

"Die Electricität bewirkt in den Nerven dieselben Reactionen,  
wie die mechanischen und chemischen Reize..."

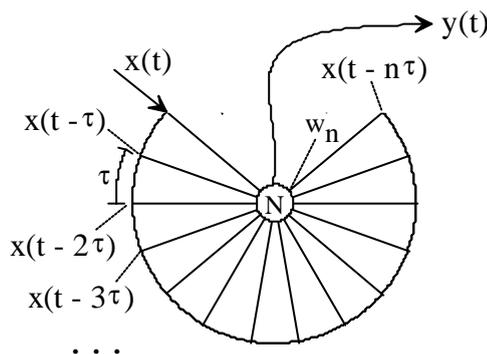
Johannes Müller, 1838.

## Codeselektion mit Laufzeitleitungen

Im folgenden wird angenommen, daß keine ideal schnellen Laufzeitleitbahnen zur Verfügung stehen. Stattdessen sind biologierelevant ausschließlich Leitbahnen endlicher, nicht vernachlässigbarer Ausbreitungsgeschwindigkeiten verfügbar.

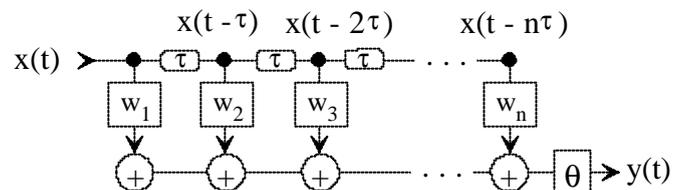
### Ringförmig seriengeschaltete Verzögerungskette

Eine kreisförmige Anordnung (Bild) wirkt frequenzselektiv für  $\tau = \lambda = 1/f$ , wenn im Kreismittelpunkt der Empfänger (Multiplizierer, Schwellwertgatter o.ä.) angeordnet wird, und vorausgesetzt wird, daß nur Leitbahnen einer definierten Geschwindigkeit existieren.



Codeselektive Interferenzschaltung mit einem Neuron (Prinzip) in einer kreisförmigen Anordnung.

Die Zeitfunktion  $x(t)$  wird in Stufen entsprechend der Abgriffe verzögert und parallel abgetastet.



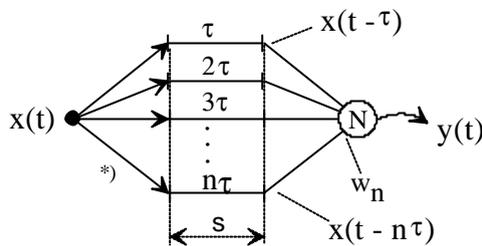
Ersatzschaltung der zeitdiskreten Form bei summativer Verknüpfung. Die Gewichte  $w$  werden mit der einkommenden, entsprechend verschobenen Zeitfunktion multipliziert.

Grundgedanke ist der, daß ein auf  $\tau$ -vielfachen abtastbarer Code auf einer kreisförmigen Bahn geführt wird, in deren Mittelpunkt sich das Neuron befindet. Jeder Abgriff am Kreis besitzt gleichen Abstand vom und gleiche Laufzeit zum Mittelpunkt, sodaß die Laufzeit auf den Radialen kompensiert ist. Die zum Mittelpunkt führenden Abgriffe sind auf dem Kreis in  $\tau$ -vielfachen angeordnet. Stimulierend und hemmend eingestellte Gewichte  $w_i$  am Neuron lassen sich so wählen, daß Erregung nur beim richtigen Code eintritt.

Es sind mindestens  $n$  Impulse zur einmaligen Auslösung des Detektors erforderlich.  $n$  ist die Anzahl der Eingänge des Neurons.

## Leitbahnen verschiedener Geschwindigkeit

Stehen Leitbahnen verschiedener Leitgeschwindigkeit zur Verfügung, kann eine äquivalente Schaltung angegeben werden, wenn die Laufzeit der Zu- und Abführung des Signals vernachlässigbar bleibt. Zu- und Abführung können z.B. als binärer Baum gestaltet werden.

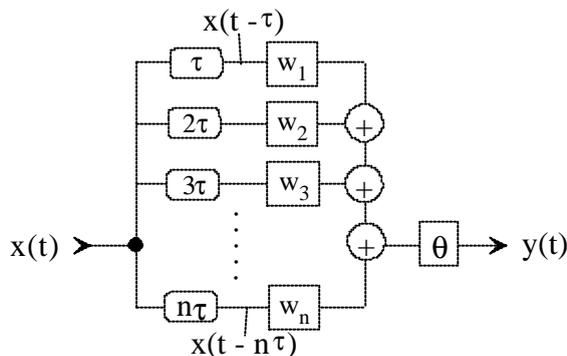


\*) Die Verzögerung der dünn gezeichneten Linien möge vernachlässigbar sein.

Codeselektive Interferenzschaltung mit gestaffelten Geschwindigkeiten.

Hergeleitet aus der ringförmigen Anordnung werden die Verzögerungszeiten für jeden Eingang des Summierers N separat bereitgestellt. Diese Anordnung ist im Nervensystem millionenfach anzutreffen. Es existiert wohl kein Neuron, das nicht in dieser Form wirkt.

Grundgedanke der Konstruktion der Schaltung mit Leitbahnen verschiedener Geschwindigkeiten ist die Zerlegung der Ringanordnung in einzelne Laufzeitelemente für jeden Abgriff.



Ersatzschaltung mit idealisiert verzögerungsfreien Leitbahnen. Trotz verschiedenen Aufbaus wirkt die Schaltung identisch zur Ringanordnung.

Die Geschwindigkeiten der Abschnitte sind bei gleicher Länge aller Abschnitte invers zu den gewählten Verzögerungszeiten  $\tau_i$ .

$$v_i = \frac{s}{\tau_i}$$

Bei gleichgeteilten Verzögerungen im Code bilden die Leitgeschwindigkeiten eine harmonische Reihe.

