirken von R und C auf  $\Delta t$ .
- Hochfrequente Störungen werden nicht unterdrückt, da nur Wert bei Erreichen von  $U_e(t)$  zählt.

Kodierung: UND-Gatter mit Flip-Flop Ausgang und Zähler am Eingang.

### Dual Slope Umsetzer

Zur Vermeidung der Nachteile des Sägezahnumsetzers.

Erst wird Eingangsspannung über genau festgelegten Zeitraum  $\Delta t_1$  integriert. Dann wird auf Referenzspannung (mit umgekehrter Polarität) umgeschaltet und "abintegriert" bis 0V erreicht wird. Die zweite Zeitspanne  $\Delta t_2$  ergibt ist das Messergebnis. Wieder in Flip-Flop, UND-Gatter, Zähler.

### Ladungsbalance Umsetzer

Passiert mit einem U/f-Wandler auf UND-Gatter zusammen mit Takt / Teiler.

Führt auch zum Sigma-Delta-Umsetzer.

### 1.3.5 Rechner

- PC
- Mikrocontroller
- DSP
- FPGA (!!!)

siehe unten: Verfahren

### 1.3.6 DAU

Ausgehend von Prozess im Rechner haben wir eine Folge von Dualzahlen  $\{g_n\}$  am Ausgang des Rechners anliegen. Der erste Schritt der Umsetzung ist die Erzeugung eines wertediskreten zeitkontinuierlichen Signals. Das macht der Digital-Analog-Umsetzer.

DAU wird wieder in zwei Baugruppen aufgeteilt. Die erste Baugruppe ist der Dequantisierer, dieser gibt jedem Abtastwert  $g_n$  seine verlorengangene elektrische Grösse zurück.

$$g_{dqu} = \Delta \cdot g_n = \frac{2f_m}{2^{B+1}} \cdot g_n = \frac{f_m}{2^B} \cdot g_n$$

Dequantisierer wird auch durch Kennlinie beschrieben, gleich wie beim ADU.

Die zweite Baugruppe ist wieder ein Halteglied 0. Ordnung (Sample-and-Hold). Diese soll den momentanen Signalpegel über eine Abtastperiode  $T_A$  konstant halten um die Summation zu einem treppenförmigen Ausgangssignal zu ermöglichen.

### Realisierungsprinzipien

Unterscheiden wieder parallel und seriell bzw. direkt und indirekt. Beim indirekten Verfahren wird eine Zwischengrösse verwendet (z.B. Zeit oder Frequenz).

Aufbauprinzipien sind binär gestufte Widerstände oder ein R2R-Netzwerk. Der Fehler liegt hierbei nur im Verhältnis der Widerstände  $R$  und  $2R$ .

## Fehler

DAU hat Auflösung, macht Linearitäts- und Offsetfehler.

## Details

siehe Kell.

Konstruktionsgleichung des analogen Signals aus  $n$  binären Datenleitungen.

$$A = d_n \cdot ref/2 + d_{n-1} \cdot ref/4 + \dots + d_0 \cdot ref/2^{n+1}$$

Das Signal ist nach wie vor zeit- und wertequantisiert, nur die Kodierung ist geändert. Danach ist streng genommen ein Glättungsfilter notwendig, siehe Whittaker. Oft unkritisch, und das nichtideale Verhalten realer Bauteile in bezug auf Bandbegrenzung wird mitgenutzt. D.h.: Schalter die über  $d_i$  gesteuert werden und entsprechende Referenzspannungen.

## Direkt / Parallel

Bei diesem Aufbau brauchen wir  $2^B$  Schalter mit Strom- oder Spannungsquellen dahinter. Die Bereitstellung von vielen entsprechend dimensionierten Widerständen ist problematisch. Daher R2R-Netzwerk.

## R2R-Netzwerk

Nur zwei Komponenten, R und 2R Widerstände. Jeder Knoten teilt den Strom in zwei Hälften, Kell S.9. Das Superpositionsprinzip erlaubt die Addition aller Teilspannungen / -ströme. Zur Berechnung der Ausgangsspannung addiert man die Wirkung aller eingeschalteter Quellen.

