

*Denn "wer ist im Stande, den Instinkt oder gar den Verstand elektrisch zu construieren ... das Bewußtsein als ein Analogon eines mechanischen Vorgangs nachzuweisen?"  
Rudolf Virchow, 1871*

## Einführung

### Aristoteles, Bruno, Descartes

und andere Denker haben Fragen nach der Lokalisation des Gedächtnisses aufgeworfen, nach der Gedächtnissubstanz und nach den Gedächtnisspuren wurde gesucht.

*Aristoteles* hält den 'Gedächtnisabdruck' für eine physische Spur, durch die Vergangenheit und Gegenwart kausal verbunden sind.

Die Lehre des griechisch-römischen Arztes *Galen* (130-200 u.Z.), wonach das Gedächtnis in Hohlräumen, den heutigen hinteren Hirnventrikeln lokalisiert ist, bestimmte eintausendfünfhundert Jahre lang die wissenschaftliche Auseinandersetzung.

Ironie der Geschichte? Sind es doch ebendiese Hohlräume, die so nachhaltig die notwendig geometrische Proportionierung des neuronalen Raumes, die mit nichtinterferentiellen Ansätzen nicht erklärbar ist, verdeutlichen.

*Giordano Bruno*, der sich als einer der Ersten dem Training des Gedächtnisses widmet, (*De Umbris Idearum* 1582) wird am 17. Februar 1600 auf dem Scheiterhaufen wegen schwarzer Magie verbrannt.

Philosophische Fragen führen allmählich zunächst zu Ergebnissen bei der Untersuchung von Gehirn- und Gedächtnisleistungen.

Der Universalgelehrte *René Descartes* findet *petit filets*, kleine Fäden, die umhülltes Nervengewebe darstellen (*Traité de l'homme*, zwei Schriften, 1632/33). In der physikalischen Interpretation bleibt er notwendig mechanistisch, und erklärt einen 'Schwall von Lebensgeistern' für die Nervenleitung verantwortlich, denen die Eigenschaft zukommt, elastisch aneinander gekoppelt in Gleichzeitigkeit durch die Nerven gezogen oder gestoßen zu werden. Eine unmittelbare Übertragung eines Berührungszweizes kann somit scheinbar erklärt werden.

Anatomische Untersuchungen können erst Ende des neunzehnten Jahrhunderts das Nervengewebe ans Tageslicht befördern, (Färbetechniken von *Golgi*, *Cajal* etc.) sodaß früher datierte Untersuchungen oft einen nicht vernachlässigbar hohen, spekulativen Beiwert besitzen.

Erste, umfangreiche, heute noch gültige Ergebnisse der Erforschung der Funktionalität verschiedener Nerven und Ganglien (Ganglien wurden seinerzeit als Nervenzellen schlechthin verstanden, der heutige Zellbegriff entstand erst mit der Verbreitung der Mikroskopie, unter Nerven verstand man die makroskopisch sichtbaren Faserbündel) sind wohl *Johannes Müller*<sup>16)</sup> zuzuerkennen. Er untersuchte die Anatomie verschiedenster Nervenleitbahnen und

<sup>16)</sup> Müller, J.: Lehrbuch der Physiologie. Leipzig, 1855 (Referenz: Florey)

Quellenverweise dieser Seite in Florey, E., Breidbach, O. (Herausg.): Das Gehirn - Organ der Seele? Zur

erkennt sensorische und motorische Erregungsleitung. Er experimentiert mit galvanischen Strom und untersucht verschiedenste Nervenfunktionen detailliert. Seine Vorsicht in der Methodik erscheint heute aktueller denn je: obwohl er die Auslösung verschiedenster Erregungen mit elektrischem Strom im Versuch benutzt, hält er Spekulationen fern "*Die Natur des Nervenprinzips ist ungewiss...*". Er erkennt den elektrischen Strom als spezifischen Reiz vergleichbar zu anderen Reizen, hütet sich aber davor, elektrische Mechanismen als die Nervenleitung an sich anzusehen. Im Abschnitt *Materielle Interferenz* wird die plötzlich wiederentstehende Aktualität und Kühnheit dieser Auffassung offenbar.

Folgend findet *Rudolf Virchow* die Zelle und formuliert das Prinzip der Zellteilung. *Camillo Golgi* (1890) beschreibt eine heute noch angewandte Färbetechnik für Nervengewebe und der Berliner Anatom *Heinrich Wilhelm Gottfried von Waldeyer*, Freund *Heinrich Schliemanns*, findet die noch heute gültige Anatomie von Neuronen (1891). All das nachzulesen in der wunderbaren Zusammenstellung von *Florey und Breidbach*, siehe Quellenangabe.

Um dieselbe Zeit, vor einhundert Jahren, in der Sylvesternacht 1893/94 stirbt *Heinrich Hertz* siebenunddreißigjährig an einer Kiefervereiterung...

## In Search of the Engram

Unter diesem Titel veröffentlichte Karl Lashley<sup>171</sup> im Jahre 1950 Ergebnisse von Sektionen am Rattengehirn. Er hatte ergebnislos versucht, das Gedächtnis zu lokalisieren. Gleich welche Teile er entfernte, das Erinnerungsvermögen der Tiere verminderte sich mit der Menge der entfernten Substanz, kaum aber mit ihrer räumlichen Zuordnung. Es schien, als seien Informationen im Gehirn in der Art eines Hologramms gespeichert.

Mit stürmischen Anfangserfolgen<sup>181</sup>, angefangen vom Perceptron (Frank Rosenblatt 1958) über Adaline/ Madaline (Widrow und Hoff 1960), die Adaptive Resonance Theory ("ART", Grossberg 1977), Hopfield- Modell (John Hopfield 1982) und Boltzmann- Maschine (Hinton und Sejnowski 1985) bis hin zum Backpropagation- Algorithmus (Rumelhart und Hinton 1985) oder zur Strukturgenese und Evolutionsstrategie haben die Methoden der künstlichen Intelligenz- Forschung zu serienreifen Neuronen für die Steuerung von technischen Systemen geführt, mit denen es (fast) möglich ist, Lashley's Rattenexperimente nachzuvollziehen.

Leider aber tragen die Erkenntnisse nicht mehr wesentlich zum Verständnis biologischer Algorithmen der Informationsverarbeitung bei.

Obwohl die verteilte Lokalisation des Gedächtnisses mit komplizierten Lernalgorithmen inzwischen modelliert werden kann, so ist doch weniger denn je klar, auf welche Art die Natur ihre Evolution ohne Backpropagation- oder andere, die Neuronen beherrschende Software bewältigt haben kann, noch dazu die Neuronen mit dem Problem belastet sind, ohne annähernd deterministische Verdrahtungsstruktur lernen zu müssen.

Realistisch betrachtet begreifen wir uns bezogen auf einfache, naturgegebene, biologische Steuerungsabläufe nach vierzig Jahren erfolgreicher AI- Forschung und einhundert Jahre nach William James<sup>191</sup> noch immer an fast demselben Anfang des Verstehens.

---

Ideengeschichte der Neurobiologie. Akademie-Verlag Berlin, 1993.

<sup>171</sup> Lashley, K.S.: In search of the engram. Society of Experimental Biology Symposium, No. 4, 1950: "Psychological Mechanisms in Animal Behaviour" (in Anderson, Rosenfeld: Neurocomputing, Foundations of Research. MIT Press, Cambridge MA, 1988, pp. 59-63)

<sup>181</sup> Schöneburg, E.; Hansen, N.; Gawelczyk, A.: Neuronale Netzwerke. Markt & Technik V., München, 1990

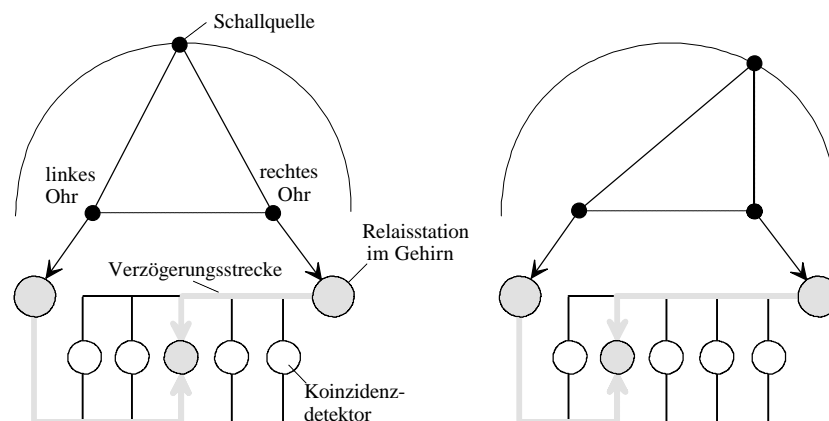
<sup>191</sup> James, W.: Psychology. New York: Holt, 1890. Chapter XVI, "Association", pp. 253-279 (in Anderson, Rosenfeld: Neurocomputing, Foundations of Research. MIT Press, Cambridge MA, 1988, pp.4-14)

So ist es trotz intensivster Bemühungen nicht gelungen, Lernmodelle zu entwickeln, deren Neuronen aus Sicht ihrer lokalen Umgebung, d.h.. ohne übergeordneten Administrator oder Supervisor lernen können. Bildlich gesprochen experimentieren wir noch immer mit Hologrammen, ohne irgend etwas über die Art ihrer tatsächlichen Entstehung zu wissen.

Auch sind die Fragen der genetischen Codierung weitgehend unbeantwortet. Wo genau liegen die Fixpunkte der genetischen Vorbestimmung, inwieweit entwickeln sich neuronale Strukturen stochastisch und an welchen Stellen wird Struktur erlernt? Welche Codeschwere besitzt unser neuronaler Apparat? Man versetze sich in die Lage eines Nervenstranges, der sich in einem Embryo auszubreiten hat. Millionen von Nervenbahnen haben die Aufgabe, von einem Initialpunkt des Neuralrohrs kommend, eine bestimmte Körperregion zu treffen. Finden sie den Weg dank genetischer Codierung oder aufgrund physikalischer 'Kraftfelder'? Verbreiten sie sich stochastisch, oder suchen sie determiniert ihr Ziel?

## Jeffress Verzögerungsmodell 1948

Einen Ansatzpunkt anderer Art erwähnt M. Konishi im Aufsatz<sup>201</sup>. Lloyd A. Jeffress soll während eines Forschungsurlaubs 1948 am Caltech ein Modell vorgeschlagen haben, in dem wahrscheinlich erstmalig die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Leitbahnen betrachtet wird, um die Schallortung eines (nicht näher bezeichneten) Individuums zu beschreiben.