Pfadverzögerung $T_i$	$\tau$	$2\tau$	$3\tau$	$4\tau$	$5\tau$	$n\tau$
Leitgeschwindigkeit $v_i$	$s/\tau$	$s/2\tau$	$s/3\tau$	$s/4\tau$	$s/5\tau$	$s/n\tau$

Tabelle: Leitgeschwindigkeiten für den Codedetektor mit Leitbahnen verschiedener Geschwindigkeiten

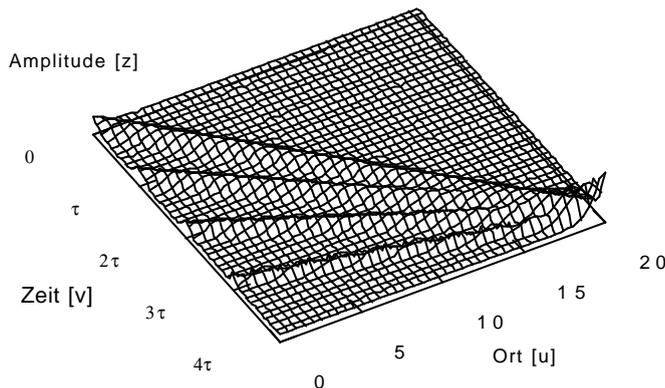
Während bei der Ringkonstruktion mit konstanten Leitgeschwindigkeiten gearbeitet wird, werden hier voneinander *definiert* abweichende Leitgeschwindigkeiten erwartet.

Zur Verdeutlichung der Funktion gehe man davon aus, daß sich die zu selektierende Zeitfunktion oder Impulsfolge  $x(t)$  im Kreisring befindet. Die Gewichte sind dann entsprechend dem Verlauf von  $x(t)$  zu adaptieren. Fehlerhafte Zeitfunktionen verursachen ein mehr oder weniger gestörtes Ausgangssignal.

## Gleichungen für Ring- und Liniendetektor

Ringförmig und linienhaft aufgebaute Detektoren sind funktionell kompatibel. Am Ausgang  $y$  läßt sich nicht feststellen, welcher Detektortyp vorliegt. Die zu erwartende Funktion ist bei beiden identisch.

Das Eingangssignal  $x(t)$  möge verzögert über die Kanäle  $x_i(t - T_i)$  am Neuron erscheinen. Die Zeitfunktion  $y(z(t))$  der entstehenden Impulsfolge läßt sich aus der Überlagerung der gewichteten Eingaben der zeitverschobenen Kanäle  $z_i = w_i x_i(t - T_i)$  bestimmen. Das Gewicht  $w_i$  eines Kanals möge der synaptischen Stärke entsprechen.



Funktion des Codedetektors mit gestaffelten Geschwindigkeiten.

Zu unterschiedlichen Zeitpunkten abgeschickte Impulse können bei Staffelung der Leitgeschwindigkeiten entsprechend einer geometrischen Reihe gleichzeitig im Ziel ankommen. Das Neuron ist im Punkt maximaler Interferenz angeordnet.

Für summative Verknüpfung der Signale im Neuron  $N$  gilt als Verknüpfungssumme

$$z(w_i, x_i) = \sum_{i=1}^n w_i x_i(t - T_i).$$

Für multiplikative Verknüpfung gilt entsprechend

$$z(w_i, x_i) = \prod_{i=1}^n w_i x_i(t - T_i).$$

Verknüpfungssumme  $z(t)$  (im AI-Gebrauch *net*) und Ausgabe  $y(t)$  hängen über eine triggernde Schwellenfunktion  $\theta$  zusammen, (im AI-Gebrauch wird dafür meist eine  $\Rightarrow$  *Sigmoid-Funktion* benutzt).

$$y(t) = \theta(z(t)).$$

Es wurde gezeigt, daß sich Multiplikation und Summation von Impulsfolgen unter bestimmten Umständen durch geeignete Wahl der Schwellen ineinander überführen lassen.

Sofern eine inkremental gestaffelte Verzögerung  $T_i = i\tau$  zutreffend ist, kann jedes  $x_i(t - T_i)$  durch  $x(t - i\tau)$  substituiert werden. Dann gilt

$$\boxed{z(w_i, x_i) = \sum_{i=1}^n w_i x(t - i\tau)} \quad \text{bzw.} \quad \boxed{z(w_i, x_i) = \prod_{i=1}^n w_i x(t - i\tau)}.$$

Die Summengleichung ist in der Technik als die eines digitalen FIR-Filters<sup>75)</sup> (*Finite Impulse Response*) bekannt. Im Unterschied zum FIR-Filter entstehen am Neuron meist wohl hubbegrenzte Ausgaben in Abhängigkeit davon, ob eine Schwelle überschritten wurde. Der Ausgangshub eines Neurons kann den Bereich  $-100\text{mV} \dots +10\text{mV}$  nicht verlassen. Es erscheint also in den Fällen sinnvoll, zum FIR-Filtermodell zu greifen, in denen Subthreshold-Probleme zu behandeln sind. In allen anderen Fällen erscheint eine aus der Schwellwertlogik<sup>76)</sup> gebräuchliche Schwellenbindung als hinreichend.

Für  $y(t) = \theta(z(t))$  kann vereinfacht eine Schwelle  $\sigma \in G$  als Entscheidungskriterium für eine

<sup>75)</sup> Tietze, U., Schenk, Ch.: Halbleiter-Schaltungstechnik. 9.Aufl., Springer Berlin, 1991, S.807ff.

<sup>76)</sup> Hurst, S.L.: Schwellwertlogik. Dr. Alfred Hüthig Verlag, UTB 262, 1974

Ausgabe  $y$  herangezogen werden,

IF  $z(w_i, x_i) > \sigma$  THEN  $y = 1$ , ELSE  $y = 0$ .