## Indirekt / Seriell

Die Information wird auf ein Zwischengröße, meist die Zeit, projiziert, um in einem zweiten Schritt diese Größe in den Signalparameter Stromstärke oder Spannung umzuwandeln.

Z.B. zwei Varianten mit Zähler, Datenregister und Komparator bzw. Rückwärtszähler, Nulldurchgang. Alles wird von einem Takt angesteuert. Bei Beginn des Vorgangs werden Flip-Flops gesetzt. Die Zeitdauer bis zur Gleichheit (Variante 1) oder bis zum Nulldurchgang (Variante 2) ist genau die Hi-Zeit  $T$  des Ausgangspulses.  $T$  und eine  $T_{ref}$  können zur Erzeugung der Ausgangsspannung verwendet werden. Bei Gleichheit eines Umsetzzyklus mit  $T_{ref}$  ist die Ausgangsgröße einfach das Tastverhältnis des Pulses, der in einen TP-Filter geht (Integration).

$$T_{ref} = 2^{n+1} \cdot \frac{1}{f_t}$$

$f_t$  ist die Taktfrequenz.

Nachteile: Es steigt ganz klar der Zeitaufwand für eine Umsetzung. Ausserdem Problem der Einschwingzeit des Integrators / Tiefpasses.

Vorteil ist der einfache Aufbau aus Grundelemente der Schaltungstechnik. Keine genauen Referenzgrößen in Bauteilform.

Puls geht in Integrator, dieser integriert eine Referenzspannung. Ausgang geht in S/H-Stufe. Alles Kell S.10/11.

## Fehler

Statische und dynamische Fehler.

Statisch: Anlegen eines Testwertes, warten bis stabil, dann Differenz zur Referenz messen -> Übergangsfunktion / Transiente.

Lineare Fehler bei allen Umsetzern, differentielle sind bei direkten Umsetzern möglich, integrale dagegen bei indirekten.

### 1.3.7 Abtaster

Das Signal am Ausgang des DAU ist treppenförmig. Das Rekonstruktionsfilter kann aus dem wertediskreten Signal ein wertekontinuierliches erzeugen. Dazu benötigt es als Eingang Impulse, deren Amplituden der momentanen Stufenhöhe entsprechen.

Dazu erneut Multiplikation des Analogeingangs mit dem digitalen Taktsignal. Ergebnis ist gewichtete Impulsfolge.

### 1.3.8 Rekonstruktionsfilter

Reko-Filter ist ein idealer Tiefpass, für dessen Übertragungsfunktion  $H(\omega)$  gilt:

$$H(\omega) = \begin{cases} T_A & \text{für } \frac{-\pi}{T_A} \leq \omega \leq \frac{\pi}{T_A} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Impulsantwort dieses Filters ist die Spaltfunktion  $si\left(\frac{\pi t}{T_A}\right)$ . Die gewichteten Spaltfunktionen werden am Ausgang des Filters additiv überlagert. Grundlage dazu von Whittaker 1915, seine Rekonstruktionsgleichung ist:

$$\begin{aligned} g(t) &= \sum_{n=0}^{N-1} g_n \frac{\sin\left[\frac{\pi}{T_A}(t - nT_A)\right]}{\frac{\pi}{T_A}(t - nT_A)} \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} g_n \cdot si\left[\frac{\pi}{T_A}(t - nT_A)\right] \end{aligned}$$

An den Abtastzeitpunkten selbst ist  $g(t)$  gleich den Abtastwerten  $g_n$ . Die rekonstruierte Zeitfunktion  $g(t)$  enthält nur Frequenzen unterhalb der Nyquistfrequenz.

### 1.3.9 Aktor

Ein Aktor wandelt ein elektrisches Signal in ein nichtelektrisches. Das kann eine Strecke, ein Winkel, eine Drehzahl, Dehnung, Druck, Licht etc sein.