Modell Lloyd A. Jeffress 1948. Das Schaltungsmodell versucht zu erklären, wie das Gehirn Laufzeitdifferenzen zur Ortung einer Schallquelle benutzen kann.

(frei nach im Text bezeichneter Quelle).

Nehmen wir an, die im Bild dargestellte Schallquelle strahlt periodisch kurze Impulse ab. (Im Modell Jeffress werden sinusförmige Zeitfunktionen betrachtet, diese verkomplizieren aber allenfalls das Wesentliche des zu erörternden Vorganges). Dann breiten sich beide durch Linien verdeutlichte Partialwellen in gleichen Zeiten um gleiche Distanzen aus, gleiche Geschwindigkeiten vorausgesetzt. Folglich begegnen sich die Partialimpulse im neuronalen Raum an verschiedenen Stellen, wenn die Quelle ihre Lokalität wechselt. Über den Ort des Eintreffens der Partialimpulse entscheidet einzig die Geschwindigkeit ihres Vorankommens, die *Relativität der Ausbreitung* der Impulse.

<sup>201</sup> Konishi, M.: Die Schallortung der Schleiereule. Spektrum der Wissenschaft, Juni 1993 S.58-71

Das Modell verdeutlicht, daß unter Berücksichtigung endlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit verschieden positionierte Schallquellen unterschiedliche Koinzidenzdetektoren (Neuronen) zu maximaler Erregung bringen. Alle anderen Detektoren liefern, je weiter sie vom Interferenzort entfernt sind, schwächer werdende Ausgaben.

Das Modell ist dem im Abschnitt *Intermediale Abbildungen* angegebenen Modell ähnlich, und dort berechnet worden. Diese Nachrechnungen der Leitgeschwindigkeiten geben allerdings Anlaß zu der Vermutung, daß die in bezeichnetem Artikel abgebildeten, neuronalen Verknüpfungen anders zu interpretieren sind.

Um nun nicht 'Koinzidenzdetektoren' oder andere, zunächst noch unbekannte Gebilde bemühen zu müssen, die den Vergleich auf korrelierende Zeitfunktionen vorzunehmen gestatten, soll in Analogie zu physikalisch-optischen Auffassungen der Begriff der *Interferenz* eingeführt werden. Zwei Impulse oder Wellenzüge mögen an dem Ort in Interferenz stehen, an dem sie *gleichzeitig* ankommen.

Was bis heute unerkannt blieb, sind die vielfältigen, diesem einfachen Modell zuordenbaren, von gewohnt digitalem vollkommen abweichenden Eigenschaften:

- Erstmalig wird ein Schaltungsmodell angegeben, dessen *logische Elemente* (Neuronen, Koinzidenzdetektoren) *nichtdeterministische Aufgaben* erfüllen. Dazu stelle man sich einen Quellort vor, der auf die Mitte zwischen zwei Koinzidenzdetektoren interferenziert. Mal wird mehr der rechts liegende, mal mehr der links liegende Detektor gestreift. Entsprechend funktionieren beide vielleicht nur ab und an. (Diese Aussage ist insofern hochbrisant, als daß sie den prinzipiellen Unterschied zwischen einem interferenziellem Wirkprinzip und den anerkannten Wirkprinzipien digitaler Logikschaltungen ausmacht).
- Wird die Schallquelle als Vorlage im Schallraum um ein Stück  $dx$  nach einer Seite verschoben, wandert ihr Bild im Neuronenraum proportional um ein anderes Stück  $-dx'$  *spiegelbildlich* in die entgegengesetzte Richtung. Offensichtlich stehen *Vorlage* und resultierendes *Bild* in der Proportion  $dx/dx'$  zueinander. Für lineare Systeme wird diese Proportion als *Abbildungsmaßstab*  $M = dx/dx'$  eingeführt. Sofern vorausgesetzt werden kann, daß die Vorlage nicht nur aus einem Punkt bestehen kann (und das sei unter gewissen Einschränkungen gegeben), wird die Vorlage *homomorph* auf das Bild projiziert. Folgend wird - der Optik und Mathematik entlehnt - für solcherart Zusammenhang der Begriff der (neuronalen) *Abbildung* benutzt.
- Die Schärfe der örtlichen Lokalisation  $ds$  eines Impulses steht offensichtlich im Zusammenhang mit der geometrischen Länge  $\lambda$  des Impulses  $ds = k\lambda$ , die geometrische Länge  $\lambda$  wiederum ist über die Ausbreitungsgeschwindigkeit mit der zeitlichen Impulsbreite  $dt$  verknüpft  $v = ds/dt = k\lambda/dt$ .
- Die *Ausgabe eines Neurons* (Koinzidenzdetektors) wird *abhängig von den Leitbahnlängen* der Eingangsanschlüsse. Dieses Verhalten ist insofern spektakulär, als in digitalen Systemen versucht wird, genau dieses strikt zu vermeiden, um leitungsunabhängige oder verzögerungsunabhängige Funktionalität der Baugruppen zu erreichen. (Man stelle sich dazu einen Weihnachtsbaum vor, dessen Kerzen auf Orte von Interferenz gebracht werden müssen, um zu leuchten.)
- Die logische Konsequenz aus der funktionalen Längenabhängigkeit ist die, daß damit *Orte* unabwendbar *logischen Funktionen zugeordnet* werden, und im Umkehrschluß *logische Funktionalität vom Ort abhängig* wird. Mit anderen Worten: bereits an diesem Modell wird erkennbar, daß z.B. ein Nucleus magnocellularis, operativ um wenige Zentimeter verrückt, nicht mehr dieselbe - also nicht mehr seine eigentliche

Aufgabe lösen kann.

- Wenn aber logische Funktionalität ortsabhängig wird, dann *codiert die Hülle eines Nervengebildes funktionelle Eigenschaften*. Folglich beeinflusst bereits die makroskopisch sichtbare, die äußere Form eines Nervengebildes dessen Funktionalität.
- Damit kommt die logische Funktion nicht mehr dem logischen Element zu, sondern dem Ort, dem es zugeordnet ist. Unter Maßgabe maximal vernetzter Elemente wird damit der *logische Signalfluß nicht mehr durch die Leitbahnen gesteuert, sondern durch die Laufzeit- und Lageproportionen des Raumes*. Folglich kann (in gewissen Grenzen) eine *stochastische, nichtdeterministische Verdrahtung* gewählt werden.
- Sollte sich zeigen lassen (und wir werden ein entsprechendes Experiment vorführen und diskutieren), daß sich Laufzeitproportionen lageabhängig ändern, so ändern sich damit *logische Eigenschaften neuronaler Elemente in Abhängigkeit von der momentanen Stellung* oder Lage z.B. eines Körperteils.

Aus dem Modell ist offensichtlich verblüffend viel mehr ablesbar, als bisher angenommen wurde. Unbemerkt hat Jeffress ein erstes Interferenzmodell angegeben, anhand dessen sich bereits wesentliche Eigenschaften *neuronaler* Netzwerke ableiten lassen, die im krassen Widerspruch zu Eigenschaften bekannter, künstlich neuronaler Systeme stehen. Man verdeutliche sich die Konsequenzen des letzten Satzes: "*...die logischen Eigenschaften eines Schaltungselements ändern sich lageabhängig...*" - übersetzt in digitale Logik hieße dies, die Funktion eines Gatters ist nur in Abhängigkeit vom Ort definiert - hier wirkt es z.B. als AND3, und dort als OR3.

Zur Realisierung einer Kommunikation, der gezielten Übertragung einer Information ist folglich nicht die genaue Zuordnung von Millionen von Nervenzellen wichtig, sondern nur die Einhaltung gewisser *geometrischer Proportionen der Übertragungsstrecke*, von *Laufgeschwindigkeiten* sowie der dadurch vorgegebenen *Ortszuordnungen*. Präziser gesagt: Werden Tausende von Impulsquellen (z.B. Sensoren) an wenige, definierte Senkenpunkte (Ohren, siehe Bild) einer mehrkanaligen Übertragungsstrecke (Nervenbahn) geringer Kanalkapazität angeschlossen, und werden ebenso Tausende von multiplikativen Empfängern (im Gehirn) an definierte Quellpunkte ebendieser Übertragungsstrecke angeschlossen, dann entscheidet einzig und allein die ererbte Lage dieser vergleichsweise wenigen Quell- und Senkenpunkte der Übertragungsstrecke zueinander (die *allein* durch die Ausbildung der Lage der Nervenstränge festgelegt wird) über den Ort der Repräsentation eines Fingers im Gehirn. Allgemeiner: Ein neuronales Interferenzmodell gestattet, das ein Spermatozoon nicht die Größe des Universums besitzen muß, um die Ausprägung von 12 Milliarden Neuronen mit jeweils durchschnittlich 7640 Synapsen pro Neuron steuern zu müssen. Ein ungezieltes, wahlloses pilzartiges Wachstum der Neurofibrae (Nervenfasern), verbunden mit gewissen örtlichen Zuordnungen genügt, um neuronale Abbildungen zu ermöglichen. Individuelle Besonderheiten sorgen für unterschiedliche Schärfe dieser Abbildungen, vereinfacht gesagt kann ein neuronales System in vielerlei Weise mit optischen Systemen verglichen werden. Selbst der Begriff der Großhirn- 'Rinde' bekommt einen veränderten Sinn. *Derzeitige AI-Modelle sind formunabhängig*. Ein ART- Netzwerk funktioniert in Freiluftverdrahtung als dreidimensionaler Aufbau, wie flächig auf der Leiterkarte. *Neuronal abbildende Systeme aber sind vergleichbar zur Anordnung eines optischen Schirms formgebunden*, weil mit Leitbahnen definierter und begrenzter Ausbreitungsgeschwindigkeit gearbeitet werden muß. Einzig geometrische Proportionen entscheiden über Bestand und Qualität der Abbildung, solange nicht zusätzlich Leitbahnen vernachlässigbarer Verzögerungszeit eingebracht werden können.

Die Abbildung selbst wiederum benötigt den entsprechend geformten Schirm auf der Vorlagen- wie auf der Bildseite.