Der logische Wert 1 möge dabei dem Signalpegel Null Volt entsprechen, der logische Wert Null könnte z.B. auf -100 mV festgelegt sein.

Die Schwelle  $\sigma$  selbst ist nicht konstant. Sie ist als *Refrakterität* eine Funktion des Erschöpfungszustandes des Neurons (siehe dort). Je länger keine Ausgabe erfolgte, desto weiter vermindert erscheint sie.

Insgesamt werden von Ring- und Liniendetektoren  $m = i - n + 1$  Impulse frequenzsynchron abgegeben, wenn  $i$  die Anzahl einkommender Impulse, die lückenlos und mit der richtigen Frequenz aufeinander folgen, darstellt.

Mit der Iterationsvorschrift zur Entwicklung Vielfacher von  $\tau$

$$\tau_{i+1} = \tau_i + \tau \text{ mit } 0 \leq i \leq n \text{ und } \tau_0 = 0$$

folgt eine rekursive Gleichung zur Bestimmung der Verzögerungszeit des  $(i+1)$ -ten Elements.

$$\tau_{i+1} = \frac{s}{v_{i+1}} = \frac{s}{v_i} + \frac{s}{dv}$$

$dv$  ist der Geschwindigkeitszuwachs von Leitbahn zu Leitbahn. Nach  $v_{i+1}$  umgestellt, ergibt sich eine rekursive Gleichung zur Bestimmung der Leitgeschwindigkeit des Folgeelements.

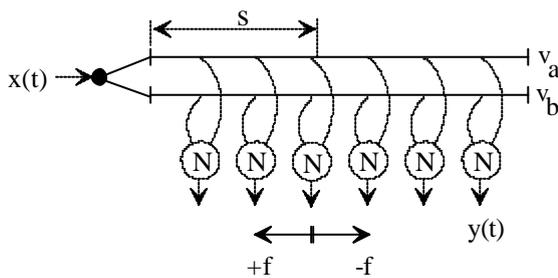
$$v_{i+1} = \frac{1}{\frac{1}{v_i} + \frac{1}{dv}}$$

Eine entsprechende *harmonische* Reihe von Geschwindigkeiten der Leitbahnen ergibt sich z.B. zu

$$\{v_1, \dots, v_n\} = \left\{1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{1}{6}, \dots, \frac{1}{n+1}\right\} \text{ für } v_0 = 0 \text{ und } dv = 1.$$

## Laufzeit-Differenzdetektor

Ein einfacher Frequenzdetektor könnte dort vorliegen, wo zwei Nervenfasern mit voneinander verschiedener Geschwindigkeit verschiedene, in Kette angereihte Neuronen befeuert. Dann detektiert in Abhängigkeit vom Abstand  $s$  jedes der Neuronen eine andere Frequenz.



Laufzeit-Differenzdetektor

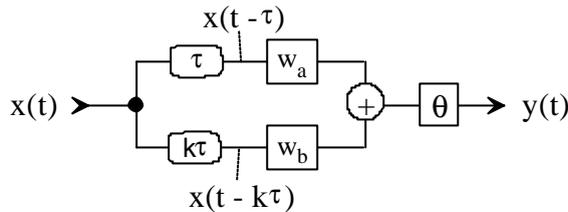
Geschwindigkeiten  $v_a$  und  $v_b$

Neuron N

Frequenz  $f$

Im Bild wird ein Neuron mit zwei Eingängen benutzt. Mit diesem wird jedes einzelne, seriell ankommende Impulspaar definierten Abstands erkannt. Es wird ein Folgeimpuls pro Detektion eines Paares ausgelöst. Beide Eingangsfunktionen werden um  $\tau_a$  bzw.  $\tau_b$  verzögert miteinander multipliziert bzw. summiert.

$$y(t) = \theta(x(t - \tau_b) \otimes x(t - \tau_a))$$



Differenzdetektor.  
Ersatzschaltung eines Neurons N  
an der Stelle s.

Aus der Ersatzschaltung kann für die Verknüpfung eines einzelnen Neurons abgelesen werden  
 $y(t) = \theta(x(t - \tau) \otimes x(t - k\tau))$

Die Argumente können auf der Zeitachse um  $\tau$  verschoben werden.

$$y(t + \tau) = \theta(x(t) \otimes x(t - k\tau + \tau))$$

$$y(t + \tau) = \theta(x(t) \otimes x(t - (k - 1)\tau))$$

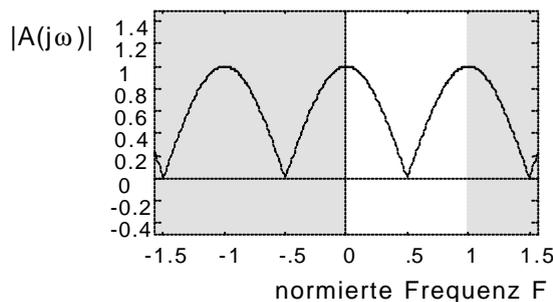
Die Ausgabe zur Zeit  $y(t + \tau)$  besteht folglich aus dem Eingangssignal  $x(t)$  verknüpft mit dem um  $k-1$  verschobenen Eingangssignal. Folglich nimmt die Schaltung eine Doppelabtastung im zeitlichen Abstand  $(k-1)\tau$  vor, und verknüpft beide Werte entsprechend der Wahl des Operators  $\otimes$ . Die Ausgabe kann mit einer Bewertungsfunktion  $\theta \Rightarrow$  Sigmoidfunktion,  $\Rightarrow$  Schwellwertfunktion korrigiert werden. Da der absolute Zeitbezug der Ausgabe  $y(t)$  i.a. uninteressant ist, wird man sich oft mit der Vereinfachung  $y(t') = y(t + \tau)$  begnügen.

Die Funktion der Schaltung ist *multiplikativ* ( $\otimes : *$ ) mit der Theorie der  $\Rightarrow$  Autokorrelation eines Signales mit sich selbst beschreibbar.