Unterteilung wie bei Sensoren nach:

- genutzter Herstellungstechnologie: mikromechanisch, hybrid, keramisch

- nach gewünschter Anwendung: Anzeige, Drucker, Speicher, Lautsprecher, Ventil
- nach physikalischer Ausgangsgrösse: elektromagnetisch, elektrostatisch, elektro-thermisch, elektro-optisch

Beschreibung der Eigenschaften eines Aktors:

- Übertragungsfunktion
- Kalibrierung, Genauigkeitsklasse
- Aussteuerbereich
- Auflösung: kleinste reproduzierbare Ausgangswertunterschiede
- Parameterstabilität, Lebensdauer, Alterung
- technische Randbedingungen, Bauform, Grösse, . . .
- Klima- und Vibrationsfestigkeit, sicherheit, EMV, Toxizität

## 1.4 Verfahren der Signalverarbeitung

Befinden uns in der Symmetrielinie der SV-Kette.

$$g_n = \sum_{i=0}^{l-1} a_i f_{n+1}$$

1. Rechner
2. Mikrocontroller mit von-Neumann Architektur: Zeitbedarf steigt linear mit Anzahl der Summanden
3. DSP mit Harvardarchitektur: Zeitaufwand steigt mit Anzahl der Summanden
4. FPGA: schnell, geringe Leistungsaufnahme, Ressourcenverbrauch steigt linear mit Summandenanzahl / Puffergrössen

### 1.4.1 Ziele und Anwendungen

- Gewinnung von Information über Prozesse / Zustände, Ermittlung von Kenngrössen
- Signalkompression
- Signalverbesserung: entstören, hervorheben, färben, . . .

#### Verfahren im Zeitbereich

Einthoven: EKG, Biosignalverarbeitung

Strichcodeerkennung mit (Kreuz-)Korrelation

Hauptachsentransformation, Dimensionsreduktion durch Umverteilung der Varianzen, Bsp: Satellitenbilder

### **Verfahren im Frequenzbereich**

Transformation und Weiterverarbeitung der Koeffizienten (Kenngrössengewinnung)

Mikrotiterverfahren bei Bluttests

Vogelgesangsanalyse

Transformation und Beeinflussung des Spektrums.

## **1.5 Signalfilterung**

### **1.5.1 Signalfilterung im Frequenzbereich**

Störungen durch Überlagerung im Frequenzbereich

- Prinzip
- Idealfall
- Problemfälle
- Auflösung im Frequenzbereich
- Fensterung

Filterung im Frequenzbereich effektiver auszuführen.

Spektrum Eingangssignal, Übertragungsfunktion: punktweise Multiplikation, Rücktransformation

SV1-13-Filt-Frequ S.8 (sinus, impulsfolge, abgetastetes signal)

Spektrale Verschmierung:

- Multiplikation von Signal und Rechteckfenster (Auswahl) ist Faltung der Spektren. Dadurch Verschmierung.
- Verwendung von Fensterfunktionen (Kosinus-Halbzyklus) zur Verminderung dieses Effekts

Lattenzauneffekt:

- ungünstige Frequenzauflösung verdeckt Frequenzen
- Frequenzauflösung  $\Delta f = \frac{1}{N \cdot T_A}$ , Anzahl Samples mal Abtastperiode

## 1.5.2 Signalfilterung im Zeitbereich

### FIR Filter

$$g_n = \sum_{k=0}^{N-1} b_k f_{n-k}$$

Koeffizienten sind die Impulsantwort.