Dabei ist es ist für eine interferenzielle Abbildung gleich, welche Art von Information auf den Übertragungsleitungen transportiert wird, solange die einzelne Informationsquelle die 'Spielregeln' einhält, und ausschließlich definierte Impulse mit einem durch die Feuerfrequenz codierten Informationspegel oder logischen Wert benutzt werden. Es spielt für die Impulsübertragung einer einzelnen Übertragungsleitbahn überhaupt keine Rolle, ob sich hinter der in Impulsdichte codierten Information vegetative Meßwerte, reflektorische Regelungen, Schmerz der Haut oder mehreres gemeinsam verbirgt. Es wird alles übertragen, was einen variierenden Schwellwert überschreitet. Folglich gibt es keinerlei Grund, anzunehmen, daß ein bestimmtes Neuron zB. im Rückenmark nur eine einzige Informationsart trägt, die zB. einen bestimmte Bewegungsablauf steuert. Im Gegenteil: die Untersuchung eines spinalen Neurons auf definierte Einflußsphären ist ohne Kenntnis der interferentiell codierten, geometrischen Verschaltungsmöglichkeiten dieses Neurons wenig sinnvoll. Eine Vermessung der (Laufzeit-) Geometrie aber bringt in den meisten Fällen (in *allen* hier angeführten Modellierungen) bereits die interferenzielle Verschaltung - und damit einen Hinweis auf die Funktion - ans Licht. Es ist wenig sinnvoll, den Einfluß eines Nervs auf ein Organ zu untersuchen, daß nicht im *interferenziellen Wirkungskreis* einer Abbildung liegt, wie es wenig sinnvoll ist, nach der Bildprojektion vor, neben oder hinter einer Leinwand zu suchen. So ist es ebensowenig sinnvoll, einen Nerv analysieren zu wollen, von dem vielfache, interferenzielle Verschaltungen in verschiedene Richtungen bekannt sind.

## Rauschverminderung bei paralleler Abtastung

Signale sind im Rauschen vergleichbar zur Aufnahme von ungenauen Meßwerten über Korrelation mehrerer Meßwerte zu finden. Eine Tatsache, der wir z.B. jede Form des Funkempfangs verdanken. Der gesuchte Wert wird durch *sequentielle* Mehrfachabtastung aus dem Gemisch verschiedenster, überlagerter Frequenzen und Störungen herausgeschält.

Es seien  $u_k$  und  $u_o$  normierte Potentiale der Form  $u = U/U_{norm}$  als Abtastwerte einer Zeitfunktion der Form  $u(t)$ .

Eine Folgerung<sup>211</sup> aus dem Satz von Tschebyschew zum schwachen Gesetz der großen Zahlen lautet sinngemäß:

Ist  $u_1, u_2, \dots$  eine Folge paarweise unabhängiger Zufallsgrößen mit den Erwartungswerten  $E(u_1) = E(u_2) = \dots = u_o$  deren Varianzen gleichmäßig beschränkt sind, d.h.  $D(u_k) \leq C \cdot k$ , so ist die Folge dem schwachen Gesetz großer Zahlen unterworfen, es gilt für beliebiges  $\varepsilon > 0$ :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\left|\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n u_k - u_o\right| < \varepsilon\right) = 1$$

Die Folge heißt konvergent in Wahrscheinlichkeit gegen die Zufallsgröße  $u_o$ .

Die Gleichung besagt etwa folgendes:

Eine Anzahl beliebig gestörter, unabhängiger Meßwerte  $u_k$  repräsentiert mit einer Wahrscheinlichkeit, die beliebig nahe bei Eins liegen kann, je höher die Versuchszahl ist, den Erwartungswert  $u_o$ .

Diese Folgerung ist offenbar für Nervensysteme zutreffend. Mittels geeignet ausgeführter

<sup>211</sup> siehe auch: Bronstein, I.N., Semendjajew, K.A.: Taschenbuch der Mathematik. 20. Aufl. BSB Teubner, Leipzig, 1981, S. 713, Glg. (5.68).

Korrelation, so zeigt die Anwendbarkeit eines mit einem Averager ausgestatteten EEG-Gerätes, gelingt es, gesuchte, einzelne Impulse, deren zeitlicher Bezug durch Fremderregung bekannt ist, aus der einzelnen Zeitfunktion eines Nervs herauszuschälen.

Nehmen wir an, uns steht ein Signal  $u_k$  mit einem Rauschpegel von  $u_r$  und mit einem gesuchten Signalpegel von  $u_s$  zur Verfügung.

$$u_k = u_r + u_s.$$

Der Rauschpegel  $u_r$  möge viel größer als der Signalpegel  $u_s$  sein, sodaß das Signal nicht erkennbar ist. Im Falle des Funkempfängers wissen wir, daß dieser gesuchte Signalpegel mehrfach vorhanden ist, er kehrt periodisch mit der Sendefrequenz wieder. Tasten wir die Empfangsantenne synchron zur Sendefrequenz des gesuchten Signals an  $n$  Stützstellen ab, und summieren wir diese Abtastwerte, so sinkt der Rauschpegel relativ zur Anzahl der Messungen oder Stützstellen. Offenbar läßt sich für den einzelnen Abtastwert schreiben:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n u_k = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (u_{rk} + u_{sk}) = u_o$$

$$\text{(woraus auch folgt: } \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (u_{rk}) = 0 \text{),}$$

d.h.. der Mittelwert des Rauschens über unendlich lange Meßreihen wird zu null.

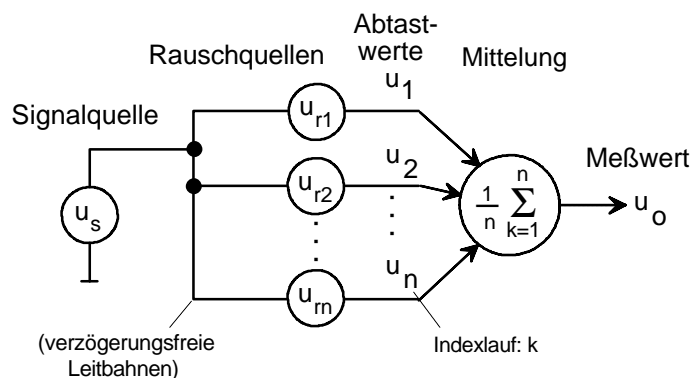
Wandeln wir die Interpretation dieser Gleichung ein wenig vom Gewohnten ab. In allen bisher verwendeten Gleichungen steht nirgends ein Zeitbezug. Die sequentielle oder serielle Abtastung zur Meßwertgewinnung wird als Plausibilitätsannahme zwar vorausgesetzt, sie ist aber keinesfalls erforderlich.

Auf der Suche nach der Messbarkeit eines einzelnen Ereignisses, daß sich *nicht* mittels serieller, zeitlicher Korrelation finden läßt (weil es z.B. nur zu einem Zeitpunkt auftritt, und die Wiederkehr ungewiß oder unbekannt ist), hilft nur die parallele, zeitgleiche Abtastung mehrerer 'Antennen', um dieses Ereignis zu finden. Derartige Techniken werden z.B. bei der Parallelschaltung von Radioteleskopen benutzt.

Wir kommen unweigerlich zu einer *parallelen* Abtastung, die bei gleicher Zahl der Abtastungen eine zur sequentiellen Art gleiche Genauigkeit des Meßergebnisses liefert, die aber nicht die Bekanntheit eines Synchroncodes des Senders beim Empfänger voraussetzt. (Diese parallele Korrelation kann z.B. als Grundlage optischer Abbildungen betrachtet werden.) Dabei soll zunächst noch ein Zeitbezug ignoriert werden, wir nehmen an, die einzelnen Signale breiten sich hinreichend schnell aus.

#### Ersatzschaltbild der parallelen Mittelung verrauschter Signale.

Ein allen Abtastwerten überlagerter Signalanteil läßt sich aus dem Rauschen heraus-schälen, indem  $n$  Abtastungen in Gleichzeitigkeit vorgenommen werden. Je höher die Anzahl übertragender Kanäle, desto höher ist  $n$ , desto stärker wird das Rauschen unterdrückt (siehe Glg.). Die Abtastwerte werden stets gleichzeitig abgetastet.

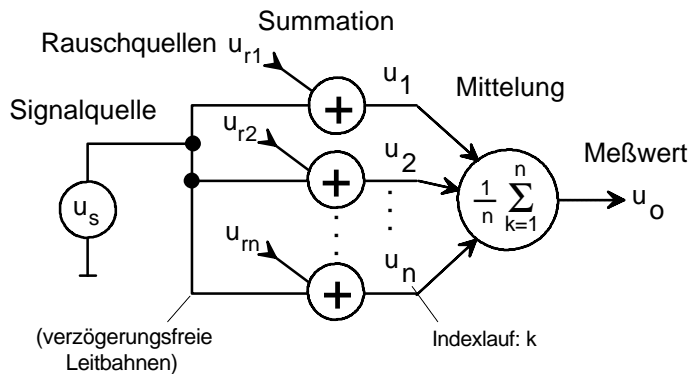


Stellt man sich unter den Rauschquellen Nervensignale unbekannter Herkunft vor, die auf die entsprechende Nervenbahn aufaddiert werden, so wird die Güte der Regenerierbarkeit eines Meßwertes an einem mit paralleler Korrelation arbeitenden Empfänger umso mehr steigen, je

mehr Kanäle  $n$  zwischen Signalquelle und Signalempfänger angeordnet sind. In die Sprache der Nervenwelt übersetzt, kann ein Signal beliebig stark gestört sein, solange mindestens die nach der Tschebyschew-Ungleichung diktierten Verhältnisse zwischen Varianz  $DX$ , Abweichung  $\epsilon$  und Wahrscheinlichkeit  $P$  der Folge  $\{X_n\}$  mit dem Erwartungswert  $EX$  gelten.

$$P(|\{X_n\} - EX| \geq \epsilon) \leq \frac{DX}{\epsilon^2} \quad (\text{Tschebyschew-Ungleichung})$$

Folglich ist es aus signaltechnischen Gründen höchst unplausibel, Zeitfunktionen auf gestörten, mehrfach benutzten Übertragungsstrecken (Nerven) mit wenigen Kanälen übertragen zu wollen. Im Gegenteil: Ein Signal kann umso besser rekonstruiert werden, auf je mehr Kanälen es parallel übertragen wird.



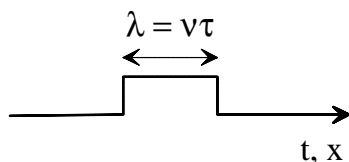
Verknüpfung partiell ineinander verschachtelter Leitsysteme.

Fremde Einstreuungen können als Rauschquellen betrachtet werden, solange sie unkorreliert zueinander sind.

Eine wesentliche Konsequenz aus dem Ansatz der summativen Verknüpfung von Signalen muß die paarige Gleichverteilung von über und unter dem aktuellen Signalwert liegenden Rauscheinflüssen sein, um den Meßwert prinzipiell rekonstruierbar zu machen. Folglich haben die Rauschquellen zumindest statistisch in gleichem Maße positiv (stimulierend) wie negativ (hemmend) zu wirken, unabhängig davon, wie genau diese Modellierung die tatsächlichen Abläufe am Nerv darstellen kann.