Werden beliebig gestörte Zeitfunktionen benutzt, hebt die Schaltung alle Ereignisse im Relativabstand von  $(k-1)\tau/n$  hervor. Sie wirkt frequenzselektiv (maximal durchlassend) für die Frequenz  $f_0$  sowie für ihre  $n \in N$  Vielfachen,

$$f_0 = \frac{1}{(k-1)\tau} \text{ oder } 1/f_0 = |\tau_b - \tau_a|.$$

Wird der Operator ( $\otimes : +$ ) *summierend* aufgefaßt, kann die Theorie der *Finite Impulse Response Filter* (FIR)<sup>771</sup> Anwendung finden.



Betrag des Amplitudenganges  
eines FIR-Filters erster Ordnung  
mit den Koeffizienten 0,5 und 0,5.

Mit den Gewichten  $w_a, w_b = 0,5$  wirkt das FIR-Filter als Tiefpaß erster Ordnung bis zur Frequenz  $f_0/2$ . Zwischen  $f_0/2$  und  $f_0$  wirkt es als Hochpaß. Für die Bewertungsfunktion  $\theta = 1$  ist die Gleichpegel-Verstärkung Eins. Der Frequenzgang setzt sich ins Unendliche fort. Der Betrag des komplexen Frequenzganges  $|A(j\omega)|$  ist mit obigen Koeffizienten herleitbar zu

$$|A(j\omega)| = |\cos(\pi F)|$$

wobei  $F = f/f_0 = (k-1)\tau f$  die normierte Frequenz darstellt.

Wenn die Laufgeschwindigkeiten  $v_a$  und  $v_b$  eines Impulses auf zwei verschiedenen Leitbahnen

<sup>771</sup> Tietze, U., Schenk, Ch.: Halbleiter-Schaltungstechnik. 9.Aufl., Springer Berlin, 1991, S.807 ff.

bekannt sind, so verursachen die durchlaufenen Bahnabschnitte die Verzögerungszeiten  $\tau_a = \frac{s_a}{v_a}$  bzw.  $\tau_b = \frac{s_b}{v_b}$ .

$$\frac{1}{f_0} = T = |\tau_b - \tau_a| = \left| \frac{s_b}{v_b} - \frac{s_a}{v_a} \right|$$

Sind die Abstände  $s_b$  und  $s_a$  gleich lang, folgt eine elementare Beziehung zur Ermittlung des Ortes  $s$  einer Interferenz in Abhängigkeit von der zu selektierenden Frequenz.

$$f_0 = \frac{1}{s \left| \frac{1}{v_b} - \frac{1}{v_a} \right|}$$

Die Resonanzfrequenzen  $f_{0i}$  äquidistant  $k$ -fach im Folgeabstand  $s$  angeordneter Neurone (siehe Bild) verhalten sich mit

$$T_k = k |\tau_b - \tau_a| = ks \left| \frac{1}{v_b} - \frac{1}{v_a} \right|$$

wie eine *harmonische* Reihe, der Geschwindigkeitsterm bleibt unangetastet konstant.

$i$	1,00	2,00	3,00	...	$n$
Weg $s$	$s$	$2s$	$3s$	...	$ns$
Delay $T$	$T$	$2T$	$3T$	...	$nT$
Resonanzfrequenz $f_{0i}$	$1/T$	$1/2T$	$1/3T$	...	$1/nT$

$$\{f_{0i}\} = \left\{ \frac{1}{T}, \frac{1}{2T}, \frac{1}{3T}, \dots, \frac{1}{nT} \right\} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{iT}$$

Rekursiv kann die Frequenz des Folgliedes nach der Vorschrift

$$f_{0i} = \frac{i-1}{i} f_{0,i-1} = \left(1 - \frac{1}{i}\right) f_{0,i-1}$$

gebildet werden.

### Mehrfach-Differenz-Detektor für seriellen Code

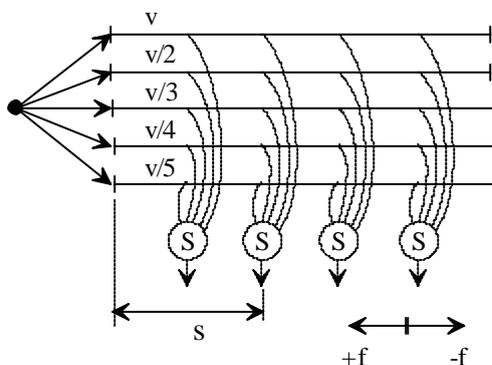
Eine gliedweise Inversion des Vektors *beliebiger*, disharmonisierender Geschwindigkeiten

$$\left\{ \frac{1}{v_0}, \frac{1}{v_1}, \frac{1}{v_2}, \dots, \frac{1}{v_n} \right\}$$

liefert den Vektor der Verzögerungszeiten bis zu einem wählbaren Ort  $s$ .

$$\{\tau_0, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n\}$$

Durch Aufstellung paarweiser Differenzen ist der dem Schwellwertgatter zugeordnete Bildvektor  $T$  wie dargestellt herleitbar.

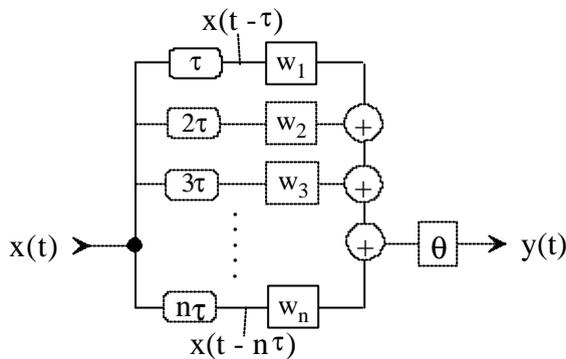


Geräuschanalyse über Laufzeitdifferenzen.