Übertragungsfunktion  $H(\omega)$

$$H(\omega) = \sum_{k=0}^{N-1} b_k e^{-j\omega k T_A}$$

### IIR Filter

Übertragungsfunktion  $H(\omega)$

$$H(\omega) = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} b_k e^{-j\omega k T_A}}{1 + \sum_{k=0}^{N-1} a_k e^{-j\omega k T_A}}$$

### Randordungsoperatoren

Median, Max, Min, Schwellwertoperation

## 1.6 Kompression

### 1.7 Sonstiges

#### 1.7.1 Fourier Basics

**Abgetastetes Signal:**  $f_n = \{f_n\} = f(t_n) = f(n \cdot T_A) = f(t) \cdot \delta(t - n \cdot T_A)$

**Spektrum des Abtastsignal** (Impulsfolge) ist ebenso Impulsfolge im Spektralbereich, s.u. Paare.

**Spektrum des abgetasteten Signals** ist entsprechend die Faltung von einzelner spektraler Peak (Sinus) mit Impulsfolge, führt zu linkem und rechtem Seitenband im Abstand der Spektralpeaks des Spektrums der Impulsfolge.

### Transformations-Werkzeuge

Werkzeug	Schreibweise	Signaltyp	Ergebnis
Fourierreihenentwicklung	$\sum$ und $\int$	periodisch	komplex / diskret
Fouriertansformation	$\sum$ und $\int$	aperiodisch endliche Energie	komplex / kontinuierlich
DFT	$\sum$ und Matrix	jedes Signal	komplex / diskret



## Fensterfunktionen

Zur Vermeidung der spektralen Verschmierung, die durch Anwendung eines Rechteckfensters entsteht.

Faltungstheorem

Verschiebungstheorem

### Fourier-Identitäten / Paare

Zeitbereich	Frequenzbereich	Betragsspektrum	Notes
Sinus	einzelner "Impuls"		und entsprechend
Einheits-Impuls	Sin/Cos Paar, Phase je nach Lage des Impulses	const = 1	nix
Einheitsimpulsfolge mit Periode T	Impulsfolge mit $\Delta f = 1/T$		
<b>Fenster</b>			
Rechteck von Hann	Spaltfunktion Spaltfkt. mit weniger Seitenzipfel		
Hamming	ebenso		
Gauss	ebenso		
Blackham	ebenso		

## 1.7.2 Elektronik

### Opamp

Komparator, Impedanzwandler, I/U-Wandler, Transimpedanzverstärker

Mitkopplung und Gegenkopplung

invertierende Schaltung: Spannungsteiler an Signal und invertierendem Eingang, Masse an nichtinvert. Eingang.  $v_u = -\frac{R_2}{R_1}$

nichtinvertierende Schaltung: Spannungsteiler an Masse und invertierendem Eingang, Signal an nichtinvert. Eingang.  $v_u = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

Gesetze:

- Differenzverstärkung: unendlich
- Gleichtakverstärkung: null
- Es fließt kein Strom in die Eingänge
- $R_E = \infty, R_A = 0$

1 Basic Rules of Opamps

1. An opamp will attempt to make both inputs exactly the same voltage (via the feedback path)

2. If it cannot do so, the output will assume the polarity of the most positive input

### Spannungsteilerregel

Teilspannung / Gesamtspannung = Teilwiderstand / Gesamtwiderstand

### Stromteilerregel

Teilstrom / Gesamtstrom = Gesamtwiderstand / Teilwiderstand

## 2 Fragen

### 2.1 Selbstnotierte

1. Was ist SV-Kette, zeichnen sie die Komponenten. Wichtig: Ein- und Aus-gänge kennzeichnen.
2. Um  $f(t)$  fehlerfrei rekonstruieren zu können, muss es mit einer Rate abgetastet werden, die grösser ist als das Doppelte der höchsten in  $f(t)$  enthaltenen Frequenzkomponente.
3. Kein Filterentwurf ohne Toleranzschema (!!!)
4. Nennen sie Kenngrössen zur Beschreibung eines TP-Filters Bildchen malen: Toleranzschema, Definition der Grenzfrequenz, Frequenzgang, evtl. Welligkeit
5. Erläutern sie die Prinzipien der Analog/Digital-Umsetzung und erläutern sie einen speziellen. (!!!)
6. Abtastung: Multiplikation im Zeitbereich ist Faltung im Frequenzbereich, 3 Diagramme: Verhältnisse im Frequenzbereich und Zeitbereich
7. Systematisieren sie Möglichkeiten für ADU und beschreiben sie eine genauer.
8. gute Beschreibungsform für jedes Kästchen in der SV-Kette.
9. LTI-System werden durch eine Ursprungsgerade als Kennlinie beschrieben.
10. Stromteilerregel, Spannungsteilerregel
11. von welchen Grössen hängt die Frequenzauflösung der DFT ab.
12. Operationsverstärker
  - Differenzverstärkung: unendlich
  - Gleichtakverstärkung: null
  - Es fließt kein Strom in die Eingänge
  - $R_E = \infty, R_A = 0$
13. Ein System reagiert auf einen Einheitsimpuls an seinem Eingang mit der Fouriertransformierten seiner Übertragungsfunktion am Ausgang.