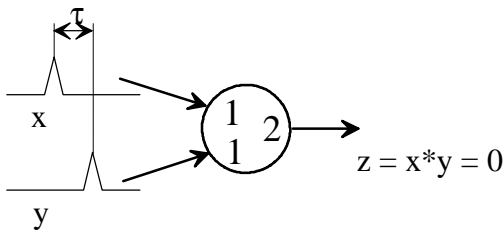
## Wettlauf-Schaltungen, Raum-Zeit-Dualität

In der digitalen Schaltungstechnik werden Wettlaufschaltungen i.a. vermieden. Große, digitale Systeme sind nahezu ausschließlich als synchrone Architekturen ausgeführt. Taktsynchronisierte Latches sorgen für ein Einschwingen aller Informationen, ehe der nächste Arbeitsschritt ausgeführt wird.



a) Geometrische und zeitliche Impulslänge sind über die Leitgeschwindigkeit  $v$  miteinander verknüpft.

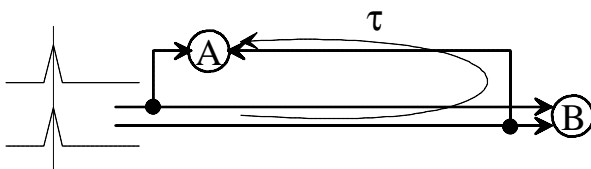




b) Für eine Modellierung  $\{0...1\}$  einer Schwellwertfunktion zB. vom Typ des logischen AND muß Gleichzeitigkeit des Eintreffens der Impulse vorausgesetzt werden.

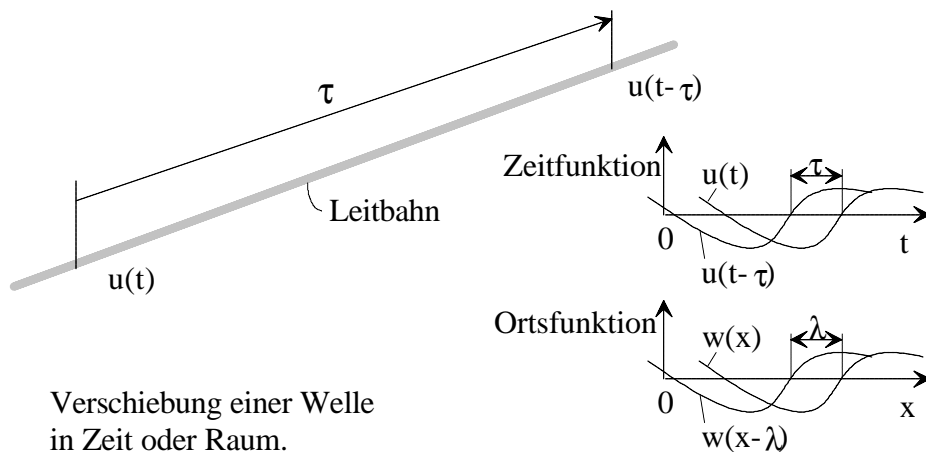
Systeme, die ohne Synchronisation arbeiten, werden oft als Wettlaufschaltungen bezeichnet. Sämtliche Überlegungen zu interferenzieller Wirkungsweise gehen von der Betrachtung endlicher Laufgeschwindigkeiten aus. Folglich führt genau die Betrachtung der in der Computertechnik unnützen 'Races' oder 'Hazards' zum tieferen Verständnis biologischer Informatik. Synchronisation in der Biologie ist nicht möglich. Folglich muß sich das einzelne Signal selbst synchronisieren, indem es auf *mehreren* Wegen übertragen wird.

Alle hier dargestellten Leitbahnen sind nichtideal, sie bringen eine Information in einer bestimmten Zeit nur um ein definiertes Stück voran, man betrachte dazu die Beispiele.



c) Obwohl Neuron A und Neuron B von gleicher Funktion sein mögen, reagieren sie nicht gleichartig auf gleiche Impulsbelegungen.

Im Gegensatz zur synchronisierten Logikschaltung sind bei der Untersuchung von Wettlaufschaltungen die *Zeitfunktionen der Signale* zu betrachten, nicht nur ihr Signalwert zu einem bestimmten Synchronisationszeitpunkt.



Verschiebung einer Welle in Zeit oder Raum.

Eine Zeitfunktion  $u(t)$  wird beim Passieren eines Leitbahnstückes der Länge  $\tau$  verschoben zu  $u(t-\tau)$ . Besitzt die Leitbahn eine homogene Geschwindigkeit  $v$ , kann die Veränderung ebenso auf den Weg bezogen werden. Mit  $x = vt$  sind Ortsfunktionen  $w$  den Zeitfunktionen  $u$  zuordenbar

$$u(t) = w(x/v),$$

$$u(t-\tau) = w(x/v - x/\tau).$$

Zwischen  $w$  und  $u$  besteht im mathematischen Sinne Gleichheit, im physikalischen Sinne 'sehen

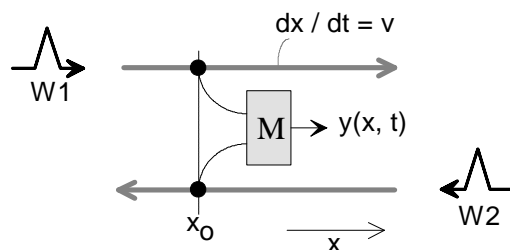
Orts- und Zeitfunktionen oft gleich aus', sind aber inhaltlich völlig verschiedene Dinge.

## Zum Interferenzbegriff

Freie Wellenausbreitung in optischen Systemen ist an die freie und zumeist geradlinige Ausbreitung von Strahlen gebunden. Impulswellen in elektrischen Systemen folgen der beliebigen Krümmung oder Knickung der (neuronalen) Leitbahnen. Optische Interferenzen (Überlagerungen) sind in diesem Sinne als Spezialfall elektrischer Interferenzsysteme für periodische Erregung in isotropen Medien anzusehen.

Angenommen, irgendeine stochastische Verbindung von Neuronen bewirkt, daß ein signaltragender Impuls in verschiedene Richtungen verzweigt. Dann ist die Wahrscheinlichkeit der Erregung eines die verschiedenen Partialimpulse empfangenden Neurons umso höher, je geschlossener die Partialimpulse ihr Ziel erreichen.

Nehmen wir zunächst den nichttrivialen Fall an, mit den Werkzeugen der integrierter Schaltungstechnik ließe sich eine elektrische Leitbahn konstruieren, die einen nadelförmigen Impuls mit nicht vernachlässigbarer Laufzeit, aber konstanter Ausbreitungsgeschwindigkeit  $dx/dt = v$  verlustfrei und hinreichend dispersionsarm transportiert. Dabei möge es genügen, daß dieser Impuls monodirektional auf einer Leitbahn transportiert werden kann. Auch seien parasitäre Induktivitäten und Kapazitäten in und zwischen den Leitbahnen zunächst vernachlässigbar. Der in normierten Einheiten gemessene Ruhepegel sei Null, die Impulsspitze möge die Amplitude 1 besitzen.



Zum Interferenzbegriff  
zwischen Leitbahnen.

An der Stelle  $x_0$  begegnen sich zwei Impulse  $p_1(x, t)$  und  $p_2(x, t)$ . Zwischen den Leitbahnen sei ein in  $x$ -Richtung verschiebbarer Detektor  $M$  angebracht, der die Momentanwerte der Funktionen miteinander multipliziert, und der das Ergebnis

$$y(x_0, t) = p_1(x, t) p_2(x, t)$$

ausgibt. Wird der Detektor entlang der  $x$ -Achse verschoben, so zeigt sich zu einem definierten Zeitpunkt genau an der Begegnungsstelle der Impulse  $x_0$  ein von null abweichendes Ergebnis am Ausgang des Detektors. An allen anderen Stellen  $x \neq x_0$  verschwindet  $y$ .

Nur hier sind die zu multiplizierenden Zeitfunktionen so gestaltet, daß deren Maxima gleichzeitig erscheinen und übereinander liegen. An allen anderen Orten erscheinen sie ungleichzeitig.

Für den Spezialfall, daß beide Impulse von gleicher Gestalt sind

$$p_1(t) = p_2(t) = p(x_0, t),$$

gilt für den Momentanwert an der Stelle  $x_0$  die Zeitfunktion

$$y(t) = p^2(x_0, t).$$

Der Ergebnisimpuls ist die Quadratfunktion der Erregungsimpulse; im informationstechnischen Sinne verbessert sich der Rauschabstand, der Ergebnisimpuls wird hervorgehoben.

Zunächst genügend scharfe Impulsnadeln vorausgesetzt, verschwindet das Ergebnis rechts und links des Ortes  $x_0$ . Die Breite der Zone  $\{x_0\}$ , innerhalb derer Teile der Impulsüberlagerung nachzuweisen sind, kann bestimmt werden über die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v_0$  auf den Leitungen:

$$\{x_0\} = v_0 \text{length}(p) = v_0 \lambda,$$

wobei  $\lambda$  die (geometrische) Impuslänge darstellt. Die Gestalt der Zone  $\{x_0\}$  nimmt für den Sonderfall symmetrischer Impulse  $p(t) = p(-t)$  die Form des quadrierten Impulses an,

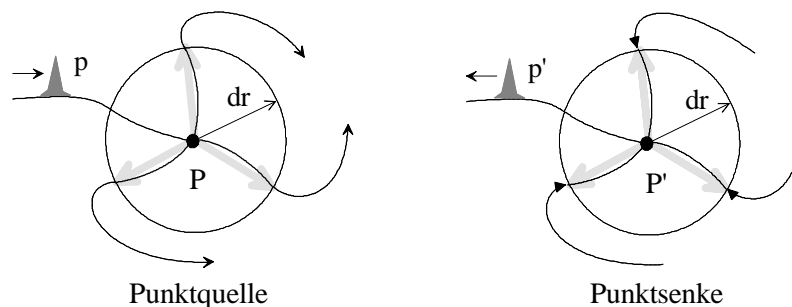
$$y(x) = v_0 p^2(x)$$

als Proportionalitätskonstante wirkt die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v_0$ . Die erreichbare Höhe  $y$  des Impulses in Abhängigkeit vom Ort ist eine Funktion des Ortes; je näher wir der Stelle  $x_0$  kommen, desto höher wird die erreichbare Ausgangsamplitude, wenn gaußförmige Impulse betrachtet werden.