Die Laufzeitdifferenz verschiedener Leitbahnen ist indirekt proportional zur selektierten Frequenz  
S: Schwellwertgatter

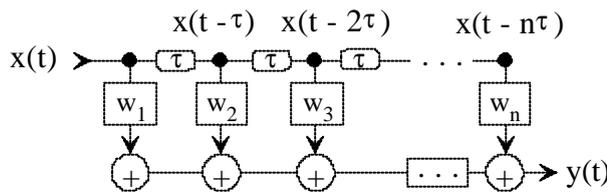
$$T = (\tau_0 - \tau_1, \tau_1 - \tau_2, \dots, \tau_i - \tau_{i+1}, \dots, \tau_n - \tau_{n+1})^T$$

Das Bezugselement  $\tau$ , kann beliebig gewählt werden. Eine erkannte Impulskombination wird von der Anordnung durch einen Ausgangsimpuls signalisiert. Jedes Schwellwertgatter erkennt eine definierte Anzahl *willkürlich* aufeinander folgender Impulse.



Mehrfach-Differenzdetektor.  
Ersatzschaltung eines Neurons N an der Stelle s.  
Eine arithmetischen Verzögerungsfolge führt zu äquidistanten Abtastpunkten des Eingangssignals. Die dargestellte Verzögerungsreihe erzeugt somit Frequenzselektivität für die Frequenz  $f = 1/\tau$ . Nicht äquidistante Stützstellen erzeugen Selektivität für definierte Frequenzmuster (Laute oder Geräusche).

Die Anzahl aufeinander folgender Impulse, die von einem Schwellwertgatter als Elementargeräusch erkannt werden, ist durch die Anzahl der Eingänge begrenzt. Eine unendlich breite Anordnung selektiert die Geräusche jeder Frequenzkombination und jeder Pulszahl, dh. jeder Dauer.



Ersatzschaltung der zeitdiskreten Form bei summativer Verknüpfung. Die Gewichte  $w$  werden mit der einkommenden, entsprechend verschobenen Zeitfunktion multipliziert.

## Sequenzanalyse und Synthese

### Sequenzanalyse

Unter Maßgabe von Eingängen (Synapsen) mit veränderbarem Schwellwert lassen sich auf einfachste Weise Sequenzen analysieren. Der Herkunftsort spielt keine Rolle. Es kann sich um vorverarbeitete Informationen (Änderungen motosensorischer Art), wie um Geräusche handeln. Im Bild a) liefert das Neuron zB. einen Einzelimpuls als Output für die Impulsfolge

$$u(t) = \{01001011101001\}$$

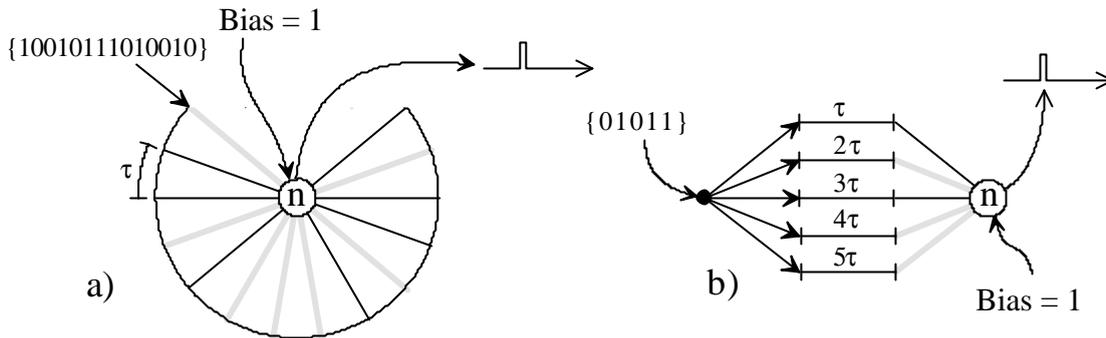
wenn die grau markierten Leitbahnen mit hohem Gewicht bewertet werden. Das Neuron in Beispiel b) liefert einen Output für die Folge

$$u(t) = \{01011\}$$

Um zu verhindern, daß in beiden Beispielen eine lange Eins- Folge detektiert wird, ist es erforderlich, das die Nullpositionen hemmend für den fehlerhaften Eins- Fall wirken.

Somit könnten die Gewichte grau gezeichneter Eingänge zB. mit +1, hingegen die der schwarz gezeichneten Eingänge mit -1 belegt sein. Wird hingegen, wie dargestellt, mit einem am Ausgang

realisierten Gewicht von  $n$  entschieden, genügt Neutralität der schwarz dargestellten Eingänge, das Gewicht schwarz gezeichneter Eingänge kann in diesem Fall mit null angesetzt werden.



Sequenzanalytoren: a) radial und b) axial.

Beide Beispiele liefern bei jeder Codeerkennung jeweils einen Impuls. Sollen bei Erkennung der Folge vom Neuron mehrere Impulse abgegeben werden, ist es vorteilhaft, den Code zyklisch zu wiederholen, oder die Anordnung zyklisch zu erweitern. Im Beispiel a) könnte dies mit zusätzlichen Windungen der Verzögerungsleitbahn um das Neuron erreicht werden.

In Abhängigkeit vom Code sind unterschiedliche Stärken der Hemmung der Synapsen zu beachten. Ein dicht mit Einsen belegter Code wird durch eine Eins auf einer Nullstelle relativ schwächer im Schwellwert reduziert, als ein dünn belegter. Folglich wird in diesem Fall die Hemmung auf einer Nullstelle stärker ausfallen müssen, falls eine gewisse Fehlertoleranz erreicht werden soll (analoge Schwellwertgatter, biologienahe Verarbeitung).