## 2.2 Hübner / Schweigert

1. Warum geht man in den Spektralbereich?
2. Welche Aufgabe hat ein Sensor?
3. Beschreiben sie Teile der SV-Kette grob.
4. Verliere ich bei der Bandbegrenzung Informationen?
5. Wie sieht sequenzbandbegrenzttes Signal aus?
6. Erklären sie einen Sensor / Aktor etwas näher oder geben sie Beispiele
7. Erläutern sie die Baugruppen der SV-Kette
8. Realisierungsvarianten eines DAU
9. Was ist die Auflösung im Frequenzbereich?
10. Drei Forderungen von Whittaker
  - Tiefpass möge Rechteckcharakteristik haben
  - $f_g = f_N$
  - Bitte erneut abtasten, damit Superpositionsprinzip angewendet werden kann.

## 2.3 Lohmann

1. Warum muss man das Abtasttheorem einhalten?
2. Warum geht man in den Spektralbereich?
3. Welche Aufgaben hat ein Sensor?
4. Welche Aufgaben hat ein Aktor?
5. Erklären sie die Baugruppen der SV-Kette grob (Eingang / Ausgang)
6. Die Eigenschaften der LTI-Systeme
7. Abtasttheorem im Sequenzbereich: wie sieht ein sequenzbandbegrenzttes Signal aus? (treppenförmig)
8. Wie sieht ein frequenzbandgegrenzttes Signal aus?
9. Erläutern sie die Prinzipien von ADU, DAU und erklären sie eins genauer.
10. Zählen sie Signalverarbeitungsverfahren im Zeitbereich auf.
11. Beschreiben sie lokale, globale, lineare und nichtlineare Operationen
12. Filterung im Frequenzbereich: Was ist die Frequenzauflösung der DFT/FFT: Abstand der Frequenzlinien,  $\text{triangle } f = \frac{1}{N \cdot T_A}$
13. Beschreiben sie den Leckeffekt und den Lattenzauneffekt
14. Filter: HP, TP, BP, BS: Eigenschaften, Bsp., wo in SK-Kette
15. Wovon hängt die Redundanz einer Quelle ab?

### 3 Projekte

- Kunstlicht Analyse 1 mit Arduino (oder Velleman)
- Sniffer / Mixer
- DS1820 digitemp
- bt878
- wispy-sound

### 4 Quellen

- SV1 Skript Hübner / Schweigert sowie Lohmann
- Mitschriften: SS08 SV1.org/.tex/.pdf
- Folien
  - Meffert
  - Günter: Sensoren, Aktoren
  - Kell: ADU, DAU
- Arbeitsblätter
- Übungsmaterial
- Werkzeuge der Signalverarbeitung
- Best: Filter-Handbuch
- Samuel D. Stearns: Digitale Verarbeitung analoger Signale
- Franz Heinrich Lange: Signale und Systeme, Band 1. Berlin: Verlag Technik, 1975
- R. Unbehauen: Systemtheorie, Band 1. München: R. Oldenbourg Verlag, 1997
- Völz
- Sensor-Kochbuch, Siegfried Wirsum
- zerotrust
  - sensors
- informatik/MatKlang/Pruefung/matklang.pruefung.m
- siehe Literaturverzeichnisse von
  - Werkzeuge der Signalverarbeitung
  - MatKlang