### Interferenz auf Leitbahnen

Nehmen wir an, eine Punktquelle (zB. der Antennenverstärker einer Hausverteileranlage) sendet einen Wellenzug  $p(x,t)$  vom Punkt  $P$  ausgehend auf verschiedenen Kabeln in verschiedene Richtungen. Dann kommt eine beliebige Information (Welle, Impuls) nach der Zeit  $dt$  bei Empfängern im Abstand  $dr$  an. Umgekehrt wäre es denkbar, in alle Leitungen im Umkreis  $dr$  identische Signale einzuspeisen, die sich zum Zentrum  $P'$  hin ausbreiten.

Im Zentrum wäre nur dann das unverfälschte Originalsignal regenerierbar, wenn alle Teilquellen *synchron* zueinander im *gleichen* Abstand  $dr$  sendeten. Sendet eine der Quellen asynchron, oder wäre eine Signalquelle im falschen Abstand angeordnet, käme in Abhängigkeit vom Verfahren der Zusammenfassung der Signale ein mehr oder minder gestörtes Ergebnissignal  $p'$  zustande. Eine Rekonstruktion des Originalsignals wäre aber auch dann möglich, wenn eine Teilquelle zeitlich um  $dt'$  zueinander versetzt zu den anderen sendete, sie aber gleichzeitig um  $dr'$  verschoben zu den anderen angeordnet wäre, wenn  $dt'$  und  $dr'$  über die (konstant angenommene) Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v = dr/dt$  verbunden sind,



$$dr = v dt \quad \text{bzw.} \quad dr' = v dt' .$$

Die Möglichkeit einer vollständigen Rekonstruktion der in den Impulswellen steckenden Information ist folglich orts- und zeitgebunden. Es ist nicht möglich, ein Signal auf dem Wege der Multiplikation aller drei Leitungsimpulse zurückzuerhalten, wenn der Ort  $P'$  falsch gewählt wird, oder einer der Wellenzüge fehlerhaft synchron zu den anderen eingespeist wird.

## Eindimensionale, neuronale Abbildung

Jeffress Modell der Schallortung kann zu einem zweiseitigen, neuronalen Modell erweitert

werden, indem der Schallraum durch einen Laufzeitraum spikender Neurone ersetzt wird. Dann tritt offenbar eine vergleichbare Abbildung sendender Neuronen auf empfangende Neuronen auf.

Gegeben sei dazu folgende Versuchsanordnung. Ein Impulsgenerator  $G$  erzeugt an seinen Ausgängen identische, symmetrische Impulse mit der Zeitfunktion

$$p_1(t) = p_2(t) = p(t) = u_0 f(t)$$

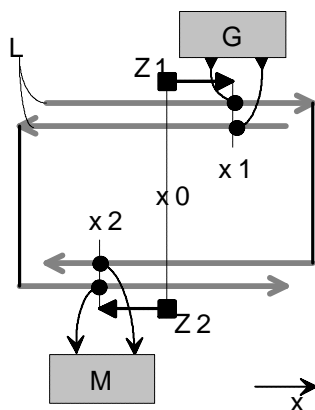
die an der Stelle  $x_1$  in ein Leitungspaar  $L$  eingespeist werden. Sie mögen das Leitungspaar nur mit einer endlichen Geschwindigkeit  $dx/dt = \pm v$  und ausschließlich in der angegebenen Richtung passieren können.

Unter Vernachlässigung der hier vernachlässigten Ausbreitungszeit in  $y$ -Richtung besitzt das 'Wellenpaar' die Ortszeitfunktionen

$$u_1(x, t) = u_0 f(t + x/v)$$

$$u_2(x, t) = u_0 f(t - x/v)$$

Die entgegengesetzt verlaufenden Wellenzüge werden sich auf der gegenüberliegenden Seite begegnen, die Vorzeichen alternieren entsprechend. Sie überlagern sich im Multiplizierer  $M$ . Die Erregungen erzeugen auf der Überlagerungsseite ein ortsabhängiges Produktsignal der eingangs dargestellten Charakteristik. Vom Multiplizierer ist nur dann ein Ausgangssignal zu erhalten, wenn er an dem Punkt angeschlossen wird, an dem sich beide Wellenzüge wiederbegegnen. Gegenüber einem Referenzpunkt  $x_0 = 0$  entsteht folglich eine Abbildung eines Zeigers  $Z1$  auf einen Zeiger  $Z2$  so, daß beide Zeiger gleich lang sind. Je größer die Abweichung  $(x1 - x0)$  ist, desto größer wird der Zeiger  $(x2 - x0)$ .



Eindimensionale, neuronale Abbildung.

Ein Generator  $G$  speist am Ort  $x1$  Impulse gleichzeitig in beide Leitbahnen  $L$  ein. Ein multiplizierender Empfänger  $M$  liefert nur am Ort der Interferenz  $x2$  eine Ausgabe.

Ein Zeiger  $Z1$  wird dabei auf einen Zeiger  $Z2$  abgebildet.

Die Nutzung von Impulswellen, so zeigt diese Schaltungsanordnung<sup>221</sup>, gestattet es, einen Abstand  $x$  auf der Senderseite in einen Abstand  $-x$  auf der Empfängerseite zu übertragen. Wir haben es folglich mit dem einfachsten Fall einer eindimensionalen Abbildung zu tun. Zwei Signalleitungen - im folgenden als Übertragungskanäle oder einfacher als Kanäle bezeichnet - sind mindestens erforderlich, um eine eindimensionale Abbildung erzeugen zu können. Um auf der Empfängerseite nicht nach dem Bildpunkt  $x_2$  suchen zu müssen, empfiehlt es sich, mehrere Multiplizierer im engen Abstand  $dx$  anzubringen. Die Strecke  $dx$  repräsentiert dann die maximal zu übertragende Auflösung der Abbildung. Auf der Sendeseite sind analog dazu im Abstand  $dx$  Impulsgeber anzubringen.

<sup>221</sup> Die Erkenntnis der monodirektionalen Abbildung verursachte eine Erkundung der Materie. Ausgangspunkt war die Beschäftigung mit einem bildgebenden Radarverfahren, als morgens auf dem Weg mit der Tochter zum Kindergarten die Idee der natürlichen Adressierung, der natürlichen Bildübertragung durch die Gegeneinanderstellung zweier, neuronaler Laufzeiträume entstand. Die erste Darstellung einer monodirektionalen Pulsabbildung war auf den 9.10.1992 datiert.



bezeichnet. Die Tabelle zeigt die jeweils um einen Halbschritt sich gegeneinander bewegenden Vektoren. Grau gefärbte Bereiche geben das volle Matrixraster an, nicht getönte Spalten zeigen den Halbschritt. Soll eine contradirektionale Abbildung in ein Matrixraster treffen, zeigen sich praktische Schwierigkeiten im Umgang mit diskreten Partialprodukten: Vorteilhaft sind Vektorelemente mit der Wellenlänge des *zweifachen* Matrixabstandes zu wählen. Im unteren Tabellenteil sind die von null verschiedenen Produkte zusammengefaßt. Die Partialprodukte sind spaltenweise *ohne* Übertragsbildung zwischen den Spalten zu summieren. Für die Mittelspalte gilt zB.

$$p_0 = \sum_{i=0}^n x_i y_i.$$

Die im Halbraster rechtsliegenden, positiv indizierten Matrixspalten erhalten die Partialprodukte

$$p_{+j} = \sum_{i=0}^n x_{i+j} y_i.$$

Im Halbraster linksliegende, negativ indizierte Spalten werden mit den Partialprodukten

$$p_{-j} = \sum_{i=0}^n x_i y_{i+j}$$

gebildet.

Das Ergebnis ist dem einer mit Partialprodukten entwickelten Multiplikation ähnlich. Man vertausche dazu die Reihenfolge der Elemente des  $X$ - Vektors ( $X^+$  statt  $X$  einsetzen). Es entstehen die Partialprodukte einer gewöhnlichen Multiplikation, wenn die Elemente der Vektoren in Indexreihenfolge die Stellen der zu multiplizierenden Zahlen bezeichnen. Der gravierende Unterschied besteht im Verbot, bei der Interferenz- Addition der Partialprodukte Überträge zu bilden, jeder Übertrag beeinflusst das nebenstehende Element!

Von einer Interferenz erwarten wir die Modellierbarkeit einer (interferenziellen) Abbildung. Wie durch Einsetzen entsprechend vertauschter Elemente in der Tabelle zu zeigen ist, zeigt unser bidirektionales Interferenzprodukt die Eigenschaft der Spiegelsymmetrie.

$$X^- \cdot Y^+ = (X^+ \cdot Y^-)^-$$

### Beispiele

1) Mit dualer Impulshöhenangabe gilt z.B.

$$X^+ = (0101), Y^+ = (1000)$$

$$X^+ \cdot Y^- = 0101 \cdot 0001 = 0000101$$

$$X^- \cdot Y^+ = 1010 \cdot 1000 = 1010000 = (X^+ \cdot Y^-)^-.$$

2) Dezimale Impulshöhenangabe liefert z.B. bei symmetrischer, wie unsymmetrischer Impulsform

$$X^+ = (0132), Y^+ = (2000)$$

$$X^+ \cdot Y^- = 0132 \cdot 0002 = 0000264$$

$$X^- \cdot Y^+ = 2310 \cdot 2000 = 4620000 = (X^+ \cdot Y^-)^-.$$

Unter  $X^+ \cdot Y^-$  wäre zB. die sendeseitige Ausgabe der Impulse zu verstehen, unter  $X^- \cdot Y^+$  die empfangsseitige Verarbeitung. Deutlich ist die Spiegelsymmetrie zwischen Sendung und Empfang im Beispiel zu erkennen. (Im Beispiel dezimal codierter Impulshöhen wurde der Wertevorrat auf  $\{-9...+9\}$  beschränkt, um Übersichtlichkeit zu wahren). Unbesetzte Matrixpositionen werden mit null belegt gedeutet.

### Interferenzprodukt als Faltungsintegral

Hinter den gewonnenen Interferenzprodukten sind Faltungsprodukte zu erkennen. Ein

einzelnes Partialprodukt gegeneinander laufender Funktionen  $g(x)$  und  $h(y)$  (dabei mögen die Achsen  $x$  und  $y$  gegeneinander orientiert sein)

$$p_i(x, y) = g(x) h(y)$$

kann mit der Substitution  $y = (\xi - x)$  umgeformt werden zu

$$p_i(x) = g(x) h(\xi - x)$$

Die Summation aller Folgewerte liefert das an einem Ort gewonnene Interferenzprodukt.

$$p(x) = \sum_{i=0}^{\xi} g(x) h(\xi - x)$$

Bei feiner werdender Unterteilung mit  $g(x) \rightarrow g(x)dx$  und  $h(\xi - x) \rightarrow h(\xi - x)dx$  geht die Summe nach bekannten Regeln in das Faltungsintegral

$$p(x) = \int_0^{\xi} g(x) h(\xi - x) dx$$

über. Faltungsintegral wie diskretisierte Faltungssumme sollen im folgenden als Faltungsprodukt

$$p(x) = g(x) * h(\xi - x)$$

gekennzeichnet werden. Es ist zu beachten, daß das Faltungsprodukt in seiner Form für Interferenzanwendungen oft nicht in Abhängigkeit von der Zeit als Parameter, sondern meist in Abhängigkeit vom Ort ( $x$ ) benötigt wird.