Für  $n$  Eingänge (Index  $x$ ) und Ausgänge (Index  $y$ ) kann eine AND- Charakteristik mit Schwellwertgattern unter Zuhilfenahme eines Bias-Eingangs, der mit einem statischen Pegel belegt ist, wie folgt erreicht werden:

$$w_i = +1,$$

$$w_y = n,$$

$$w_{bias} = 1.$$

## Sequenz- Synthese

Wird die Gewichtszuordnung zwischen neuronalen Eingängen und neuronalem Ausgang durch einen stark gewichteten Bias- Eingang in Richtung OR- Gatter verschoben, entsteht eine identische Anordnung, die zur Sequenzdetektion benutzt werden kann.

(Es ist anzunehmen, daß diese Bias-Steuerung in biologischen Systemen durch weißes Rauschen entsteht, das durch eine Art Aufmerksamkeit in integrierter Form eine Gleichpegelanhebung am Neuron verursacht).

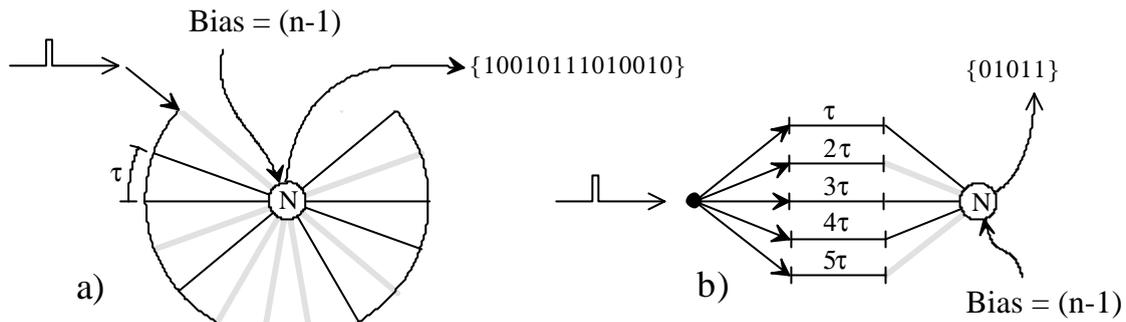
Die Bias-Steuerung liefert für den Fall der Beschickung mit einem Einzelimpuls wieder genau die Zustandsfolge, die dem Gewicht der Synapsen folgt.

Für Eingänge (Index  $i$ ) und Ausgänge (Index  $y$ ) gilt zB. für OR- Charakteristik:

$$w_i = +1,$$

$$w_y = n,$$

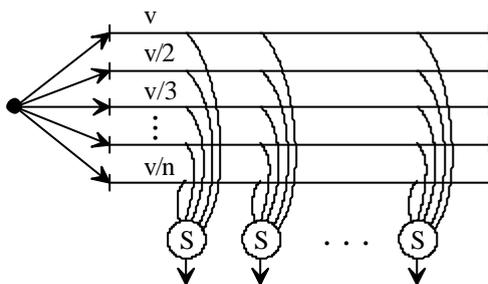
$$w_{bias} = n-1.$$



Sequenzgeneratoren: a) radial und b) axial.

## Sequenzspeicherung

Obige Schaltung kann bei Versorgung mit einem Bias- Anschluß zur Steuerung des Schwellwertes des Neurons dual betrieben werden: auf eine (erlernte) Impulsfolge hin liefert sie bei niedrigem Bias einen Einzelimpuls; wird jedoch ein Einzelimpuls als Input betrachtet, liefert dieselbe Schaltung bei hohem Bias eine Impulsfolge.



### Autokorrelierter Sequenzspeicher.

Jedes mit S bezeichnete Neuron kann eine spezielle Phasensequenz erlernen und wiedergeben. Ist die Schaltung Teil einer Übertragungsleitung einer Abbildung, 'verschluckt' sie bei niedrigem Bias eine ankommende Sequenz, und gibt sie bei hohem Bias wieder aus.

Wird die Anordnung in den Weg einer Übertragungsleitung einer Abbildung geschaltet, würde sie bei niedrigem Bias- Gewicht einen von links kommenden Bildvektor adsorbieren, und lernen, sofern eine Gewichtsadaption der Synapsen vorgesehen ist. Bei hohem Bias- Gewicht würde auf einen Eingangsimpuls von links derselbe Bildvektor nach rechts wieder ausgegeben. Folglich ist es mit diesem Schaltungsprinzip möglich, *Abbildungen aufzubewahren*, und sie bei Bedarf wieder hervorzubringen.

Die Laufzeitstrecke kann auch in Form mehrerer Windungen gestaltet werden. Biologierelevant ist wohl die bereits erörterte, planare Ausführung (Bild), offenbar erfüllt die Vielzahl bekannter Neuronentypen die Aufgabe der dazu notwendigen, diskretisierten vorliegenden Impulsdispersion, da davon auszugehen ist, daß verschiedene Typen von Neuronen nicht identische Leitgeschwindigkeiten besitzen.

### Beispiel

Mit minimal  $n$  Neuronen, die auf oben dargestellte Weise in die  $n$  Übertragungsleitungen einer Abbildung geschaltet sind, ist es bei 1000 Eingängen (Synapsen) pro Neuron und bei einem Impulsdauer mal Feuerfrequenzprodukt von 10 möglich, 100 Bildpunkte, die zu einem  $n$ -dimensionalen Raum gehören, aufzubewahren, und bei Bedarf wiederzugeben.