## Diskretes Interferenzprodukt unter beliebigem Winkel

### Bitfolgen (zeitdiskret)

Zwei Wellenfronten, deren Zeitfunktionen in Vektordarstellung als zeitdiskrete Zahlenfolgen in der Form

$$X^- = (x_0, x_1, \dots, x_n)$$

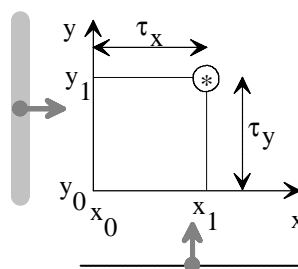
$$Y^- = (y_0, y_1, \dots, y_n)$$

vorliegen, und die unter beliebigem Winkel auf einen Operator  $p_0$  (i.a. Multiplizierer) treffen, liefern das für  $p_0$  hergeleitete Interferenzprodukt

$$p_0 = \sum_{i=0}^n x_i \otimes y_i.$$

Der Operator  $\otimes$  soll symbolisieren, daß Interferenz nicht ausschließlich an Produktbildung gebunden ist. Schwellwertbehaftete Summen etc. sind unter Beachtung ihrer Spezifik ebenfalls nutzbar.

Zur Interferenz zwischen aus verschiedenen Richtungen kommenden Wellenzügen.



Benachbarte Matrixpunkte erhalten die Informationen aus einer der Richtungen  $x, y, z, \dots$  früher oder später. Entsprechend zeitversetzt erscheint die jeweilige Impulsfolge am Matrixort. Beträgt der Abstand zwischen dem betrachteten Matrixelement und einem Ursprungselement  $+j$  Einheiten in  $x$ -Richtung, und  $+k$  Einheiten in  $y$ -Richtung, wobei  $x$ - und  $y$ -Richtung nicht

notwendig geometrisch orthogonal zueinander stehen müssen, erscheint die Interferenz unter Voraussetzung einer Impulsfolge, deren Wellenlänge den doppelten Matrixabstand ausmacht, um ebenso viele Schritte in  $x$ - und in  $y$ - Richtung verschoben.

$$p_{j,k} = \sum_{i=0}^n x_{i-j} \otimes y_{i-k}$$

Im Gegensatz zur contradirektionalen Überlagerung tritt hier schon eine Besonderheit der orthogonalen (bzw. der allgemeinen) Interferenz zutage. Zwei orthogonal sich überlagernde Kanäle bilden eine fliehende, diagonal über die Matrix laufende Impulswelle aus. Zur örtlichen Lokalisation eines zweidimensionalen Interferenzbildes sind folglich mehr als zwei Übertragungskanäle erforderlich. Bei der Betrachtung von *Phantombildern* werden wir auf diesen Umstand näher eingehen.

## Kontinuierliches Interferenzprodukt unter beliebigem Winkel

Sind die interferierenden Impulsgruppen als Zeitfunktionen zB. in der Form

$$x(t) = \delta(t_0) + \dots + \delta(t_n)$$

$$y(t) = \delta(t_0) + \dots + \delta(t_n)$$

beschrieben, kann die Interferenz als Produkt oder als Schwellwertsumme dieser Zeitfunktionen im Sinne einer Faltung aufgefaßt werden, wobei der Zeitversatz zum Ausgangselement, dem Bezugszeitpunkt  $t = 0$  der Funktionen als Verschiebung um die jeweilige Laufzeit  $\tau_x$ ,  $\tau_y$  zu beachten ist.

$$p_{x,y}(t) = x(t - \tau_x) \otimes y(t - \tau_y)$$

mit  $\tau_x = \frac{x_1 - x_0}{v_x}$ , und  $\tau_y = \frac{y_1 - y_0}{v_y}$ .

Analog ist bei Interferenz mehrerer ( $>2$ ) Zeitfunktionen zu verfahren. Eine Lösung eines Faltungsintegrals als allgemeine Regel zur Multiplikation von Zeitfunktionen ist in dieser Darstellung nicht erforderlich. Für numerische Berechnungen genügt es, die entsprechend zeitversetzten Funktionen miteinander zu verknüpfen, sie miteinander 'zu falten' (Multiplikation, Addition, Schwellwert, geometrisches oder arithmetisches Mittel...), um die Zeitfunktion im Ort  $p_{x,y}(t)$  zu erhalten.

Stehen hingegen geeignete Fourier- oder Laplacetransformierte (F.- oder L.- Integrale) der interferierenden Funktionen zur Verfügung, und soll eine allgemeine, analytische Lösung eines spezifischen Interferenzproblems in Integralform gefunden werden, kann in klassischer Manier der entsprechende Faltungssatz zur Ermittlung der allgemeinen Lösung herangezogen werden. Der ortsabhängige Zeitversatz der L.- Transformierten der Zeitfunktionen ergibt sich zB. als Multiplikation der Laplace- Transformierten mit einem Verschiebungsoperator.

$$L\{f(t - \tau)\} = e^{-\tau p} L\{f(t)\}$$

Einschränkungen ergeben sich hinsichtlich der Wahl des Operators (nur als Produkt), der Behandlung der Interferenz mehrerer, in einem Ort interferierender Zeitfunktionen, sowie der i.a. komplizierten Rücktransformation in den Zeitbereich.

$$f(t) = f_1(t) * f_2(t) = \int f_1(\tau) f_2(t - \tau) d\tau$$

Ist eine analytische Zeitfunktion als Ergebnis gesucht, erscheint es günstiger, die Faltung direkt im Zeitbereich durch additive Integralzerlegung oder partielle Integration auszuführen, siehe auch <sup>23]</sup> oder <sup>24]</sup>. Es ist zu erkennen, daß die derzeit verfügbare Mathematik nicht allzu üppige Mittel bereithält, um z.B. additive Mehrfachfaltungen (d.h. Faltungen mehrerer Kanäle mit

<sup>23]</sup> Dobesch, H.: Laplace- Transformation von Abtastfunktionen. Verlag Technik Berlin, 1970

<sup>24]</sup> Zypkin, J.S.: Theorie der linearen Impulssysteme. R. Oldenburg- Verlag München, 1967



summativer Überlagerung) beschreiben zu können.

## Matrix- Darstellung

Die Multiplikation zweier, verkettbarer Matrizen (die Spaltenzahl der ersten Matrix ist gleich der Zeilenzahl der zweiten Matrix) liefert Interferenzprodukte zweier Interferenzvektoren. Zunächst seien die Vektoren  $A = (a_i)$  vom Typ  $\{1, n\}$  und  $B = (b_i)$  vom Typ  $\{n, 1\}$  zu multiplizieren. Als Ergebnis entsteht eine einelementige Matrix  $C$  vom Typ  $\{1, 1\}$

$$C = A * B = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & \cdots & a_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} = (c_1),$$

$$c_1 = a_1 b_1 + a_2 b_2 + \dots + a_n b_n.$$

Sind orts- oder zeitverschobene Interferenzorte einzubeziehen, geschieht dies zweckmäßigerweise durch Verschiebung der Elemente der Vektoren und Ergänzung von null an unbesetzten Stellen.

Die Berechnung mehrerer, orts- oder zeitversetzter Vektoren kann in Matrizen zusammengefaßt werden. Die Multiplikation der entstehenden Bandmatrizen erfolgt analog zur Berechnung der Summe der Partialprodukte. Zur effizienten Lösung von Bandmatrizen mit systolischen Algorithmen sind hinreichend viele Publikationen erschienen, vgl.<sup>25)</sup>

Zur diskreten Lösung eines  $n$ - kanaligen Interferenzproblems sind  $n$  Bandmatrizen zu multiplizieren. Die Lösungsvielfalt der Ergebnismatrix  $C$

$$C = A_1 * A_2 * \dots * A_n$$

enthält die für jeden Interferenzort möglichen Interferenzprodukte für alle Orte der Matrix. Die in der behandelten Summation von Partialprodukten auftretenden Halbbraster- Belegungen entfallen in der Matrixdarstellung.

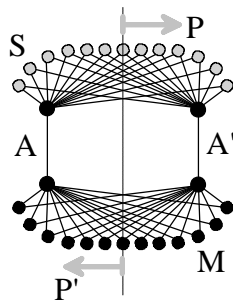
## Interferenznetze

Im folgenden Abschnitt sollen Möglichkeiten der Gestaltung von Interferenz- Netzwerken aus physikalischer Sicht diskutiert werden.

## Vernetzungsalgorithmus

Planlose Verdrahtung ist nicht einer ziellosen Informationsverteilung gleichzusetzen. Adäquat zur bereits dargestellten technisch relevanten Form der Interferenz- Abbildung ist die biologierelevante Form, bei der jeder Sender und Empfänger über separate Anschlüsse an Quell- und Senkenknoten der Übertragungsleitung angeschaltet ist.

<sup>25)</sup> Kung, H.T., Leiserson, C.E.: Systolic Arrays for VLSI. CMU-CS-79-103/ MCS 75-222-55, Dept. of Comp. Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, 15213, USA, Dec. 1978.



Eindimensionale, neuronale Interferenzabbildung [Heinz92]. Zur Übertragung einer  $n$ -dimensionalen Abbildung sind  $n+1$  Kanäle erforderlich.

Impulssender S  
Multiplizierer M  
Übertragungsstrecken A, A'  
Vorlage P  
Bild P'

Eine Abbildung zwischen Sender  $S$  und Empfänger  $M$  entsteht zB. nur dann und nur an der Stelle, an der die Laufzeiten eines Impulspaares über die Übertragungsleitungen  $A$  und  $A'$  identisch sind. Es wird deutlich, daß der *Algorithmus zur Gestaltung* von Verbindungen einfacher ist, als beispielsweise die Verlegung einer Hausklingelanlage entsprechender Kanalkapazität.

#### Vernetzungsalgorithmus für Interferenzabbildungen (mono- und bidirektional):

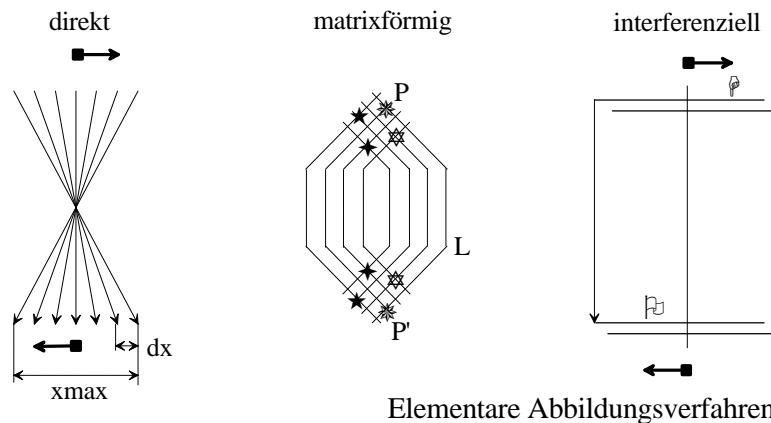
- ♦ *Gestalte die Hüllengeometrie von Sender und Empfänger ähnlich.*
- ♦ *Verlege die Übertragungsleitungen ( $A, A'$ ) koordinatentreu;*
- ♦ *Schließe jeden Sender/Empfänger ( $S, M$ ) auf kürzestem Wege an die Knoten der Übertragungsleitungen an;*

Randbedingungen sind die, daß Orte, auf die Sender bzw. Empfänger lokalisiert sind, strengen Zeitbedingungen unterliegen, und daß alle Sender *asynchron* zueinander pulsen. Interferenzen zwischen Orten müssen möglich sein, und sollten nicht mehrfach vorkommen. 'Wischende' Fehlinterferenzen sind zu vermeiden, siehe Abschnitt *Unterbestimmte Abbildungen*. Auch ist die entstehende Abbildung noch nicht störsicher, siehe dazu Abschnitt *Systemoptimierung*.

Es wird deutlich, daß zum Zustandekommen einer fehlerfreien Puls- Interferenzabbildung nicht einmal ein Verdrahtungsplan, wie ihn jeder Elektriker benutzt, vonnöten ist. Worin aber sollen die spezifischen Vorteile einer Interferenzabbildung gegenüber anderen Kommunikationsarten bestehen, worin liegt der Ursache der Nutzung von Interferenzabbildungen durch die Natur?

## Genetisches Codevolumen

Einerseits ist bekannt, daß in unserem Körper jede nervale Informationsübertragung an Impulse gekoppelt ist. Andererseits ist die Frage nach plausiblen Vernetzungsstrategien für biologische Objekte eng an den Umfang ihres Codevolumens gebunden. Je geringer das nötige Codevolumen ist, desto wahrscheinlicher (zur Potenz) kann die Evolution einen Code finden, und desto eher kann sie gelernt haben, ihn von Individuum auf Individuum zu vererben. Folglich ist die Frage plausibler Netzstrategien eng an beide Problemkreise gekoppelt.



Eine akzeptable Vernetzungsstrategie aller Millionen Nervenzellen unseres Organismus, selbstredend unter dem Aspekt der Lernfähigkeit betrachtet, muß einfach sein, sollte hierarchisch flach<sup>26)</sup> sein, sollte Selbstheilungsverfahren nicht verbieten, ist stochastisch und ist, wie die Realität zeigt, an elektrische Impulse gebunden, die eine Spezifik aufweisen: Es handelt sich im Gegensatz zur elektrischen Leitung, die mittels Elektronen und Fehlelektronen (Löchern) funktioniert, um eine ionische 'Ladungswave', die sich in einem Medium guter Leitfähigkeit ausbreitet. Im Sinne der Evolution kann die Nervenzelle, die einen Impuls ausschüttet, mit einiger Berechtigung als eine spezielle Drüse angesehen werden, die sich dann und wann bei Erregung ergießt, und die im Laufe der Jahrtausende immer kürzere, schärfer abbildende Ergüsse entwickelt hat.

In der Elektronik entstanden in den letzten 100 Jahren eine Vielzahl von Techniken zur drahtgebundenen Übermittlung von Informationen zwischen verschiedenen Sendern und Empfängern. Diese sind fast ausschließlich an komplizierte, für die Biologie zu komplexe, und damit in der Natur nicht zu erwartende Protokolle gebunden. Es existieren kaum Verfahren, die mit einfachen Protokollen<sup>27)</sup> auskommen.

Auch eine Abbildung im optischen Sinne beinhaltet eine Vereinbarung: Sender und Empfänger können eine Vielzahl verschiedener Abbildungen aufeinander darstellen. Neben der graphentreuen Abbildung existieren Formen holographischer Abbildungen, es ist möglich, maskierte Abbildungen vorzunehmen, unvollständige Abbildungen zu erzeugen, verzerrte, verkleinerte, vergrößerte oder spiegelbildliche Abbildungen zu gewinnen.

Verfahren mit einem als Abbildung zu bezeichnenden Protokoll existieren bereits auf der unteren Datenhierarchie elektronischer Geräte, zB. beim Schreiben und Lesen einer Speicherzelle (matrixförmige Abbildung) oder bei der Hausklingelanlage (direkte Abbildung).

Die biologische Evolution hat das komplizierte Gebiet sequentieller Datenübertragungsverfahren bislang nur bei der Lautverständigung bestimmter Tierarten sowie bei der Sprache des Menschen erreicht. Auf der Ebene des Informationsaustausches im Körper sind elementare, codeleichte Verfahren zu erwarten, geeignet erscheinen zur zielgerichteten Übertragung von pulsformig codierter Informationen neben der parallelen Direktabbildung einfache Matrixverfahren sowie komplexere Matrixverfahren, im folgenden als Interferenzverfahren bezeichnet.

<sup>26)</sup> Lernen sollte effizienter sein, je geringer die Tiefe des lernenden Netzwerks ist. Das Individuum lernt einfacher, wenn die innere Verdrahtung bekannt ist, und nicht zusätzlich aufgeklärt werden muß.

<sup>27)</sup> Ein Protokoll ist eine Vorschrift für Sender und Empfänger, in welcher Reihenfolge Daten zu übertragen sind. I.a. folgen nach einem Kopf für Synchronisationszwecke und einer Adresse Rahmen für Daten und für die Prüfung der Richtigkeit der Übertragung.

### Direktübertragung (Klingeldrahtmodell, Mehrfasertheorie Hecht/Helmholtz)

Die direkte Abbildung zeichnet sich durch mangelhafte Flexibilität, hohen Leitungsbedarf und den höchsten, genetischen Codebedarf im Verhältnis zur Anzahl kommunizierender Punkte aus. Es sind  $x_{max}/dx$  Leitungen zwischen Sender und Empfänger zu verlegen, wenn  $x_{max}$  die maximale Bildweite und  $dx$  die noch aufzulösende Entfernung zweier Sensoren darstellt. Der Vorzug der direkten Abbildung liegt im Entfallen der Notwendigkeit, verzögernde Leitungen benutzen zu müssen. Zur Übertragung zwei- und mehrdimensionaler Informationen erscheint sie aufgrund der Gleichheit zwischen Bildinhalt  $B$  (bit) und Leitbahnzahl  $L$  zu aufwendig,

$$B = L.$$

Die Direktübertragung ist robust, sie kann durch Form- und Lageänderungen nicht beeinflusst werden. Durchsatz und Störsicherheit der Übertragung sind maximal. Um eine Abbildung zu gestalten, sind die Koordinaten sovieler Leitbahnen genetisch zu codieren, wie elementare Informationen (bit) zu übertragen sind. Der zeitliche Verlauf zu übertragender Signale ist völlig ohne Belang. Es können statische, periodische oder pulsförmige Signale übertragen werden. *Folglich sind Impulse für die Direktabbildung bedeutungslos.* Sind  $l$  Punkte (Neuronen) vorhanden, die über eine Direktübertragung miteinander bidirektional kommunizieren sollen (zwischen je zwei Punkten sind zwei Leitbahnen geschaltetet), so sind

$$s_j = s_{j-1} + j - 1$$

$$n = 2s_j = 2\left(\sum_{j=1}^l (j-1)\right)$$

Verbindungsleitungen zwischen diesen Punkten zu verlegen ( $s_j = \{0,1,3,6,10,15,21,28...\}$ ). Soll ein beliebig assoziierendes, selbstlernendes Netzwerk gestaltet werden, so ist der Freiheitsgrad zu schaffen, daß nahezu jedes Neuron mit jedem Neuron direkt kommunizieren kann. Folglich hätte jedes der  $l$  Neuronen etwa  $n/2$  Synapsen auszubilden. Im Cortex des Menschen treffen wir hingegen einige Milliarden Neuronen an, die über einige dutzend bis mehrere tausend Synapsen (durchschnittlich 7000), und einige bis einige dutzend axonale Endigungen verfügen.

Eine komplizierte Frage bei der Beurteilung der biologischen Relevanz der Direktübertragung ist die der Lernfähigkeit. Sie wird von der Medizin, wie von der AI- Forschung (Artificial Intelligence) bislang eindeutig beantwortet: Es ist möglich, eine Hausklingelanlage willkürlich zu verdrahten, und sie mit 'lernenden Klingelknöpfen' zu versehen. Folglich war bislang der Bedarf nach weiteren Erklärungen gestillt. Solange einem nicht die genetisch zu codierende Komplexität vergleichbarer, von Menschenhand geschaffener Kommunikationsnetzwerke (Telefon) bewußt wird. Der Netzapparat jedes einzelnen von uns ist umfangreicher, als das Telefonnetz der Erde. Man stelle sich vor, das Telefonnetz der Erde würde willkürlich verdrahtet, und jeder Teilnehmer hätte (nur) herauszufinden, welche Anschlußnummer er besitzt. Mit wachsender Teilnehmerzahl ist für jeden Teilnehmer eine proportional wachsende, insgesamt eine exponentiell wachsende Zahl von Tests vorzunehmen, um die richtigen Anschlüsse nach der Versuch- und Irrtum- Methode zu finden. Ab einer bestimmten Größe würde das Netz mit Suchvorgängen überlastet sein. Auch sind zur Netzerhaltung Reparaturen nötig, die zu neuen Vertauschungen führen. Folglich scheint die Möglichkeit der lernenden Direktübertragung auf wenige Neuronen oder auf die Notwendigkeit von Fremdlernen bei einer intern mehrlagig realisierten Struktur beschränkt zu sein.