## Verzögerungsfilter

Unter dem Begriff eines Filters möge eine Anordnung verstanden werden, die bei Anliegen eines periodischen Signals *definierter Frequenz  $f$  und/oder Phase  $\phi(t)$  und/oder definierter Kurvenform  $f(t)$*  eine Ausgabe  $y$  liefert.

$$y = y(f, \phi(t), f(t))$$

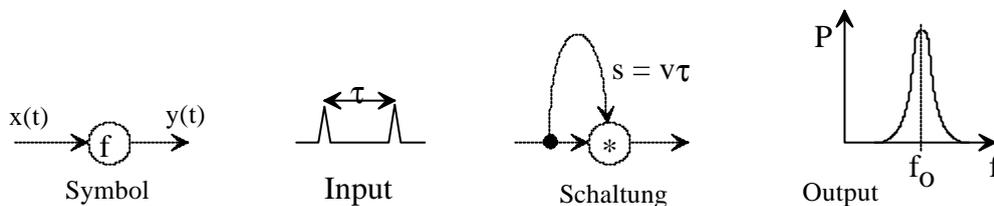
Es existieren verschiedene Möglichkeiten, Filterungen mit verzögernden Netzwerken vorzunehmen. Ein Filter ist als Spezialfall einer Codedetektion für periodischen Code zu verstehen. Der Unterschied zwischen Codefilter und Codedetektor möge als Unterschied in der Länge aufzufassen sein: Der verzögernde Codedetektor endet geometrisch bei  $2\pi$ , der Filter umfaßt stets Vielfache davon, seine Länge möge mit  $2n\pi$  bemessen sein.

## Frequenzfilter

Stehen nur Leitbahnen mit konstanter Leitgeschwindigkeit zur Verfügung, kann eine Frequenzselektion über Umwegleitungen durchgeführt werden. Dazu wird das Eingangssignal mit dem um  $\tau$  verzögerten Eingangssignal multipliziert.

$$y(t) = x(t) * x(t - \tau)$$

Zeitfunktionen, die eine Periodizität in  $\tau$  besitzen, passieren dieses Filter und werden wie oben besprochen quadriert. Die Berechnung erfolgt analog zu den gegebenen Herleitungen.

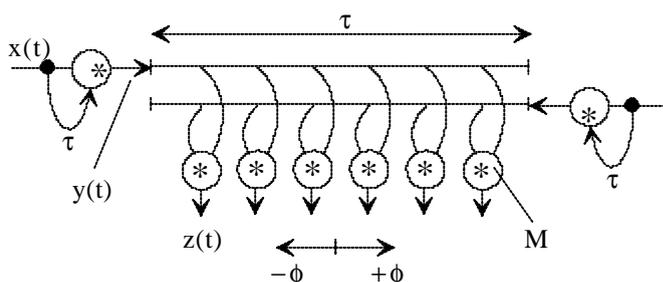


Die Wahrscheinlichkeit  $P$  der Erkennung einer definierten Frequenz ist abhängig vom verwendeten Operator (multiplikativ, summativ etc.) sowie von der Anzahl selektierender Abschnitte. Eine detaillierte Behandlung führt auf bekannte Ersatzschaltungen zurück, und ist ia. mit den Mitteln klassischer Elektrotechnik lösbar.

## Phasendetektor

Ein Phasendetektor entsteht aus einer gegenläufigen Kombination eines Interferenzfeldes der Länge  $v\tau = v/f$  mit Frequenzdetektoren der Umweglänge  $v\tau = v/f$ . Die Frequenzdetektoren liefern als Ausgangssignal

$$y(t) = x(t) x(t - \tau).$$



Phasendetektor mit Laufzeitleitungen.

Das Signal am Ausgang der Multiplizierer des Interferenzfeldes  $z(t)$  setzt sich, durch unterschiedliche Weglängen bedingt, aus zwei gegenseitig zeitverschobenen Anteilen zusammen.

$$z(t) = y_1\left(t - \frac{s}{v}\right) y_2\left(t + \frac{s}{v}\right)$$

Werden als Zeitfunktionen an den Eingängen des Interferenzfeldes

$$y_1(t) = y(t + \delta) \text{ und}$$

$$y_2(t) = y(t - \delta)$$

angenommen, entsteht Interferenz am Ort  $\frac{s}{v} = \delta$ , wie durch Einsetzen leicht zu überprüfen ist.

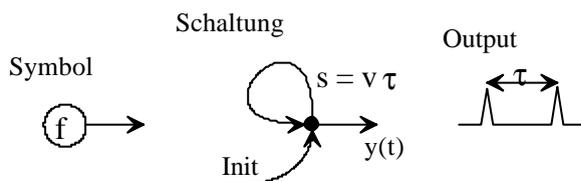
Es wird deutlich, daß die entstehende Ausgangszeitfunktion am Interferenzort als vierte Potenz der Eingangsfunktion erscheint.

$$z(t) = y^2(t) = x^4(t)$$

Entsprechend werden nichtideale, verrundete Impulse schmaler, damit verschiebt sich auch das Spektrum zu höheren Frequenzen. Die Länge der gegeneinander laufenden Leitbahnen beträgt  $\tau$ , um einen sinnvollen Phasenhub im Bereich einer Wellenlänge zu erhalten.

## Laufzeitgenerator

Vergleichbar zur Analyse können mit Umwegleitungen Frequenzen synthetisiert werden.



Als Übertragungsfunktion erscheint

$$y(t) = y(t - \tau).$$

Die Schaltung beginnt erst mit externer Initialisierung (Init) zu arbeiten. Vorausgesetzt wird eine aktive Reproduktion des Impulses im durch einen Knoten angedeuteten Verzweigungselement, in der technischen Realisierung zB. durch einen monostabilen Multivibrator.

## Gewinnung statischer Pegel

Eine Erzeugung von Gleichpegeln ist überall dort notwendig, wo ein Steuersignal nicht mit dem Informationsinhalt selbst in Beziehung treten darf, sondern wo der Informationsfluß über Parameter zu steuern ist. So bei einer statischen Steuerung der Verzögerungszeit (Moving, Zooming), der Schwelle (Bias) oder des logischen Verhaltens eines Neurons zwischen additiv (OR) oder multiplikativ (AND). Es ist zu klären, auf welche Weise aus einer Impulsfolge oder aus einem Einzelimpuls in biologienaher Form ein beliebig geformter Rechteckimpuls entstehen kann.