### Matrixabbildung

Matrixverfahren sind ohne Impulsbindung in (hier nicht zu diskutierende) statischen und dynamischen Verfahren nutzbar. Bei ausschließlichem Impulsbetrieb stellen sie die erste Stufe interferenzieller Verfahren dar. Die Anzahl der Übertragungsleitungen ist identisch der

Dimension der Abbildung. Es liegt der Gedanke zugrunde, die Leitungsanzahl logarithmisch zu minimieren, indem Permutationen von Leitungen einzelnen Bildpunkten zugeordnet werden. Damit gebietet eine matrixförmige Abbildungsanordnung Einschränkungen in der Nutzbarkeit. Eine bereits von einer Erregung  $P$  belegte Leitung  $L$  kann nicht von einer zusätzlichen Erregung überlagert werden, ohne daß eine der beiden einander überlagernden Erregungen am Empfänger fehlerbehaftet ankommt. Ihr Kennzeichen ist folglich eine mangelhafte Auflösung von gefärbten Flächen und von in der Größenordnung der Matrix liegenden Details. Sie ist vorzugsweise dort zu erwarten, wo wenige Informationen mit geringstem Aufwand zu übertragen sind. Der Bildinhalt  $B$  steigt einem Exponenten  $g$  zur Leitbahnzahl  $L$  an,

$$B = L^g, \quad g > 1.$$

Die Matrixabbildung ist an eine genetische Voraussetzung gebunden: Es entstehen Übertragungsfehler, wenn ein- und dieselbe Leitbahn mehrmals eine andere Leitbahn kreuzt, und vorausgesetzt wird, daß an allen Kreuzungspunkten Impuls- Sender oder Empfänger angeordnet sind. Aufgrund der biologischen Mechanismen zur Selbstreparatur (Hanken-Büngnersche Bänder<sup>281</sup>) wie auch des bei der Matrix hohen, genetischen Codeaufwandes zur Lenkung jedes einzelnen Neurons s.o. erscheint die (reine) Matrix nur im Ausnahmefall für die Biologie geeignet.

Der zeitliche Verlauf zu übertragender Signale ist in Abhängigkeit von der Ausprägung der Verschaltung wählbar. Es können statische, periodische oder pulsformige Signale übertragen werden. *Impulsförmige Signale* sind für Matrixabbildungen nicht zwingend erforderlich.

### Interferenz- Abbildung

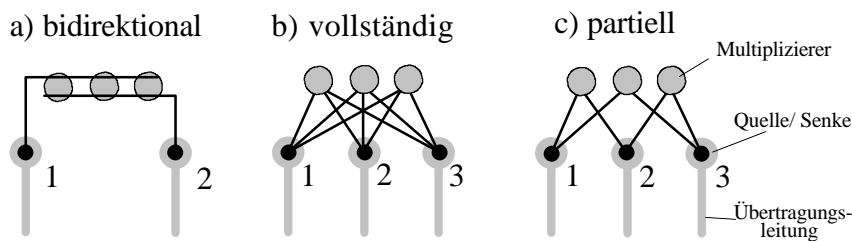
Die Interferenzabbildung entsteht aus einer störungsgesicherten, redundanten Matrixabbildung. Die Leitbahnzahl ist höher als die Dimension der Abbildung. Ein Vorzug ist es, mit wesentlich geringeren genetischen Voraussetzungen pro zu verbindendem Anschluß auskommen zu können, als alle anderen Verfahren. Ein- und dieselbe Leitbahn kann mehrfach eine andere Leitbahn kreuzen, ohne das zwangsläufig fehlerhafte Abbildungen entstehen. Im Vergleich zur Direktabbildung belegt die Interferenz- Abbildung eine logarithmisch zum Bildinhalt steigende Anzahl von Leitungen, und folglich einen nur logarithmisch mit der Datenmenge wachsenden Aufwand zur genetischen Codierung. Im Sinne der genetischen 'Codeleichte' ist sie folglich die plausibelste Methode zur Datenübertragung. Sind die Erregungen einzelner Sender stochastisch verteilt und unkorreliert, ist sie die effizienteste Methode, extrem große Datenmengen zu übertragen, und zu manipulieren. Der übertragbare Bildinhalt  $B$  ist in weiten Grenzen unabhängig von der Leitbahnzahl  $L$  wählbar, Bildinhalt und Übertragungsgeschwindigkeit sind gegeneinander austauschbar, aber der Impulsdurchsatz einer Übertragungsleitung pro Zeiteinheit ist begrenzt, d.h. es können nicht beliebig viele Erregungen gleichzeitig übertragen werden. Die Interferenz- Abbildung priorisiert, Wertigkeit (Feuerfrequenz) und Übertragungspriorität sind identisch. Der zeitliche Verlauf zu übertragender Signale ist nicht frei wählbar. *Impulsförmige Signale* sind als Funktionsbasis für neuronale Interferenzabbildungen erforderlich, wenn Amplituden frequenzproportional übertragen werden. Aufgrund dieser Eigenschaften soll unser Interesse im folgenden ausschließlich dieser faszinierenden, neuentdeckten Kommunikationsmöglichkeit gelten.

## Netzwerk-Typen

Laufzeitabhängige Interferenzen lassen sich, wie schon angedeutet, in verschieden gestalteten Netzwerktypen (Netzwerke mit verschiedenem Graphen-Typ) klassifizieren. Einleitend

<sup>281</sup> Rauber/ Kopsch: Anatomie des Menschen. Band III: Nervensystem, Sinnesorgane. Georg Thieme Verlag Stuttgart, 1987, S. 81

begegneten wir dem *bidirektionalen Typ (a)*. Er ist gekennzeichnet durch gegeneinander laufende Impuls- Bahnen und entlang dieser Bahnen angeordnete Multiplizierer. Im technischen Bereich sind verschiedene Schaltungen anzutreffen (Mikroelektronik, Picosekunden- Zeitmeßung), die dieses Verfahren benutzen. Die Biologie prägte mit der Struktur der Neurone einen anderen Netztyp aus, den *Knotentyp (b und c)*. Kennzeichnend ist der Anschluß jedes Multiplizierers (Neurons) an die Quell- und Senkenpunkte der Übertragungsstrecke. In letzter Konsequenz ist dieser Typ in reiner Form aber nirgends zu finden. Vielmehr tritt uns der *dermatome Typ mit verteilten Anschlüssen* als Naturform entgegen. Eine Abbildung wird durch stochastische Vertauschung in viele Teilabbildungen zerlegt. Stochastisch verteilt werden alle Übertragungsleitungen etwa gleichmäßig ausgelastet.



Vernetzung von Interferenzschaltungen

Der Unterschied in der Vernetzung zwischen den Knotentypen *b)* und *c)* ist gravierend. Typ *b)* ist dadurch gekennzeichnet, daß die Anzahl der Übertragungsleitungen identisch der Eingangszahl an jedem Multiplizierer ist. Folglich ist die Ausfächerung am Quellen-/Senkenknoten identisch der Anzahl der Multiplizierer. Der einzelne Multiplizierer wird aus gleichem Grunde unnötig groß. Dieses Modell ist folglich für theoretische Untersuchungen geeignet, wir werden es im folgenden stets benutzen. Für praktische Zwecke besitzt es wenig Wert. Die Natur selbst (siehe *Modell der Hinterwurzeln*) zeigt einen effektiveren Weg: Es werden wesentlich mehr Übertragungsleitungen benutzt, als nötig. Die Multiplizierer besitzen dagegen relativ weniger Anschlüsse (das sind im Cortex immerhin 1000 bis 10 000 Synapsen pro Neuron), die Struktur ist unvollständig vernetzt, die entstehende Abbildung ist schwer zu klassifizieren. Sie besteht aus sich gegenseitig ergänzenden, partiellen Abbildungen. Für sich genommen setzt sich die Gesamtabbildung aus Teilen zusammen, wiederum ist jedes dieser Teile unvollständig, und ohne die Ergänzung durch ein anderes Teil nicht einmal eine vollständige Teilabbildung, siehe *c)*.

## Die derzeitige Neuronendoktrin

Der derzeitige Wissenstand der neurobiologischen Forschung wird gekennzeichnet durch wenige, allgemein anerkannt vorhandene Elemente und Beziehungen, die von Florey<sup>291</sup> in der sog. Neuronendoktrin zusammengefaßt wurden. Hier eine geringfügig gekürzte Darstellung:

- a) Lernen und Gedächtnis sind Leistungen des Gehirns.
- b) Das Gehirn besteht (im wesentlichen) aus Neuronen.
- c) Lernen und Gedächtnis sind Leistungen der Neuronen.
- d) Neuronen sind zu Netzwerken verschaltet.

<sup>291</sup> Florey, E., Breidbach, O. (Herausg.): Das Gehirn - Organ der Seele? Zur Ideengeschichte der Neurobiologie. Akademie-Verlag Berlin, 1993.

- e) Verbindungsstellen zwischen Neuronen sind Synapsen.
- f) Synapsen kommt die Aufgabe der Erregungs- /Hemmungsübertragung zwischen Neuronen zu.
- g) Neuronen erzeugen Nervenimpulse, die als Aktionspotentiale oder -ströme meßbar sind.
- h) Neuronale Impulse breiten sich, gleich an welcher Stelle des Neurons sie entstehen oder eingespeist werden, über alle Verzweigungen des Neurons aus.
- i) Der Zustand während der Dauer eines Impulses wird als Erregung bezeichnet.
- j) Die Reizung einer Synapse verändert im empfangenden Neuron die Bereitschaft, Nervenimpulse zu erzeugen, in hemmender oder in erregender Richtung.
- k) Synapsen können ihre Wirksamkeit als Konsequenz vorausgegangener Erregung erhöhen (Potenzierung) oder verringern (Depression).
- l) Es sind verschiedenste Zwischenstufen von Aktivierung und Deaktivierung eines Neurons bekannt: Langzeitpotenzierung, Langzeitdepression, Kurzzeitpotenzierung, Kurzzeitdepression etc.
- m) Die Wirksamkeit einer Synapse kann durch extra-neuronal wirkende Stoffe beeinflußt werden.
- n) Gruppen verschalteter Neurone bilden funktionelle Einheiten (Ensembles).

Die Doktrin offenbart, daß populäre Denkansätze der AI-Forschung offenbar Einfluß auf die Untersuchungsmethodik nehmen.

Aus interferenzieller Sicht gäbe es etliche, zusätzliche Paragraphen aufzunehmen. Andere hingegen gehen am Wesen der Erscheinung (*d*) vorbei, oder sind zu unscharf (*b, i, l, n*).

Der Kommentierung und Weiterentwicklung der Neuronendoktrin ist dieses Buch gewidmet.