Weiter vorn wurde die Entartung einer dichter werdenden Impulsfolge zur Rechteckform bereits diskutiert: Die Summenfunktion  $u(t)$  nimmt die Form eines Gleichpegels an. Als Algorithmus zur Gewinnung eines Gleichpegels mit Interferenzschaltungen folgt: Bestimme über eine Variation der Leitgeschwindigkeit eine zu generierende Impulsfolge

$$u(t) = \sum_{i=1}^n \delta(t - t_i)$$

so dicht, daß gilt

$$u(t) = u_o = const.$$

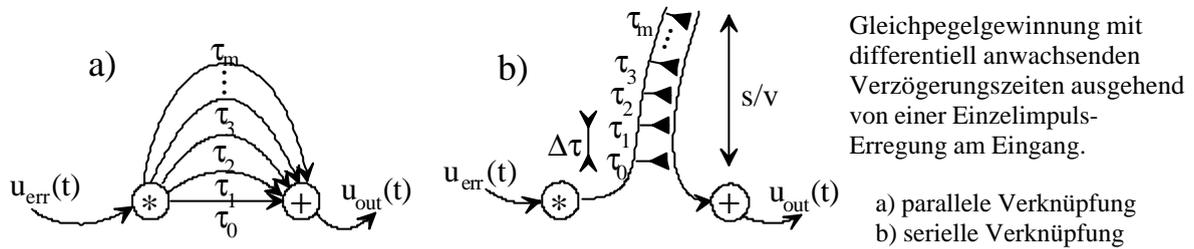
Mit dem rekursiven Lösungsansatz

$$\tau_{k+1} = \tau_k + \Delta\tau, \quad 0 \leq k < n.$$

ist  $\Delta\tau = \tau_{k+1} - \tau_k$  so zu ermitteln, daß die Restwelligkeit des Summensignals hinreichend klein wird, wobei der Index  $k$  die von den Synapsen verursachte Umweglänge bezeichnet. Eine Lösung wird gefunden, wenn die generierte Impulsfolge  $u_{out}(t)$  dem zu erreichenden Gleichwert  $const$  gleichgesetzt wird.

$$u_{out}(t) = \sum_{i=1}^n \delta(t - i\Delta\tau) = const$$

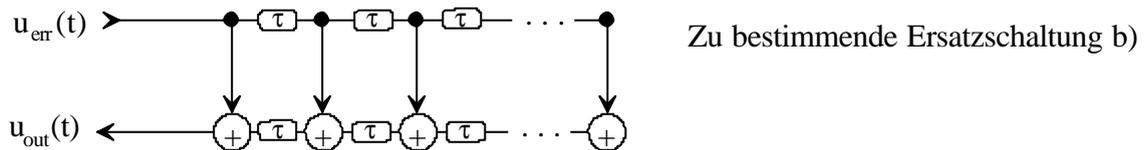
und nach dem Abstand  $\Delta\tau$  gefragt wird, für den zB. das quadratische Mittel den Fehler minimiert.



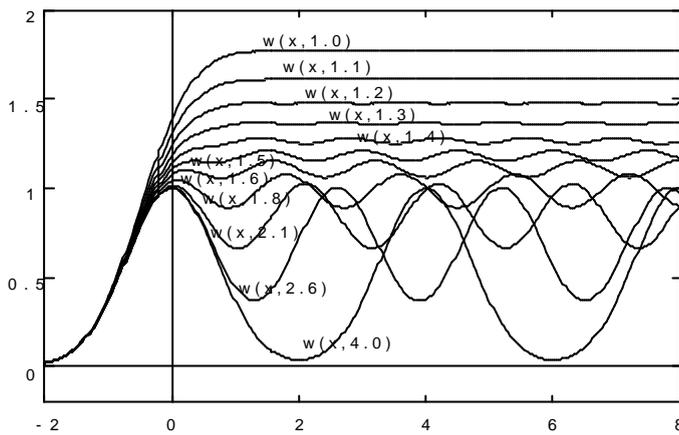
Der halbe Abstand der Synapsen (bzw. die Verlängerung des Umweges)  $\Delta\tau = 2a/v$  und der Impulsabstand  $(t_{k+1} - t_k)$  der ankommenden Impulsfolge treten zueinander in Beziehung, es gilt

$$\Delta\tau = (t_{k+1} - t_k) \text{ mit}$$

$$\tau_m - \tau_0 = s/v$$



wobei  $\Delta$  eine Konstante zur Charakterisierung der Restwelligkeit des Signals darstellt.  $a$  charakterisiert den Abstand zwischen den Synapsen (Abb. b),  $v$  möge wieder die Leitgeschwindigkeit darstellen.



### Glättung als Funktion des Impulsabstandes.

Wird eine verzögernde Leitbahn in Abständen kleiner der geometrischen Wellenlänge mit Abgriffen versehen, und werden die von den Abgriffen kommenden Zeitfunktionen aufaddiert, so erzeugt eine Impulsfolge einen Gleichpegel, dessen Welligkeit umso geringer ist, je enger die Abgriffe beieinander liegen (im Bild die weiter oben liegenden Funktionen).

Im Bild ist die entstehende Glättungsfunktion  $w(x, \Delta)$

$$w(x, \Delta) = \sum_{k=1}^m e^{-(x-2k\Delta a)^2} = \sum_{k=1}^m e^{-v(t-k\Delta\tau)}$$

bei gaußförmiger Einzelimpulserregung

$$u_{err}(t) = e^{-(t-t_0)^2}$$

und unendlich langer Kette über dem Abstand der Synapsen aufgetragen. Parameter ist der durch die Umwegleitung  $\Delta x = 2a$  verursachte Abstand. Je kürzer der Abstand der Synapsen  $\Delta x$  im Verhältnis zum Erregungsimpuls, desto mehr wird die Ausgangsspannung  $u_{out}$  geglättet. Als Faustregel kann gelten, daß hinreichende Glättung mit einem Funktionswert permanent oberhalb von 1 etwa ab

$$\Delta = 2\sqrt{-\ln\left(\frac{1}{2}\right)} = 1,6651092\dots$$

erreicht ist.